

ESTRATEGIAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA Y REDUCCIÓN DE LA LIXIVIACIÓN DE NITRATOS EN SISTEMAS PRODUCTIVOS DE PLANTAS AROMÁTICAS



MARTHA CONSTANZA DAZA TORRES

Ing Agrícola M Sc

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
DOCTORADO EN INGENIERÍA
ÉNFASIS EN SANITARIA Y AMBIENTAL
2018**

ESTRATEGIAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA Y REDUCCIÓN DE LA LIXIVIACIÓN DE NITRATOS EN SISTEMAS PRODUCTIVOS DE PLANTAS AROMÁTICAS



MARTHA CONSTANZA DAZA TORRES
Ing Agrícola M. Sc.

**Tesis de doctorado presentada como requisito parcial para optar al título de Doctor en Ingeniería,
énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental**

Tutores
Norberto Urrutia Cobo
Ing Agrícola Ph. D. en Recursos Hidráulicos
Janeth Sanabria
Lic. Biología Ph. D. en Ciencias Biológicas

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
DOCTORADO EN INGENIERÍA
ÉNFASIS EN SANITARIA Y AMBIENTAL
2018

A la memoria de mi padre por todas las enseñanzas brindadas
A mi madre y mi hermana por todo su apoyo y su amor
A mi esposo Waldemar, sin ti hubiera sido muy difícil llegar hasta donde he llegado
A mis hijos, Mariana y Julián, por ser mi ancla y permitirme ser su ejemplo

AGRADECIMIENTOS

En mi primer lugar a la **Universidad del Valle**, por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios doctorales, y por la financiación de gran parte del trabajo a través de convocatorias internas de investigación.

Me gustaría agradecer especialmente al profesor **Norberto Urrutia Cobo**, asesor de tesis por sus enseñanzas, dedicación y apoyo para la realización de este trabajo de investigación, además de ser el investigador responsable de los proyectos financiadores del trabajo.

A la profesora **Irma Janeth Sanabria**, asesora de mi tesis, por sus conocimientos, su manera de trabajar, su paciencia y motivación han sido fundamentales para mi formación como investigadora.

A los estudiantes de maestría que trabajaron a mi lado en el desarrollo de este trabajo, ingenieros **Victor Manuel Torres, Cindy Cynthia Elejalde y Jhon Sarria**.

A los estudiantes de pregrado que participaron en los proyectos de investigación que financiaron este trabajo doctoral, **Hugo Stiven Meneses, Paulo César Arias, David Esteban Ríos, Sebastián Escobar, Jefferson Díaz, Luis Esteban Aguirre, Greydy Ladino, Brenda Montoya, Juliana Arias, Miguel Ángel Díaz, Luis Fernando Quiñones, David Lenis, Jefferson Gamboa y Karen García**.

A la señorita **Catherine Gómez**, técnica del laboratorio de Aguas y Suelos Agrícolas – LASA de la Universidad del Valle, por su apoyo en el trabajo de laboratorio.

Al señor **Heberth Hernández**, técnico del laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica por su apoyo en la adecuación de los invernaderos y en el montaje de la infraestructura experimental.

Al profesor **Yesid Carvajal**, por permitirme participar en el proyecto de COLCIENCIAS “Análisis regional de las sequías relacionadas con la variabilidad climática para la implementación de estrategias de adaptación a sistemas productivos agrícolas del Valle del Cauca” código 110666044651, que financió la etapa 4, relacionada con la evaluación de las enmiendas órgano minerales de mi trabajo doctoral.

Al señor **Carlos Andrés Díaz**, por prestarme su finca para la realización de la primera etapa de este trabajo doctoral, regalar todo el suelo utilizado para la investigación de las demás etapas y brindarme su asesoría en la producción de aromáticas, especialmente de albahaca.

Al profesor **Wilmar Torres**, por su asesoría en la parte estadística para los modelos de mineralización.

Al ingeniero **Pedro Santiago Posso**, funcionario de la Secretaría de Agricultura y Pesca del Valle del Cauca, por su asesoría y permitir la conexión con los productores de aromáticas en el Valle.

En general, a todas aquellas personas que, de una u otra manera, durante estos años estuvieron apoyándome para culminar este trabajo.

LISTA DE ABREVIATURAS

Nomenclatura	Descripción	Nomenclatura	Descripción
AP	Altura de planta	FBN	Fijación Biológica del Nitrógeno
CC	Capacidad de Campo	FN	Fertilización Nitrogenada
CD	Consorcio diazotrofo	FLL	Fertilizantes de Liberación Lenta
CE	Conductividad Eléctrica	Kc	Coefficiente único del cultivo
CIC	Capacidad de Intercambio Catiónico	LD	Lisímetros de Drenaje
CICE	Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva	MOS	Materia orgánica del Suelo
ddt	Días después del trasplante	MF	Masa Fresca
drc	Dosis requerida por el cultivo	MS	Masa Seca
DN	Dosis Nitrogenada	N	Nitrógeno
EI	Eficiencia interna de utilización	NL	Nitrógeno Lixiviado
ER	Eficiencia aparente de recuperación	NF	Nitrógeno Foliar
ET	Evapotranspiración	NTS	Nitrógeno Total del Suelo
ETc	Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar	STARDM	Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas Municipales
ETo	Evapotranspiración del cultivo de referencia		

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	14
SUMMARY	14
INTRODUCCIÓN	15
1. MARCO CONCEPTUAL	18
1.1. MANEJO DEL AGUA EN LOS CULTIVOS	18
1.1.1. EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA (ET _o)	19
1.1.2. EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO (ET _c)	19
1.1.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO AJUSTADA (ET _c AJ).....	20
1.1.4. COEFICIENTE ÚNICO DEL CULTIVO (K _c)	20
1.1.5. EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA	20
1.2. EL CICLO DEL NITRÓGENO (N)	21
1.3. EL NITRÓGENO EN LA PLANTA Y LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA	22
1.3.1. EFICIENCIA DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA	25
1.4. FIJACIÓN BIOLÓGICA DEL NITROGENO (FBN)	25
1.5. LOS COLOIDES, LA CIC DEL SUELO Y LAS ENMIENDAS ORGANO MINERALES	27
1.6. NITRÓGENO LIXIVIADO PROVENIENTE DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA DE SISTEMAS PRODUCTIVOS AGRÍCOLAS	30
1.7. PRODUCCIÓN DE PLANTAS AROMÁTICAS	31
1.7.1. EL CULTIVO DE ESTEVIA	32
1.7.2. EL CULTIVO DE ALBAHACA	33
2. DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DEL COEFICIENTE DEL CULTIVO (K_c) PARA ESTEVIA (STEVIA REBAUDIANA B.) Y ALBAHACA (OCIMUM BASILICUM L.)	34
2.1. INTRODUCCIÓN	34
2.2. OBJETIVO	35
2.3. MATERIALES Y MÉTODOS	35
2.3.1. LOCALIZACIÓN Y ÁREA DE ESTUDIO	35
2.3.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LISÍMETROS DE DRENAJE (LD)	36
2.3.3. MONTAJE Y DISEÑO EXPERIMENTAL PARA CÁLCULO DE ET _c PARA EL CULTIVO DE ESTEVIA	36
2.3.4. MONTAJE Y DISEÑO EXPERIMENTAL PARA CÁLCULO DE ET _c PARA EL CULTIVO DE ALBAHACA.....	37
2.3.5. BALANCE HÍDRICO Y DETERMINACIÓN DE LA CURVA DEL COEFICIENTE DEL CULTIVO (K _c)	38
2.3.6. TRATAMIENTO DE LOS DATOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO	39
2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
2.4.1. NECESIDADES HÍDRICAS DEL CULTIVO DE ESTEVIA	39
2.4.2. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DEL CULTIVO (K _c) PARA ESTEVIA.....	41
2.4.3. NECESIDADES HÍDRICAS DEL CULTIVO DE ALBAHACA	42
2.4.4. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DEL CULTIVO (K _c) PARA ALBAHACA	43
2.5. CONCLUSIONES	45
3. PLAN DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA PARA LOS CULTIVOS DE ESTEVIA (STEVIA REBAUDIANA BERT.) Y ALBAHACA (OCIMUM BASILICUM L.)	46

3.1. INTRODUCCIÓN	46
3.2. OBJETIVO	48
3.3. MATERIALES Y MÉTODOS	48
3.3.1. LOCALIZACIÓN.....	48
3.3.2. DESCRIPCIÓN DEL SUELO	48
3.3.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS ABONOS ORGÁNICOS	48
3.3.4. CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DEL TANQUE EVAPORÍMETRO	49
3.3.5. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LISÍMETROS DE DRENAJE (LD).....	49
3.3.6. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE DOSIS NITROGENADA (DN) PARA LOS CULTIVOS DE ESTEVIA Y ALBAHACA.	50
3.3.7. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE MINERALIZACIÓN DEL N DE ABONOS ORGÁNICOS: LOMBRICOMPOST Y GALLINAZA.	51
3.3.8. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA EVALUACIÓN DE FERTILIZANTES DE LIBERACIÓN LENTA (FLL) PARA LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA (FN) DE ESTEVIA Y ALBAHACA.	52
3.3.9. LABORES CULTURALES	53
3.3.10. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	54
3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
3.4.1. DOSIS NITROGENADA (DN) ADECUADA PARA ESTEVIA.....	54
3.4.1.1. Efecto de la Dosis Nitrogenada (DN) en la lixiviación de Nitrógeno	54
3.4.1.2. Efecto de la Dosis Nitrogenada (DN) en propiedades agronómicas de estevia:.....	57
3.4.1.3. Efecto de la Dosis Nitrogenada (DN) en las propiedades del suelo.....	58
3.4.1.4. Efecto de la Dosis Nitrogenada (DN) en la eficiencia del uso del agua (EUA).....	60
3.4.2. DOSIS NITROGENADA (DN) ADECUADA PARA ALBAHACA	61
3.4.2.1. Efecto de la Dosis Nitrogenada (DN) en la lixiviación de Nitrógeno	61
3.4.2.2. Efecto de la Dosis Nitrogenada (DN) en propiedades agronómicas de albahaca.....	62
3.4.2.3. Efecto de la Dosis Nitrogenada (DN) en las propiedades del suelo.....	64
3.4.2.4. Efecto de la Dosis Nitrogenada (DN) en la eficiencia del uso del agua (EUA).....	65
3.4.3. CURVA DE MINERALIZACIÓN DEL NITRÓGENO (N) PARA LOS ABONOS ORGÁNICOS LOMBRICOMPOST Y GALLINAZA.....	66
3.4.4. USO DE FERTILIZANTES DE LIBERACIÓN LENTA (FLL) EN LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA (FN) DE ESTEVIA 72	
3.4.4.1. Efecto de los Fertilizantes de Liberación Lenta (FLL) en el Nitrógeno Lixiviado (NL)	72
3.4.4.2. Efecto de los Fertilizantes de Liberación Lenta (FLL) en propiedades agronómicas de estevia.....	73
3.4.4.3. Efecto de los Fertilizantes de Liberación Lenta (FLL) en propiedades del suelo:	74
3.4.4.4. Efecto de Fertilizantes de Liberación Lenta (FLL) en la eficiencia de uso del agua.....	77
3.4.5. USO DE FERTILIZANTES DE LIBERACIÓN LENTA (FLL) EN LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA (FN) DE ALBAHACA	77
3.4.5.1. Efecto de los Fertilizantes de Liberación Lenta (FLL) en el Nitrógeno Lixiviado (NL)	77
3.4.5.2. Efecto de los Fertilizantes de Liberación Lenta (FLL) en propiedades agronómicas de albahaca..	78
3.4.5.3. Efecto de los Fertilizantes de Liberación Lenta (FLL) en las propiedades del suelo:.....	80
3.4.5.4. Efecto de la Fertilizantes de Liberación Lenta (FLL) en la eficiencia del uso del agua (EUA)	83
3.4.6. PLAN DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA (FN) PARA ESTEVIA.....	83
3.4.7. PLAN DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA (FN) PARA ALBAHACA.	84
3.5. CONCLUSIONES	84
<u>4. USO DE ENMIENDAS ORGANO – MINERALES PARA EL MANEJO AGRONÓMICO Y AMBIENTAL DE LA FN DE ESTEVIA (STEVIA REBAUDIANA B.) Y ALBAHACA (OCIMUM BASILICUM L.)</u>	85
4.1. INTRODUCCIÓN	85
4.2. OBJETIVO	86

4.3. MATERIALES Y MÉTODOS	86
4.3.1. LOCALIZACIÓN.....	86
4.3.2. DESCRIPCIÓN DEL SUELO Y DE ABONOS ORGÁNICOS.....	86
4.3.3. DESCRIPCIÓN DE LA ENMIENDA ÓRGANO MINERAL	86
4.3.4. MEDICIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN	87
4.3.5. FASE 1. PROPORCIONES PARA LA ELABORACIÓN DE LA ENMIENDA ÓRGANO MINERAL	87
4.3.6. FASE 2. EVALUACIÓN DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA DE LA FN EN CULTIVOS DE AROMÁTICAS	89
4.3.6.1. Construcción de Lisímetros de Drenaje (LD)	89
4.3.6.2. Diseño experimental:.....	89
4.3.6.3. Preparación de la enmienda órgano mineral	89
4.3.6.4. Variables de respuesta.....	90
4.3.6.5. Prácticas culturales:	90
4.3.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	91
4.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	91
4.4.1. FASE 1: PROPORCIONES PARA LA ELABORACIÓN DE LA ENMIENDA ÓRGANO MINERAL	91
4.4.2. EFECTO DE USO DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES EN LN EN AROMÁTICAS	97
4.4.3. EFECTO DE USO DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES EN PROPIEDADES AGRONÓMICAS DE ESTEVIA.	98
4.4.4. EFECTO DE USO DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES EN PROPIEDADES DEL SUELO SEMBRADO CON ESTEVIA. 100	
4.4.5. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES EN LA EFICIENCIA DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA (FN) EN ESTEVIA.....	102
4.4.6. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES EN EL USO EFICIENTE DEL AGUA (EUA) EN ESTEVIA. 103	
4.4.7. EFECTO DE USO DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES EN PROPIEDADES AGRONÓMICAS DE ALBAHACA. ...	104
4.4.8. EFECTO DE USO DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES EN PROPIEDADES DEL SUELO SEMBRADO CON ALBAHACA	106
4.4.9. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES EN LA EFICIENCIA DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA (FN) EN ALBAHACA.....	109
4.4.10. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES EN EL USO EFICIENTE DEL AGUA (EUA) EN ALBAHACA.	110
4.5. CONCLUSIONES.....	112

5. USO DE CONSORCIOS DIAZÓTROFOS (CD) PROVENIENTES DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS MUNICIPALES (STARDM) EN LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA (FN) DE ESTEVIA (STEVIA REBAUDIANA B.) Y ALBAHACA (OCIMUM BASILICUM L.) 113

5.1. INTRODUCCIÓN.....	113
5.2. OBJETIVO.....	114
5.3. MATERIALES Y MÉTODOS	114
5.3.1. LOCALIZACIÓN.....	114
5.3.2. DESCRIPCIÓN DEL SUELO	114
5.3.3. CARACTERIZACIÓN DEL CONSORCIO DIAZÓTROFO (CD)	116
5.3.4. DISEÑO EXPERIMENTAL	116
5.3.5. ESTABLECIMIENTO DEL CULTIVO.....	117
5.3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	118
5.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	118
5.4.1. EFECTO DE LA APLICACIÓN DEL CONSORCIO DIAZÓTROFO (CD) EN PROPIEDADES AGRONÓMICAS DE ESTEVIA. 118	

5.4.2.	EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE CONSORCIO DIAZÓTROFO (CD) EN PROPIEDADES DEL SUELO DE ESTEVIA.	119
5.4.3.	EFFECTO DE LA APLICACIÓN DEL CONSORCIO DIAZÓTROFO (CD) EN PROPIEDADES AGRONÓMICAS DE ALBAHACA.	121
5.4.4.	EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE CONSORCIOS DIAZÓTROFOS (CD) EN PROPIEDADES DEL SUELO CULTIVADO CON ALBAHACA.	123
5.5.	CONCLUSIONES	124

6. PLAN DE MANEJO INTEGRAL PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA (FN) Y LA REDUCCIÓN DE LIXIVIACIÓN DE NITRATOS EN LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS DE STEVIA REBAUDIANA B. Y OCIMUM BASILICUM L...... **125**

6.1.	INTRODUCCIÓN	125
6.2.	OBJETIVO	129
6.3.	MATERIALES Y MÉTODOS	129
6.3.1.	LOCALIZACIÓN	129
6.3.2.	DESCRIPCIÓN DEL SUELO	129
6.3.3.	CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DEL TANQUE EVAPORÍMETRO	129
6.3.4.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LISÍMETROS DE DRENAJE (LD)	130
6.3.5.	DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LOS CULTIVOS DE ESTEVIA Y ALBAHACA.	130
6.3.6.	VARIABLES DE RESPUESTA	131
6.3.7.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	131
6.4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	131
6.4.1.	EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS EN LA LIXIVIACIÓN DE NITRÓGENO EN ESTEVIA	131
6.4.2.	EFFECTO DE ESTRATEGIAS EMPLEADAS EN LAS PROPIEDADES AGRONÓMICAS DE LA ESTEVIA.	133
6.4.3.	EFFECTO DE ESTRATEGIAS EMPLEADAS EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO DE ESTEVIA.	135
6.4.4.	EFFECTO DE ESTRATEGIAS EMPLEADAS EN LA EFICIENCIA DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA (FN) DE ESTEVIA	136
6.4.5.	EFFECTO DE ESTRATEGIAS EMPLEADAS EN EL USO EFICIENTE DEL AGUA DE ESTEVIA	137
6.4.6.	EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS EN LA LIXIVIACIÓN DE NITRÓGENO EN ALBAHACA	138
6.4.7.	EFFECTO DE ESTRATEGIAS EMPLEADAS EN LAS PROPIEDADES AGRONÓMICAS DE ALBAHACA	138
6.4.8.	EFFECTO DE ESTRATEGIAS EMPLEADAS EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN ALBAHACA	140
6.4.9.	EFFECTO DE ESTRATEGIAS EMPLEADAS EN LA EFICIENCIA DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA (FN) DE ALBAHACA	142
6.4.10.	EFFECTO DE ESTRATEGIAS EMPLEADAS EN EL USO EFICIENTE DEL AGUA EN ALBAHACA	143
6.4.11.	PROPUESTA DE PLAN DE MANEJO PARA LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA (FN) EN CULTIVOS DE ESTEVIA Y ALBAHACA	144
6.5.	CONCLUSIONES	144

7. CONSIDERACIONES FINALES..... **145**

8. LITERATURA CITADA..... **150**

9. ANEXOS..... **158**

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. FACTORES QUE AFECTAN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN CON REFERENCIA A CONCEPTOS RELACIONADOS DE ET.	18
FIGURA 2. CURVA GENERALIZADA DEL COEFICIENTE DE UN CULTIVO	20
FIGURA 3. EL CICLO DEL N EN SISTEMAS TERRESTRES.....	21
FIGURA 4. RUTAS DE TOMA DEL N POR LAS PLANTAS.	23
FIGURA 5. 1. (A) TETRAEDRO DE SILICIO. (B). LÁMINA DE TETRAEDROS DE SILICIO. 2. (A) OCTAEDRO DE ALUMINIO. (B) LÁMINA DE TETRAEDROS DE ALUMINIO.	28
FIGURA 6. ESTRUCTURAS CRISTALINAS DE ARCILLAS 1:1 (CAOLINITAS) Y 2:1 (MONTMORILLONITAS)	28
FIGURA 7. MECANISMO DE ENLACE ENTRE SUSTANCIAS HÚMICAS Y COLOIDES INORGÁNICOS POR INTERACCIÓN ION-DIPOLO.....	29
FIGURA 8. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA FINCA “LAS PALMAS”, CORREGIMIENTO DE JUANCHITO CANDELARIA (VALLE DEL CAUCA).	35
FIGURA 9. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS LD EMPLEADOS EN LA EXPERIMENTACIÓN.....	36
FIGURA 10. REGISTRO DE LAS LÁMINAS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN Y PRECIPITACIÓN DURANTE EL TIEMPO EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DEL Kc PARA EL CULTIVO DE ESTEVIA.....	37
FIGURA 11. EVAPOTRANSPIRACIÓN Y PRECIPITACIÓN REGISTRADAS DURANTE EL TIEMPO EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DEL Kc PARA EL CULTIVO. DE ALBAHACA EN EL VALLE DEL CAUCA (COLOMBIA).....	37
FIGURA 12. VARIACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS DEL CULTIVO (ETc) EN EL PERIODO DE CRECIMIENTO DE ESTEVIA EN LD.	40
FIGURA 13. VARIACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN EL CULTIVO DE ESTEVIA.	41
FIGURA 14. CURVA PROMEDIO DEL COEFICIENTE DE CULTIVO (Kc) PARA ESTEVIA.	42
FIGURA 15. VARIACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS DEL CULTIVO (ETc) EN EL PERIODO DE CRECIMIENTO DE ALBAHACA EN LD.	42
FIGURA 16. VARIACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN EL CULTIVO DE ALBAHACA.	43
FIGURA 17. CURVA PROMEDIO DEL COEFICIENTE DE CULTIVO (Kc) PARA ALBAHACA (<i>OCIMUM BASILICUM L.</i>).	44
FIGURA 18. CALIBRACIÓN DEL TANQUE EVAPORÍMETRO.	49
FIGURA 19. LD EMPLEADOS PARA LA RECOLECCIÓN DE NITRATO LIXIVIADO EN PLANTAS DE ESTEVIA Y ALBAHACA.....	50
FIGURA 20. UNIDADES EXPERIMENTALES PARA EL ESTUDIO DE LA MINERALIZACIÓN DE ABONOS ORGÁNICOS.....	51
FIGURA 21. DISPOSICIÓN DE LD Y MONTAJE DE SISTEMA DE RIEGO LOCALIZADO PARA ESTEVIA.....	52
FIGURA 22. VOLUMEN DE LIXIVIADOS RECOGIDOS Y NL TOTAL PARA CADA DN EN ESTEVIA.	56
FIGURA 23. RELACIÓN ENTRE LA DN APLICADA Y LA LIXIVIACIÓN DE AMONIO Y NITRATO EN ESTEVIA.	56
FIGURA 24. CONTENIDO DE NF EN PLANTAS EN FUNCIÓN DE LA DN EN ESTEVIA. RELACIÓN ENTRE LA DN APLICADA Y EL CONTENIDO DE NF EN ESTEVIA.	58
FIGURA 25. NTS A LOS 105 DESPUÉS DEL TRASPLANTE OBTENIDO CON LA VARIACIÓN DE DN EN ESTEVIA.....	60
FIGURA 26. EFICIENCIA DE LA FN EN ESTEVIA USANDO DIFERENTES DN.	60
FIGURA 27. USO EFICIENTE DE CONSUMO DE AGUA EN $KG \cdot M^{-3}$ DE MF Y MS EN FUNCIÓN DE LA DN EN ESTEVIA.....	60
FIGURA 28. VOLUMEN LIXIVIADO PARA LAS DIFERENTES DN EN ALBAHACA. NL TOTAL EN ALBAHACA.	62
FIGURA 29. RELACIÓN ENTRE LA DN APLICADA Y LA LIXIVIACIÓN DE AMONIO Y NITRATO EN ALBAHACA.	62
FIGURA 30. CONTENIDO DE NF Y RELACIÓN ENTRE LA DN APLICADA Y EL CONTENIDO DE NF EN ALBAHACA.....	64
FIGURA 31. NTS A LOS 71 DESPUÉS DEL TRASPLANTE EN FUNCIÓN DE LA DN APLICADA EN ALBAHACA.....	65
FIGURA 32. EFICIENCIA DE LA FN EN ALBAHACA USANDO DIFERENTES DN.	65
FIGURA 33. USO EFICIENTE DE CONSUMO DE AGUA EN KG/M^3 DE MF Y MS EN FUNCIÓN DE LA DN EN ALBAHACA.....	66
FIGURA 34. AMONIO MINERALIZADO A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES DOSIS DE ABONOS ORGÁNICOS.	67
FIGURA 35. NITRATO MINERALIZADO A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES DOSIS DE ABONOS ORGÁNICOS.	67
FIGURA 36. CURVA DE N INORGÁNICO DISPONIBLE (AMONIO + NITRATO) EN EL SUELO PROVENIENTE DE DIFERENTES DN DE ABONOS ORGÁNICOS DURANTE 16 SEMANAS DE INCUBACIÓN.....	68
FIGURA 37. MINERALIZACIÓN (+) E INMOVILIZACIÓN (-) DEL N EN EL SUELO DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DE ABONOS ORGÁNICOS DURANTE 16 SEMANAS DE INCUBACIÓN.	69
FIGURA 38. N MINERALIZADO OBTENIDO POR EL MODELO DE STANFORD Y SMITH ($NM = N_0 (1 - e^{-kt})$) PARA LAS DIFERENTES DN DE LOMBRICOMPOST Y GALLINAZA.....	70
FIGURA 39. N TOTAL MINERALIZADO DESPUÉS DE 16 SEMANAS DE INCUBACIÓN.....	71
FIGURA 40. NL TOTAL EN ESTEVIA USANDO FLL.....	73
FIGURA 41. A EFICIENCIA APARENTE DE RECUPERACIÓN. B. EFICIENCIA INTERNA DE UTILIZACIÓN DEL N APLICADO EN PLANTAS DE ESTEVIA.	76
FIGURA 42. EFECTO DE LOS ABONOS DE LIBERACIÓN LENTA EN EL USO EFICIENTE DE DE AGUA.	77

FIGURA 43. A. EFECTO DE LA DN (F= 1,98; P= 0,11), B. EL TIPO DE ABONO (F=11,56; P<0,001) Y C. EL TIPO DE LIBERACIÓN (F=9,16; P<0,001) EN EL PORCENTAJE DE MS DE ALBAHACA.	80
FIGURA 44. EFECTO DE LA DN (F=5,99; P=0,00), EL TIPO DE ABONO (F= 16,2; P< 0,001) Y EL TIPO DE LIBERACIÓN (F=9,68; P< 0,001) EN EL PORCENTAJE DE NF EN ALBAHACA.	80
FIGURA 45. EFICIENCIAS DE LA FN EN ALBAHACA USANDO DIFERENTES FLL.	82
FIGURA 46. USO EFICIENTE DE CONSUMO DE AGUA EN KG·M ⁻³ DE MF Y MS EN FUNCIÓN DEL TIPO DE FLL EN ALBAHACA.	83
FIGURA 47. LD UTILIZADOS EN LA FASE 1 DEL EXPERIMENTO PARA EL ESTUDIO DE PROPORCIONES DE ENMIENDAS.	88
FIGURA 48. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA EVALUACIÓN DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES.	89
FIGURA 49. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE LA ENMIENDA ÓRGANO MINERAL EN LA CONCENTRACIÓN DE AMONIO (A) (F=11,73; P< 0,01) Y NITRATO (B) (F=3,95; P< 0,01) EN EL AGUA DE LIXIVIACIÓN.	91
FIGURA 50. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES EN EL VOLUMEN DE LIXIVIADOS.	93
FIGURA 51. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES EN LA PÉRDIDA DE AMONIO (F= 53,68; P<0,001) Y NITRATO (F= 38,21; P< 0,001) POR HECTÁREA.	94
FIGURA 52. EFECTO DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES EN EL NTS A LOS CUATRO MESES DESPUÉS DE SU APLICACIÓN.	97
FIGURA 53. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES EN LA EFICIENCIA DE LA FERTILIZACIÓN, UTILIZANDO FERTILIZANTES DE RÁPIDA Y LENTA LIBERACIÓN EN CULTIVO DE ESTEVIA.	102
FIGURA 54. EFECTO DE LA PRESENCIA DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES Y EL TIPO DE FERTILIZANTE EN LA EFICIENCIA APARENTE DE RECUPERACIÓN EN EL CULTIVO DE ESTEVIA.	103
FIGURA 55. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES EN LA EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA, UTILIZANDO FERTILIZANTES DE RÁPIDA Y LENTA LIBERACIÓN EN CULTIVO DE ESTEVIA.	104
FIGURA 56. EFECTO DE LA PRESENCIA DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES Y EL TIPO DE FERTILIZANTE EN EL USO EFICIENTE DEL AGUA EN EL CULTIVO DE ESTEVIA.	104
FIGURA 57. EFECTO DE LA PRESENCIA DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES Y EL TIPO DE FERTILIZANTE EN EL PORCENTAJE DE NF DE ALBAHACA.	106
FIGURA 58. EFECTO DE USO DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES EN LA EFICIENCIA AGRONÓMICA DEL CULTIVO DE ALBAHACA. ...	109
FIGURA 59. EFECTO DE LA PRESENCIA DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES Y EL TIPO DE FERTILIZANTE EN LA EFICIENCIA AGRONÓMICA DEL CULTIVO DE ALBAHACA.	110
FIGURA 60. EFECTO DE USO DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES Y EL TIPO DE FERTILIZANTE EN EL USO EFICIENTE EN EL USO EFICIENTE DEL AGUA EN EL CULTIVO DE ALBAHACA.	110
FIGURA 61. EFECTO DE LA PRESENCIA DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES Y EL TIPO DE FERTILIZANTE EN EL USO EFICIENTE DEL AGUA DEL CULTIVO DE ALBAHACA.	111
FIGURA 62. MONTAJE EXPERIMENTAL PARA LA EVALUACIÓN DE CD PROVENIENTES DE STARDM PARA ESTEVIA (A) Y ALBAHACA (B).	117
FIGURA 63. PORCENTAJE DE PUBLICACIONES CLASIFICADAS POR AÑO RELACIONADAS CON LA LIXIVIACIÓN DE NITRATOS Y LA FN DE CULTIVOS.	125
FIGURA 64. ARTÍCULOS RELACIONADOS CON NL Y LA FN POR PAÍS.	126
FIGURA 65. ARTÍCULOS RELACIONADOS CON NL Y LA FN POR CULTIVO.	126
FIGURA 66. TANQUE EVAPORÍMETRO UBICADO EN EL INVERNADERO DONDE SE LLEVÓ A CABO EL EXPERIMENTO.	129
FIGURA 67. MONTAJE EXPERIMENTAL PARA EVALUAR ESTRATEGIAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA FN Y REDUCCIÓN DE LIXIVIACIÓN DE NITRATOS PARA ALBAHACA.	130
FIGURA 68. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE N EN LA CONCENTRACIÓN DE NF EN ESTEVIA.	135
FIGURA 69. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA DE N EN LA EFICIENCIA INTERNA DE UTILIZACIÓN EN ESTEVIA.	137
FIGURA 70. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE N EN EL USO EFICIENTE DEL AGUA EN ESTEVIA.	137
FIGURA 71. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE N EN LA CONCENTRACIÓN DE NF EN ALBAHACA.	140
FIGURA 72. EFECTO DE ESTRATEGIAS PARA OPTIMIZAR LA FN EN LA EFICIENCIA INTERNA DE LA FN EN ALBAHACA.	142
FIGURA 73. EFECTO DE ESTRATEGIAS PARA OPTIMIZAR LA FN EN EL USO EFICIENTE DEL AGUA EN ALBAHACA.	143

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. TIPO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS.....	24
TABLA 2. ÍNDICES DE EFICIENCIA DEL USO DE NUTRIENTES UTILIZADOS EN AGRONOMÍA.....	25
TABLA 3. ORGANISMOS Y SISTEMAS DE FBN MÁS COMUNES EN EL SUELO.....	26
TABLA 4. EXPERIENCIAS RELACIONADAS CON LA RELACIÓN ENTRE N APLICADO, N LIXIVIADO Y MÉTODOS DE RIEGO.	31
TABLA 5. SEGMENTACIÓN DE PRODUCTORES DE PLANTAS AROMÁTICAS PRESENTES EN COLOMBIA.	32
TABLA 6. CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA DEL SUELO PROVENIENTE DE LA FINCA “LAS PALMAS” CANDELARIA (VALLE DEL CAUCA).....	35
TABLA 7. VALORES PROMEDIO DE COEFICIENTES DE CULTIVO (Kc) POR ETAPA FENOLÓGICA PARA ESTEVIA CULTIVADA EN EL VALLE DEL CAUCA COLOMBIA.	41
TABLA 8. VALORES PROMEDIO DE COEFICIENTES DE CULTIVO (Kc) POR ETAPA FENOLÓGICA PARA ALBAHACA GENOVESA CULTIVADA EN EL VALLE DEL CAUCA COLOMBIA.....	44
TABLA 9. MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS PARA EL ESTUDIO DE LA MINERALIZACIÓN DEL N DE ABONOS ORGÁNICOS.	47
TABLA 10. EXPERIENCIAS RELACIONADAS CON LA FN EN ESTEVIA Y ALBAHACA.	48
TABLA 11. CARACTERIZACIÓN DE LOS ABONOS ORGÁNICOS UTILIZADOS EN LA EXPERIMENTACIÓN DE USO DE FLL EN ESTEVIA Y ALBAHACA.	49
TABLA 12. DESCRIPCIÓN Y DN DE LOS TRATAMIENTOS UTILIZADOS EN EL EXPERIMENTO DE USO DE FLL PARA ESTEVIA Y ALBAHACA.	52
TABLA 13. EFECTO DE LA DN EN LA LIXIVIACIÓN DE AMONIO, NITRATO Y TOTAL AMONIACAL A LOS 29, 85 Y 115 DÍAS DESPUÉS DEL TRASPLANTE (DDT) EN ESTEVIA.	55
TABLA 14. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE DN EN VARIABLES AGRONÓMICAS DE ESTEVIA A LOS 110 DDT.....	57
TABLA 15. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE DN EN PROPIEDADES DEL SUELO A LOS 96 DDT EN ESTEVIA.....	59
TABLA 16. EFECTO DE LA DN EN LA LIXIVIACIÓN DE AMONIO, NITRATO Y TOTAL A LOS 24 Y 55 DÍAS DESPUÉS DEL TRASPLANTE (DDT) EN ALBAHACA.....	61
TABLA 17. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE DN EN VARIABLES AGRONÓMICAS DE ALBAHACA.....	63
TABLA 18. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE DN EN PROPIEDADES DEL SUELO CULTIVADO CON ALBAHACA A LOS 76 DESPUÉS DEL TRASPLANTE.....	64
TABLA 19. N MINERALIZADO ACUMULADO OBTENIDO MEDIANTE EL AJUSTE DE RESULTADOS AL MODELO DE BROADBENT (NM= ATB) PARA LAS DIFERENTES DN DE LOMBRICOMPOST Y GALLINAZA.	69
TABLA 20. PARÁMETROS DEL MODELO DE STANFORD Y SMITH (NM= No (1-E ^{-kt})) PARA LAS DIFERENTES DN DE LOMBRICOMPOST Y GALLINAZA.....	70
TABLA 21. EFECTO DEL USO DE ABONOS NITROGENADOS DE LIBERACIÓN LENTA EN LA LIXIVIACIÓN DE NITRATO DURANTE EL PERIODO EXPERIMENTAL DE ESTEVIA.....	72
TABLA 22. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ABONOS NITROGENADOS DE LIBERACIÓN LENTA EN PROPIEDADES AGRONÓMICAS DE ESTEVIA.	74
TABLA 23. EFECTO DE LOS ABONOS NITROGENADOS DE LIBERACIÓN LENTA EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO CULTIVADO CON ESTEVIA A LOS DE 100 DÍAS DESPUÉS DEL TRASPLANTE.	75
TABLA 24. EFECTO DE ABONOS ORGÁNICOS EN LA LIXIVIACIÓN DE AMONIO, NITRATO, TOTAL AMONIACAL Y VOLUMEN LIXIVIADO TOTAL DURANTE EL PERIODO EXPERIMENTAL DE 80 (DDT) EN ALBAHACA.	78
TABLA 25. EFECTO DEL USO DE ABONOS NITROGENADOS DE LIBERACIÓN LENTA EN PROPIEDADES AGRONÓMICAS DE ALBAHACA.	79
TABLA 26. EFECTO DEL USO DE ABONOS NITROGENADOS DE LIBERACIÓN LENTA EN PROPIEDADES DEL SUELO CULTIVADO CON ALBAHACA.	81
TABLA 27. CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL SUELO USADO EN LA EXPERIMENTACIÓN, PROVENIENTE DE JUANCHITO, CANDELARIA (VALLE DEL CAUCA).....	87
TABLA 28. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LA BENTONITA UTILIZADA EN LA ELABORACIÓN DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES.	87
TABLA 29. DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS EVALUADOS EN LA FASE 1: DETERMINACIÓN DE PROPORCIONES PARA LA ELABORACIÓN DE UNA ENMIENDA ÓRGANO MINERAL.	88
TABLA 30. PROPORCIONES DE SUELO Y ENMIENDA ÓRGANO MINERAL UTILIZADAS EN LOS TRATAMIENTOS PARA ESTEVIA Y ALBAHACA.....	90
TABLA 31. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES EN PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO AL CABO DE 4 MESES.....	95
TABLA 32. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES PROPORCIONES DE UNA ENMIENDA ÓRGANO MINERAL Y DE FERTILIZANTES NITROGENADOS EN PROPIEDADES AGRONÓMICAS DE ESTEVIA.	98
TABLA 33. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES EN PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO DESPUÉS DE 96 DESPUÉS DEL TRASPLANTE DE ESTEVIA.	101

TABLA 34. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES PROPORCIONES DE UNA ENMIENDA ÓRGANO MINERAL Y DE FERTILIZANTES NITROGENADOS EN PROPIEDADES AGRONÓMICAS DE ALBAHACA.	105
TABLA 35. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ENMIENDAS ÓRGANO MINERALES EN LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO DESPUÉS DE LA COSECHA DE ALBAHACA.	107
TABLA 36. EXPERIENCIAS EN FIJACIÓN ASIMBIÓTICA DE N EN SISTEMAS PRODUCTIVOS.	115
TABLA 37. COMPOSICIÓN DEL SUSTRATO USADO PARA LA CULTIVABILIDAD DE BACTERIAS PROVENIENTES DE STARMD.	116
TABLA 38. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE CD PROVENIENTES DE STARDM EN PROPIEDADES AGRONÓMICAS DE ESTEVIA.	118
TABLA 39. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE CD PROVENIENTES DE STARDM EN PROPIEDADES DEL SUELO CULTIVADO CON ESTEVIA.	120
TABLA 40. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE CD PROVENIENTES DE LODOS RIZOSFÉRICOS DE PLANTAS USADAS EN STARDM EN PROPIEDADES AGRONÓMICAS DE ALBAHACA.	122
TABLA 41. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE CD PROVENIENTES DE STARDM EN PROPIEDADES DEL SUELO CULTIVADO CON ALBAHACA.	123
TABLA 42. NÚMERO DE ARTÍCULOS ENCONTRADOS DE ACUERDO A LAS ESTRATEGIAS PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA DE LA FN Y REDUCIR LA LIXIVIACIÓN DE NITRATOS.	128
TABLA 43. PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS DEL SUELO UTILIZADO PARA LA EXPERIMENTACIÓN.	129
TABLA 44. TRATAMIENTOS PROPUESTOS PARA LA EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA FN Y REDUCCIÓN DE LA LIXIVIACIÓN DE NITRATOS, PARA ESTEVIA Y ALBAHACA.	130
TABLA 45. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE N EN LA NL EN ESTEVIA.	132
TABLA 46. PROPIEDADES AGRONÓMICAS DE ESTEVIA OBTENIDAS CON LA COMBINACIÓN DE DIFERENTES ESTRATEGIAS.	133
TABLA 47. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE N EN LAS PROPIEDADES FINALES DEL SUELO CULTIVADO CON ESTEVIA.	135
TABLA 48. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA MEJORAR LA FN EN PROPIEDADES AGRONÓMICAS DE LA ALBAHACA.	138
TABLA 49. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE N EN PROPIEDADES DEL SUELO CULTIVADO CON ALBAHACA.	141
TABLA 50. PLAN DE MANEJO DE LA FN PARA ESTEVIA.	144
TABLA 51. PLAN DE MANEJO DE LA FN PARA ALBAHACA.	144
TABLA 52. VALORES PROMEDIO DE COEFICIENTES DE CULTIVO (Kc) POR ETAPA FENOLÓGICA PARA ESTEVIA CULTIVADA EN EL VALLE DEL CAUCA COLOMBIA.	145
TABLA 53. VALORES PROMEDIO DE COEFICIENTES DE CULTIVO (Kc) POR ETAPA FENOLÓGICA PARA ALBAHACA CULTIVADA EN EL VALLE DEL CAUCA COLOMBIA.	145
TABLA 54. PLAN DE FERTILIZACIÓN PARA LA ESTEVIA, CONSIDERANDO LOS FLL.	146
TABLA 55. PLAN DE FERTILIZACIÓN PARA LA ALBAHACA, CONSIDERANDO LOS FLL.	147
TABLA 56. CUADRO COMPARATIVO DE COSTOS ENTRE UN CULTIVO COMERCIAL Y LA PROPUESTA REALIZADA PARA ESTEVIA.	148
TABLA 57. CUADRO COMPARATIVO DE COSTOS ENTRE U CULTIVO COMERCIAL Y LA PROPUESTA REALIZADA PARA ALBAHACA.	148

LISTA DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1. BALANCE HÍDRICO	19
ECUACIÓN 2. BALANCE HÍDRICO GENERAL.....	38
ECUACIÓN 3. ECUACIÓN MODIFICADA DE PENMAN - MONTEITH.....	38
ECUACIÓN 4. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DEL CULTIVO (Kc).	39
ECUACIÓN 5. CÁLCULO DE GRADOS-DÍA POR EL MÉTODO DEL SENO SIMPLE.	39
ECUACIÓN 6. CÁLCULO DEL VOLUMEN DE RIEGO.....	53
ECUACIÓN 7. CÁLCULO DEL VOLUMEN DE APLICACIÓN DE CD.....	117

RESUMEN

Esta tesis doctoral tuvo como objetivo proponer un plan de manejo integral para la optimización de la fertilización nitrogenada (FN) en plantas aromáticas para reducir la lixiviación de nitratos. El trabajo se realizó en seis etapas: 1) usando lisímetros de drenaje (LD) se determinaron curvas de la constante del cultivo (Kc). 2) se instalaron LD y se evaluaron dosis nitrogenadas (DN) usando urea como fertilizante, 3) se valoraron fertilizantes orgánicos e inorgánicos de liberación lenta (FLL) y se determinaron curvas de mineralización, 4) se evaluó una enmienda órgano-mineral y su efecto en la lixiviación de nitrógeno (N) 5) se evaluó la aplicación de consorcios diazotófos (CD) en la reducción de la DN, y 6) se evaluó un plan de manejo integral que combinó las estrategias estudiadas. Como resultados obtenidos se tienen las curvas del Kc. Se obtuvieron las DN adecuadas de fertilizante teniendo en cuenta la mejor respuesta de la planta y la menor pérdida de nitratos por lixiviación, usando fertilizantes convencionales y abonos orgánicos. Las curvas de mineralización mostraron que la época adecuada de aplicación de abonos orgánicos es antes de tres semanas al trasplante. La proporción de la enmienda órgano mineral, en relación abono: bentonita fue de 1:1; las dosis de enmienda órgano mineral con mejores resultados fueron 1,34 y 2,68 Mg·ha⁻¹. El CD logró reducir la DN en 25% para estevia y albahaca. Se presentó una propuesta de plan de manejo para mejorar la eficiencia de la FN teniendo en cuenta todas las estrategias evaluadas.

Palabras clave: Lixiviación de nitrato, constante de cultivo, eficiencia de fertilización, enmiendas órgano minerales, microorganismos diazotófos, plan de fertilización nitrogenada, ambiente.

SUMMARY

This doctoral thesis had as objective to propose an integral optimization plan of nitrogen fertilization (NF) in aromatic plants to reduce nitrates leaching. The work was realized in six stages: 1) Using curves lysimeters (LD) the curves of the crop constant (Kc) were determined. 2) LD were installed and nitrogenous doses (DN) were evaluated using urea as fertilizer. 3) Slow release both organic and inorganic fertilizers (FLL) were evaluated and their mineralization curves were determined. 4) The proportions of a organic-mineral amendment and its effect on nitrogen leaching (N). 5) The application of diazotrophic consortia (CD) in the reduction of NF was evaluated, and 6) a comprehensive management plan was proposed that combines the best results of the stages. The results obtained were: the Kc curves. The adequate DN of fertilizer was obtained taking into account the best response of the plant and the lower loss of nitrates by leaching, using conventional fertilizers and organic fertilizers. The mineralization curves detected that the adequate time of organic fertilizers application is three weeks before transplantation. The proportion of organic mineral amendment, in relation to fertilizer: bentonite, was 1: 1; The mineral organic amedment with the best results were between 2.6 and 1.3 Mg·ha⁻¹. The CD reached to reduce DN by 25% for stevia and basil. A management plan proposal was presented to improve the efficiency of the NF taking into account all the strategies.

Key words: Nitrate leaching, crop constant, efficiency of fertilization, organ-mineral amendments, diazotrophic microorganisms, plan of nitrogen fertilization, environment.

INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) es un elemento fundamental para la vida en el planeta y es requerido en grandes cantidades por lo que su disponibilidad es el factor limitante para el crecimiento vegetal en ambientes naturales y agrícolas (Kraiser *et al.*, 2011). Las plantas absorben la mayor parte del N por vía radicular del suelo y es tomado como amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-) fundamentalmente (Datnoff *et al.*, 2007). La materia orgánica del suelo (MOS) contiene cerca del 95% de N total; de este porcentaje, el 50% se encuentra en formas identificables (proteínas, aminoácidos, bases nitrogenadas) y el otro 50% en formas complejas no identificables como productos de reacción de amonio con lignina, polimerización de quinonas, condensación de azúcares y unión de proteínas con la lignina (Talbot y Traseder, 2010). El 5% de N restante es inorgánico, incluyendo los iones NH_4^+ y NO_3^- resultantes del proceso biológico de mineralización (Johnston *et al.*, 2009). A pesar de que los suelos contienen MOS estabilizada, las prácticas agrícolas inadecuadas como la labranza excesiva, las quemadas y el uso continuo de agroquímicos han reducido su contenido limitando el suministro de N para alcanzar altos rendimientos (García, 2009). Esto conlleva al uso de fertilizantes inorgánicos y abonos orgánicos como fuentes de N en cultivos, con el fin de obtener mejores cosechas (Hirel *et al.*, 2011). El desconocimiento de la dinámica del N en el suelo y de los requerimientos hídricos y nutricionales de un gran número de especies de plantas cultivables, han llevado a la aplicación de altas tasas de fertilizantes, que contaminan suelo, fuentes hídricas y generan pérdidas de biodiversidad nativa (Schimel y Bennett, 2004; Ju *et al.*, 2007; Hirel *et al.*, 2011; Zeligler, 2011), limitando la producción agropecuaria (Cárdenas *et al.*, 2010).

Para el 2016, a nivel mundial la producción de fertilizantes nitrogenados aumentó en un 2,6% con respecto al 2015, alcanzando más de 181 millones de Mg de N (FAO, 2017). Actualmente, América Latina consume el 7,6% del total de la demanda mundial de fertilizantes nitrogenados y el crecimiento anual de la demanda entre 2016 y 2020 aumentará en un 13,7% (FAO, 2017). Colombia es el segundo país de Latinoamérica con el mayor consumo de fertilizantes nitrogenados, el cual está 5,8 veces por encima de la media regional de $84,2 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ cultivable, superando a países como Chile, Brasil, México y Argentina (Sánchez *et al.*, 2013) y la producción de fertilizantes nitrogenados no está contemplada en la política nacional por sus altos costos energéticos y de infraestructura, lo que hace que sea más viable importarlos que producirlos a nivel nacional (DNP, 2009). Los países con dependencias de importación de materias primas para la elaboración y comercialización de fertilizantes son vulnerables a la fluctuación de precios. Ante esta situación, el uso de biofertilizantes (fijadoras de N y micorrizas), la estandarización en la producción de abonos orgánicos y la utilización eficiente y racional de fertilizantes inorgánicos son estrategias prioritarias que deben ser fortalecidas por los Estados.

Los fertilizantes nitrogenados han sido utilizados para incrementar las cosechas y ha llegado a representar hasta el 50% de los costos de producción (Hirel *et al.*, 2011). Los cultivos recuperan menos del 50% del N lo que genera impactos ambientales al perderse por lixiviación, erosión, volatilización y denitrificación, y aumenta los costos de producción (Galloway *et al.*, 2008; Hirel *et al.*, 2011). En Colombia, el 70% de las aplicaciones de N se pierden por lo que los gremios recomiendan que la fertilización se realice con base en análisis de suelos y foliares y en requerimientos de las plantas (DNP, 2009). En los últimos 40 años se ha aumentado en 7,4% el consumo de fertilizantes nitrogenados, mientras que las cosechas sólo han aumentado el 2,4%, indicando que la eficiencia en el uso del N ha disminuido (Hirel *et al.*, 2011). En términos globales esta eficiencia está por debajo del 15% y en la mayoría de los alimentos las concentraciones de N están por debajo de $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Antón y Lizaso, 2001). La sobrefertilización puede llevar igualmente al “consumo de lujo” o acumulación de nitratos en biomasa, llegando a ser tóxicas (Hirel *et al.*, 2011).

Los principales daños ambientales ocasionados por la FN se encuentran la contaminación de aguas subterráneas (Velazco *et al.*, 2009), la eutroficación de cuerpos de agua y en el suelo, acidificación (Divito *et al.*, 2011), inhibición de su biota (Kemmitt *et al.*, 2006; Jackson *et al.*, 2012), pérdida de la fertilidad (Hirel *et al.*, 2011) y emisión de gases efecto invernadero (Dentener *et al.*, 2006; Stuart *et al.*, 2014). También la lixiviación de nitratos y nitritos ocasionan problemas de salud a animales y humanos, al fomentar los niveles de metahemoglobina por encima del 65%, limitando el suministro de oxígeno y ocasionando la muerte, además de

formar nitrosaminas de efecto cancerígeno (Anton y Lizaso, 2001). Las emisiones de amoníaco y óxido nitroso ocasionan enfermedades pulmonares (Townsend *et al.*, 2003).

Para fijar los 40 millones de toneladas de fertilizante que anualmente se aplican, se requiere un alto consumo de energía proveniente de los combustibles fósiles (Vallejo *et al.*, 2008). Según IDAE (2007), el valor energético de síntesis necesaria para la producción de fertilizantes nitrogenados está entre 40 – 60 MJ kg⁻¹ de N y son los segundos responsables, después de la mecanización, del consumo energético de la agricultura mundial (alrededor de 45%). Aproximadamente el 45% de la dieta proteínica mundial proviene de los fertilizantes sintéticos y más de 3000 millones de personas no son capaces de sobrevivir sin incluir el proceso de Haber-Bosch (Smil, 2011), el cual consiste en la transformación del N y el oxígeno gaseosos provenientes de la atmósfera en amoníaco, con ayuda de un catalizador a base de hierro. Este proceso que fue desarrollado a comienzos del siglo XX, es llevado a cabo a temperaturas entre 400 – 600 °C y 300 atm de presión (IDEA, 2007). La producción de N ha sido esencial para soportar el aumento de la población y en muchos lugares del mundo hay déficit de fertilizantes, por lo que se busca maximizar los beneficios del N en términos de rendimiento y ganancias, reduciendo sus consecuencias negativas (Galloway *et al.*, 2008).

La contaminación del agua es preocupante a nivel mundial. El compuesto nitrogenado comúnmente encontrado en las aguas subterráneas es el nitrato por ser más estable, el cual es tóxico por encima de 50 mg·L⁻¹ expresado como NO₃⁻ (WHO, 2011); también se puede encontrar amonio (NH₄⁺), amoníaco (NH₃), nitrito (NO₂⁻), formas gaseosas disueltas como óxido nitroso y orgánicas (Arauzo y Valladolid, 2013). En suelos no contaminados, las formas orgánicas prevalecen en el agua subterránea, mientras que, en los contaminados, son las inorgánicas las predominantes (Perakis y Hedin, 2002). Una norma restrictiva basada solamente en las concentraciones de nitratos puede llegar a subestimar las cargas de N en los cuerpos de agua (Arauzo *et al.*, 2011). Las relaciones existentes entre la concentración de nitratos en aguas subterráneas y los diferentes recursos nitrogenados utilizados sobre la superficie del suelo es compleja debido a que los sistemas pueden actuar como fuentes y receptores al mismo tiempo (Jégo *et al.*, 2012).

En Colombia, la resolución 2115 del 2007 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y del Ministerio de Protección Social acepta valores máximos de 10 y 0,1 mg·L⁻¹ de nitratos y nitritos (N-NO₃ y N-NO₂) respectivamente en el agua para consumo humano. El decreto 1323 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007) creó el Sistema de Información del Recurso Hídrico que contempla consolidar un inventario y caracterización del estado y comportamiento del recurso hídrico en términos de calidad y cantidad, pero son pocos los estudios ambientales puntuales en el país que han permitido verificar las bajas eficiencias en la FN de los sistemas productivos y el impacto ambiental en las fuentes hídricas por el exceso de nitratos (Peñaloza y Chavez, 2010).

Uno de los mayores retos de los sistemas productivos agropecuarios es incrementar la toma eficiente de N, reduciendo la contaminación de fuentes hídricas por nitratos (Galloway *et al.*, 2008). Para esto se requiere de planes integrales de FN (Kraft y Stites, 2003) que incluya el manejo del agua (Cavero *et al.*, 2012), el uso adecuado de fertilizantes inorgánicos junto a los orgánicos (Andreu *et al.*, 2006), la capacidad de retención del suelo y la fijación biológica de N (FBN) (Herridge *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2014), que permita mejorar las condiciones socioeconómicas de los agricultores, dentro de un marco de sustentabilidad (Stuart *et al.*, 2014). Dentro de las prácticas más estudiadas en la FN se tienen la rotación de cultivos, uso de FLL (Smil, 2011; Xie *et al.*, 2011), uso de abonos verdes y coberturas con residuos de cosecha, labranza de conservación (Dalal *et al.*, 2011), uso de hormonas promotoras de crecimiento de raíces y mejoramiento genético de variedades eficientes en la toma de N (Hirel *et al.*, 2011), manejo de la ecología rizosférica (Jackson *et al.*, 2012) entre otras. El planteamiento en la práctica de un manejo integral de la FN no es sencillo debido a las brechas de conocimiento (Unkovich y Baldock, 2008). La aplicación de cada una de estas estrategias ha mejorado la eficiencia de la fertilización y/o reducido la lixiviación de nitratos. Pocos estudios han mostrado resultados de manejos integrados de la FN y en sistemas agrícolas de plantas aromáticas no existen tales planes.

Esta tesis doctoral investigó estrategias innovadoras que contribuyan a un manejo integral de la FN, disminuyendo las pérdidas por lixiviación y la contaminación de aguas subterráneas con nitratos. Esta investigación se llevó a cabo en estevia (*Stevia rebaudiana Bertoni*) y albahaca (*Ocimum basilicum* L.), cultivos que han ido creciendo, tanto en área sembrada como en producción en Colombia y en especial en el Valle del Cauca y que tienen potencial de exportación a mercados internacionales, pero que no cuentan con paquetes tecnológicos para su producción sostenible y competitiva (López *et al.*, 2009). Sin embargo, estas estrategias pueden ser extrapolables a cualquier sistema productivo agrícola. Se planteó como objetivo general desarrollar un plan de manejo integral para la optimización de la FN y la reducción de la lixiviación de nitratos en sistemas productivos agrícolas de plantas aromáticas de estevia (*Stevia rebaudiana B*) y albahaca (*Ocimum basilicum*). Los objetivos específicos fueron:

- ✓ Determinar las curvas experimentales del coeficiente del cultivo (Kc) para el cálculo de las láminas de riego para las diferentes etapas fenológicas de estevia (*Stevia rebaudiana B*) y albahaca (*Ocimum basilicum*), con el fin de contribuir al manejo adecuado del agua en los sistemas productivos.
- ✓ Definir un plan de FN para estevia (*Stevia rebaudiana B*) y albahaca (*Ocimum basilicum*) teniendo en cuenta la aplicación de abonos de liberación lenta.
- ✓ Elaborar una enmienda edáfica órgano-mineral a partir de abonos orgánicos y minerales de arcilla, con el fin de aumentar la retención de N amoniacal y disminuir la lixiviación de nitratos.
- ✓ Evaluar el uso potencial de bacterias fijadoras de N provenientes de STARDM, en la reducción de la FN de sistemas productivos de estevia (*Stevia rebaudiana B*) y albahaca (*Ocimum basilicum*).
- ✓ Proponer un plan de manejo integral para la optimización de la FN y la reducción de lixiviación de nitratos en los sistemas productivos estudiados, de acuerdo a los mejores resultados obtenidos en las estrategias propuestas.

Este documento está estructurado en siete capítulos. El primer capítulo hace referencia a las bases conceptuales necesarias para comprender los capítulos posteriores de la investigación. Todo lo relacionado con el manejo del agua y la determinación de las curvas de las (Kc) para estevia y albahaca se encuentran en el capítulo dos. En este capítulo se describe el procedimiento realizado para la determinación del Kc y los resultados del manejo del agua en los dos cultivos, en cada etapa fenológica, en condiciones de campo. En el capítulo tres se encuentra el estudio relacionado con la FN en estevia y albahaca. Se describe los materiales y métodos utilizados durante la etapa experimental. En la primera parte de este capítulo se presenta una evaluación de diferentes DN, utilizando como fuente la urea y se muestran los resultados del estudio de lixiviación, respuestas agronómicas y evaluación de algunas propiedades en el suelo después de su aplicación. También se presentan los índices de eficiencia de la FN y de productividad del agua. Debido a que se trabajó con abonos orgánicos, se presentan los resultados del estudio sobre la mineralización del N, tanto para la gallinaza como para el lombricompost, en tres dosis. En la segunda parte del capítulo, se muestran los resultados de la evaluación de diferentes tipos de abonos y dosis, incluyendo los FLL en las mismas variables anteriores.

La evaluación de una enmienda órgano mineral en cultivos de estevia y albahaca se presenta en el capítulo cuatro. La investigación se realizó en dos fases. En la primera se evaluaron proporciones de abono orgánico y montmorillonita (bentonita) y dosis a aplicar, para evaluar y seleccionar la mejor proporción y dosis, que reduzca la lixiviación del N. Los abonos orgánicos empleados fueron lombricompost y gallinaza, por ser de fácil adquisición, relativamente económicos y los más empleados en la agricultura. En la segunda fase, se evaluaron diferentes dosis de aplicación de la enmienda para ambos cultivos, considerando características agronómicas y edáficas, así como las eficiencias de la FN. En el capítulo cinco se muestran la descripción de la metodología y los resultados de la aplicación de CD provenientes de STARDM en las propiedades agronómicas de la estevia y de la albahaca, así como en las condiciones finales del suelo. La evaluación de las diferentes estrategias usadas en conjunto en esta investigación para ambos cultivos se muestra en el capítulo seis. Se evaluó su efecto en NL, en las propiedades agronómicas de las plantas y en las propiedades del suelo después de la cosecha. Por último, en el capítulo siete se muestran las consideraciones finales de todo el trabajo de investigación, así como algunas recomendaciones pertinentes a la experiencia investigativa y para futuras líneas de investigación.

1. MARCO CONCEPTUAL

En el presente capítulo se presentarán algunas bases conceptuales que permitirán al lector tener un mejor marco de referencia para entender los capítulos posteriores. En primer lugar, se presentan conceptos relacionados con el manejo del recurso hídrico en los cultivos y se resalta la importancia de la constante del cultivo (K_c) para la determinación de sus necesidades hídricas y de la eficiencia del uso del agua. Es importante mostrar el ciclo del N en los sistemas productivos y la importancia de este N en la nutrición vegetal, así como los diferentes tipos de fertilizantes nitrogenados usados en la agricultura e índices para medir la eficiencia de utilización. Se resalta el papel de la fijación asimbiótica del N como estrategia para reducir las aplicaciones de fertilizantes. También se encontrarán conceptos relaciones con los coloides del suelo, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la influencia de las enmiendas órgano minerales. La lixiviación del N proveniente de los sistemas productivos agrícolas también es discutida. Por último, se muestra un panorama muy general de la producción de estevia y albahaca.

1.1. MANEJO DEL AGUA EN LOS CULTIVOS

Las aplicaciones hídricas excesivas conducen a la pérdida del N disponible proveniente de abonos orgánicos e inorgánicos y a la contaminación de aguas subterráneas. Es importante suministrar la lámina correcta de agua de acuerdo a las necesidades hídricas del cultivo (Gholamhoseini *et al.*, 2013). Para lograr realizar una adecuada irrigación, es importante conocer las condiciones climáticas de la región donde se desarrolla el cultivo, las propiedades del suelo (Di Paolo y Rinaldi, 2008) así como las características propias de absorción de agua por parte de la planta durante sus fases fenológicas, es decir, el conocimiento de los K_c (Allen *et al.*, 2006).

El requerimiento hídrico o necesidades de agua de los cultivos hacen referencia a la cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evaporación y transpiración de las plantas (evapotranspiración ET). La necesidad de riego, hace referencia a la diferencia entre la necesidad de agua del cultivo y la precipitación efectiva. Dentro de esta lámina de riego calculada se incluye el agua necesaria para el lavado de sales y para compensar la falta de uniformidad o eficiencia en su aplicación.

En el momento de la siembra, casi el 100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la ET ocurre como transpiración (Allen *et al.*, 2006). Hay diversos factores que influyen en la ET de un cultivo: tipo de suelo, nivel de humedad, prácticas culturales y variedad y el clima. El conocimiento de la ET es importante para el manejo del riego, y por tanto, para el ahorro de agua e incremento del rendimiento de los cultivos; así mismo el principal factor para un riego eficiente es la estimación exacta de la ET en un rango de más o menos 10% de los requerimientos de agua verdaderos, lo cual es suficiente para el agricultor. El concepto de ET incluye tres diferentes definiciones: ET del cultivo de referencia (E_{To}), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (E_{Tc}), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($E_{Tc\ aj}$). La Figura 1 muestra la relación de estos tres conceptos.

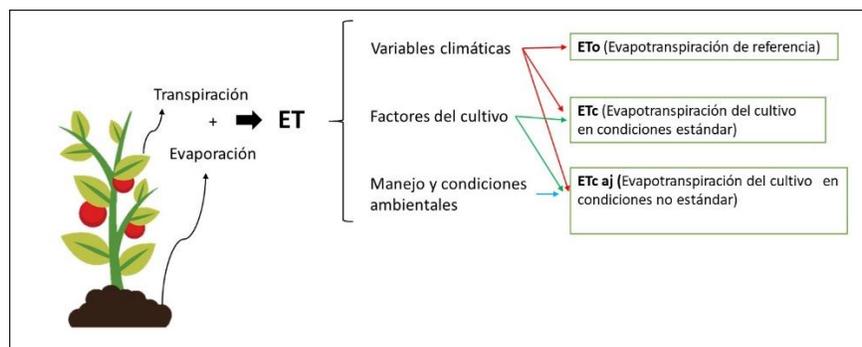


Figura 1. Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos relacionados de ET.
Fuente: Adaptado de Allen *et al.* (2006).

1.1.1. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o)

La tasa de evapotranspiración de una superficie conocida, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o). Al relacionar la ET a una superficie específica, permite contar con una referencia a la cual se puede enlazar la ET de otras superficies; además, se elimina la necesidad de definir un nivel de ET para cada cultivo y periodo de crecimiento. Se pueden comparar valores medidos o estimados de ET_o en diferentes localidades o en diferentes épocas del año, debido a que se hace alusión a ET bajo la misma superficie de referencia (Allen *et al.*, 2006). El cultivo de referencia es un cultivo hipotético, con altura fija de 0.12 m, albedo igual a 0.23 y resistencia de la cobertura al transporte del vapor del agua igual a 69 s·m⁻¹; esta situación representa la ET de un gramado verde, de altura uniforme, en crecimiento activo, cubriendo totalmente la superficie del suelo y sin restricción de humedad

Los únicos factores que afectan ET_o son los parámetros climáticos. Por lo tanto, ET_o es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. ET_o expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo. El método FAO Penman-Monteith es el recomendado para la determinación de ET_o con parámetros climáticos. Este método ha sido seleccionado debido a que aproxima de una manera cercana la ET_o de cualquier localidad evaluada, tiene bases físicas sólidas e incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos. Además, se han desarrollado procedimientos para la estimación de los parámetros climáticos faltantes. Debido a que todavía existe una considerable falta de información para los diferentes cultivos, el método de Penman-Monteith se utiliza solo para la estimación de la tasa de evapotranspiración del cultivo estándar de referencia (ET_o).

1.1.2. Evapotranspiración del cultivo (ET_c)

Hace referencia a la evapotranspiración de un cultivo en condiciones estándar, que se desarrolla libre de enfermedades, óptima fertilización y buenas condiciones de humedad en el suelo. Diversos métodos se han propuesto para la determinación de la ET_c, como los balances hídricos y los lisímetros de drenaje (LD) y como método indirecto mediante la estimación de la ET_o y el K_c.

Un lisímetro es un recipiente que encierra una determinada porción de suelo con superficie desnuda o con una cubierta vegetal, ubicado en campo para presentar condiciones naturales y que se utiliza para determinar la ET de un cultivo en crecimiento, de una cubierta vegetal de referencia, o la evaporación de un suelo desnudo (Bochetti, 2010). Los lisímetros están divididos en dos grandes grupos: de pesada y de drenaje; dentro de los de drenaje se pueden encontrar con o sin succión, la diferencia entre estos es que los de drenaje sin succión recolectan el agua que se mueve por efecto de la gravedad y en los LD con succión se aplica una succión para extraer despacio, el agua del suelo a través de un material poroso. La diferencia entre ambos lisímetros es que los de drenaje miden la evapotranspiración de forma indirecta, resolviendo la ecuación de balance del suelo, mientras que en los de pesada, la evaporación se mide directamente, como la pérdida de agua y según la exactitud de la balanza puede dar precisiones de hasta 0,1 mm (Bochetti, 2010). En los LD, la ET_c se despeja de la ecuación 1 de balance hídrico.

Ecuación 1. Balance hídrico

$$P = ET_c + I + \Delta H$$

Donde P = precipitación; ET_c= evapotranspiración del cultivo; I= infiltración; ΔH= cambio en la humedad del suelo. Para calcular ΔH, normalmente se determina la curva de retención de humedad del suelo y a partir de ahí, se calcula la lámina de agua equivalente expresada en mm.

1.1.3. Evapotranspiración del cultivo ajustada (ETc aj)

Cuando las condiciones reales de campo son diferentes de las condiciones estándar, es necesario realizar un ajuste a esa ET. Presencia de enfermedades, deficiente fertilización, encharcamientos o sequías excesivas y salinidad merecen atención especial, pues las demandas hídricas no son iguales, se presenta menor crecimiento y menor densidad de plantas, por lo tanto, es necesario ajustar los valores de la ETc, pues la tasa de evapotranspiración será más baja, obteniendo la ETc aj (Allen *et al.*, 2006).

1.1.4. Coeficiente único del cultivo (Kc)

El Kc integra las diferencias en la evaporación en el suelo y en la tasa de transpiración del cultivo, entre el cultivo y la superficie del pasto de referencia. Como la evaporación en el suelo puede fluctuar diariamente, resultado de la lluvia o el riego, el coeficiente único del cultivo es solamente una expresión de los efectos promedios en el tiempo (múltiples días) de la ETc. Por lo tanto, el Kc es igual a la relación entre la evapotranspiración del cultivo y la evapotranspiración de referencia ($Kc = ETc / ET_0$) (Allen *et al.*, 2006).

Debido a la variación en las características fisiológicas y morfológicas del cultivo, el Kc cambia desde la siembra hasta la cosecha como lo muestra la Figura 2. Pocos días después de la siembra o de la aparición de hojas nuevas el valor de Kc generalmente es menor a 0,4. A medida que la planta crece y se desarrolla, su demanda hídrica aumenta y por tanto el valor de Kc también hasta alcanzar un máximo. A medida que la planta comienza a envejecer y las hojas viejas a caer, el Kc también disminuye hasta alcanzar un valor mínimo al final de la temporada de crecimiento.

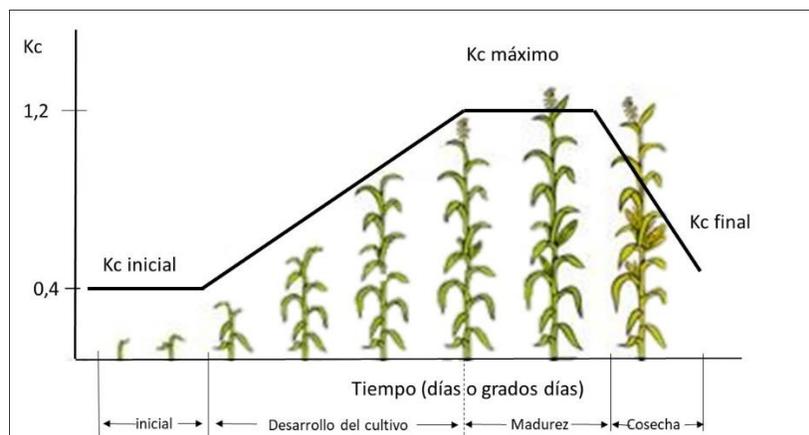


Figura 2. Curva generalizada del coeficiente de un cultivo
Fuente: Adaptado de Allen *et al.*, (2006).

1.1.5. Eficiencia del uso del agua

Con recursos hídricos cada vez menos disponibles, su eficiencia de uso ha cobrado gran importancia en los últimos años. La eficiencia del uso del agua se expresa a través del indicador denominado “productividad del agua”, el cual hace referencia a la producción de un cultivo con relación al agua total consumida (Xue *et al.*, 2017). La productividad del agua también se puede definir con la escala de estudio. A escala de invernadero y parcela, la productividad del agua es calculada a partir de la producción del cultivo y la ET del lugar, mientras que a escala regional se considera el total de agua consumida, teniendo en cuenta la recarga y los aportes por precipitación utilizada para conseguir una determinada cosecha (Sun *et al.*, 2017).

La productividad del agua está relacionada con prácticas directas como cosecha de agua, riego suplementario, riego de déficit, técnicas de precisión del riego y prácticas de conservación de agua y suelo (Dar *et al.*, 2017),

y con otras indirectas como la fertilidad del suelo, el control de plagas y enfermedades, manejo de fertilizantes, selección de cultivos y acceso a mejores mercados (Molden *et al.*, 2010; Sun *et al.*, 2017).

1.2. EL CICLO DEL NITRÓGENO (N)

El ciclo del N es el más complejo dentro de la naturaleza debido a que intervienen gran cantidad de recursos y organismos y es dinámico (NADP, 2000). La Figura 3 muestra el ciclo del N en sistemas terrestres donde se puede observar las diferentes ganancias, pérdidas y componentes (pools) que tienen lugar en el sistema suelo. El gran pool de N en la naturaleza se encuentra en la atmósfera, constituyendo alrededor del 70% de su composición (Pereyra, 2001). Existen varias vías por las cuales el N puede pasar al suelo (ganancias): a través de las tormentas eléctricas, por los desechos de animales y del hombre, por fijación biológica e industrial y a través de los residuos vegetales (Pacheco *et al.*, 2002). La fuente principal de N para la mayoría de plantas y microorganismos es la MOS, y en promedio, el 50% de estos compuestos orgánicos se encuentran en solución (Chen y Xu, 2006).

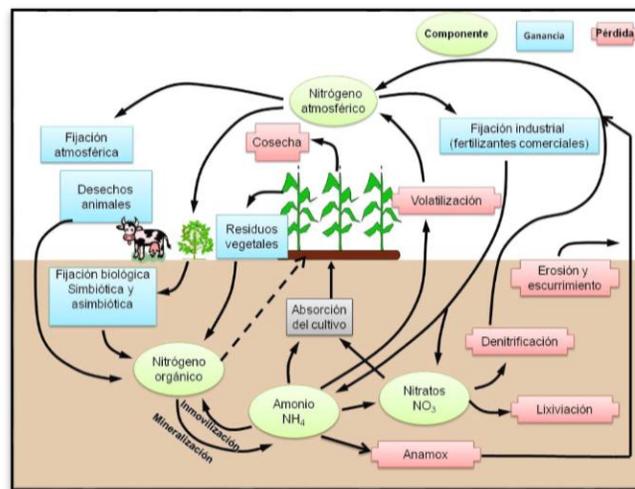


Figura 3. El ciclo del N en sistemas terrestres.
Adaptado de Thomason (2012)

En un sistema con mínima intervención antrópica, el reciclaje de N es perfecto y no se necesitan fuentes externas. Pero cuando se establecen sistemas productivos, este ciclo se rompe y comienza el déficit de N que, sumado a malas prácticas agrícolas como quemas, uso indiscriminado de fitosanitarios, han llevado a la reducción de los niveles de MOS y por ende de N, y se hace necesario la introducción de fertilizantes (Tartowski y Howarth, 2013).

En este ciclo también ocurren transformaciones dentro del sistema suelo, siendo el proceso de mineralización el más destacado, el cual hace referencia al proceso biológico por el cual el N orgánico se transforma en formas inorgánicas y comprende básicamente tres etapas: aminificación, amonificación y nitrificación. En la primera etapa el N que hace parte de moléculas orgánicas complejas como las proteínas, sufren un proceso de degradación hidrolítica, transformándose principalmente en aminas y aminoácidos simples con alta liberación de energía.

En la amonificación, las aminas y aminoácidos se transforman por acción de la actividad microbiana en moléculas orgánicas carboxílicas y liberación de compuestos amoniacaes que pueden llegar a la atmósfera. Sin embargo, dada la porosidad y tortuosidad del suelo, dicho amoniaco no se pierde completamente y puede entrar a reaccionar con el ácido carbónico proveniente del CO₂ de la respiración microbiana y el agua del suelo y transformarse en amonio (NH₄⁺), una de las formas químicas del N que puede ser asimilada por plantas y microorganismos (Yang *et al.*, 2017). Cabe resaltar que el amonio es el punto final de la degradación de las

proteínas y, a su vez, es utilizado por los organismos para la síntesis celular. Si en el sustrato orgánico existe más N del requerido para la nutrición de los organismos, el exceso se libera como un producto de excreción; si, por el contrario, el N es insuficiente, los organismos tomarán el N mineral del suelo, fenómeno que se conoce como inmovilización (Hodge *et al.*, 2000). Esta etapa de la mineralización es considerada como la reguladora de la disponibilidad de N para las plantas, al encontrarse una correlación positiva entre la tasa de mineralización y el contenido de N total en el suelo (NTS) (Yang *et al.*, 2017).

Este proceso de amonificación está determinado por las condiciones de pH, humedad, aireación, temperatura, contenido de nutrientes, contenido de MOS, la relación C/N y el NTS. Estos dos últimos factores son los más importantes para definir la prevalencia de la mineralización o de la inmovilización, en donde el equilibrio se encuentra a una relación C/N alrededor de 35/1 (Yang *et al.*, 2017). El amonio puede tomar varias rutas: puede ser absorbido por plantas o por los microorganismos; también puede ser retenido por los coloides del suelo, especialmente los orgánicos (Zhu y Wang, 2011), puede ser fijado por arcillas expansivas como las de tipo vermiculitas, puede sufrir oxidación anaeróbica (anammox por sus siglas en inglés) por cuenta de organismos anaeróbicos ó puede seguir el proceso de nitrificación.

En la nitrificación, el amonio (NH_4^+) se transforma por un proceso oxidativo con ayuda de bacterias del género *nitrosomonas spp* en nitritos (NO_2^-), forma química transitoria que se encuentra en bajos contenidos en el suelo para continuar su proceso oxidativo a formas nítricas (NO_3^-), llevado a cabo por bacterias del género *nitrobacter spp*. Estas bacterias son microorganismos quimiolitotróficos del suelo, capaces de usar el carbono inorgánico y obtener su energía de compuestos nitrogenados inorgánicos (Hodge *et al.*, 2000). Paralelamente, el nitrato también puede ser producido a partir de compuestos orgánicos sin pasar por el proceso de amonificación, proceso llevado a cabo por bacterias heterotróficas y hongos especializados que se encuentran principalmente en suelos ácidos (Hodge *et al.*, 2000). Esta forma química es la más estable de las estructuras oxidadas del N y es la más apetecida por plantas y microorganismos para la síntesis de las proteínas (Antón y Lizaso, 2001) cuando se encuentran en pH cercanos a la neutralidad (Wong *et al.*, 2008). La nitrificación contribuye a la pérdida potencial de N de los ecosistemas por su alta susceptibilidad a perderse por lixiviación como NO_3^- , al no poder ser adsorbido totalmente por el suelo con predominio de intercambio catiónico, contaminando aguas subterráneas (Reynolds *et al.*, 2006) o por volatilización como N_2O y N_2 vía desnitrificación (Yang *et al.*, 2017). Además, puede ser absorbido por plantas y microorganismos y su acumulación puede acidificar el suelo e inhibir la actividad microbiana.

En resumen, las pérdidas de N del suelo se dan principalmente por lixiviación en formas nítricas, volatilización en formas amoniacaes, desnitrificación con pérdidas de N gaseoso en formas amoniacaes, óxidos nitrosos ó N elemental (Cavero *et al.*, 2003), volatilización por oxidación anaeróbica del amonio (anammox) (Humbert, 2011) escurrimiento y erosión (Hirel *et al.*, 2011) o simplemente en la cosecha cuando es sacado del sistema.

1.3. EL NITRÓGENO EN LA PLANTA Y LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA

El N es considerado como un macronutriente para las plantas debido a que es necesitado en cantidades altas y además cumple funciones vitales (Hirel *et al.*, 2011). El N participa en la síntesis de aminoácidos y enzimas, que a su vez hacen parte de estructuras más complejas como las proteínas. También forma parte de cromosomas y participa en la división celular, siendo indispensable para el crecimiento vegetal y la elongación de raíces. Así mismo, es constituyente de vitaminas, de la clorofila, facilita la absorción del P, aumenta la producción de biomasa y es primordial en la cantidad y calidad de las cosechas. Su contenido en la mayoría de plantas está entre 1% y 5% (Stark y Richards, 2008).

Los nuevos modelos conceptuales de la toma de N por parte de plantas y microorganismos siguen dos rutas fundamentales: la ruta de mineralización – inmovilización y la ruta directa de toma de moléculas orgánicas de bajo peso molecular; ambas rutas están en función de la disponibilidad de N, C y energía (Figura 4). Cuando las concentraciones en el suelo son altas y prevalece procesos de mineralización ($\text{C/N} < 20$), dominará la primera ruta, siempre y cuando en el medio exista fuentes de carbono como los carbohidratos. Si, por el

contrario, los niveles de amonio son bajos y prevalece la inmovilización (C/N > 40), la ruta directa será la dominante y la fuente de energía y carbón procederá de aminoácidos y aminoazúcares (Geisseler *et al.*, 2010).

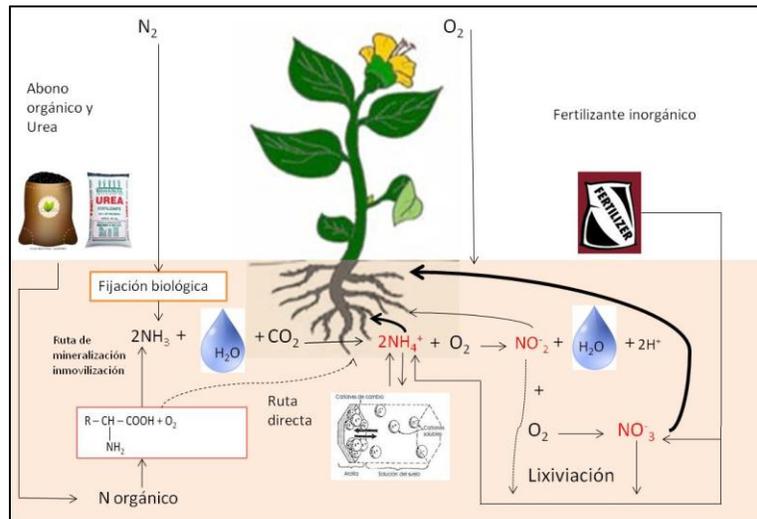
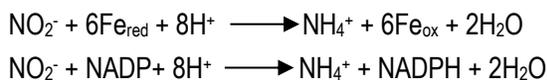


Figura 4. Rutas de toma del N por las plantas.
Elaboración propia.

La asimilación del amonio por parte de microorganismos y plantas, se realiza especialmente en suelos ácidos con ayuda de la enzima glutamina sintetasa o glutamato sintetasa, las cuales pueden ser reprimidas por la presencia de altas concentraciones de amonio en el suelo (Hirel *et al.*, 2011), mientras que la asimilación del nitrato es realizado por transportadores específicos de la célula, donde la nitrato reductasa y la nitrito reductasa realizan su reducción y se presentan cuando los niveles de amonio son bajos (Geisseler *et al.*, 2010). La reacción catalizada por el nitrato reductasa está dada por (Pereyra, 2001):



El nitrito generado es altamente reactivo y potencialmente tóxico, por lo que las células vegetales lo transportan del citoplasma a los cloroplastos en las hojas y a los plástidos en las raíces para su transformación a amonio con la siguiente reacción:



Donde Fd es ferredoxina reducida y oxidada respectivamente. NADP es la coenzima oxirreductora nicotinamida-adenina-dinucleótido-fosfato. NADPH es la coenzima NADP reducida.

Kraiser *et al.* (2011) han estudiado los sistemas de absorción de N e indicaron que, dentro de los sistemas autónomos a través del tiempo, las plantas han desarrollado mecanismos de adaptación ante condiciones ambientales de escasez, como por ejemplo la modulación de la arquitectura radical de la planta que desarrolla raíces laterales hacia donde se encuentra la mayor concentración de N. Sin embargo, tanto los sistemas autónomos como los asociativos con los microorganismos del suelo son fundamentales para la absorción del N.

Dadas las importantes funciones que cumple el N en la planta y los niveles bajos de N inorgánico que hay en la mayoría de los suelos, es necesaria la aplicación de fertilizantes nitrogenados para obtener altos rendimientos y buena calidad de cosecha. Esto implica la selección correcta de fuentes, dosis, épocas y métodos de aplicación (Roy *et al.*, 2006), lo que no siempre es fácil de determinar, debido a la alta variabilidad de suelos, clima y cultivos que no permite la generalización (Delin *et al.*, 2005). Dentro de los fertilizantes nitrogenados más

utilizados en la agricultura se tienen los de tipo nítrico y los de tipo amoniacal, provenientes en su gran mayoría de la fijación industrial del N y la correspondiente transformación a NH₃ con ayuda de un catalizador a base de hierro, proceso conocido como de Haber – Bosch, el cual fue desarrollado a comienzos del siglo XX (Giddey *et al.*, 2013) que ha permitido alimentar a más de la mitad de la población mundial (Hirel *et al.*, 2011).

Los fertilizantes que suministran el N en forma de nitrato tienen la ventaja de brindar el N rápidamente asimilable a las plantas, pero la desventaja de tener alta probabilidad de perderse por lixiviación, especialmente en zonas que presentan suelos livianos, altas precipitaciones o que utilizan inadecuadas láminas de riego, dada la baja retención de la mayoría de los suelos, contaminando aguas subterráneas (FAO, 2002). Las formas amoniacales deben pasar por el proceso biológico de nitrificación, hasta llegar a nitrato. Sin embargo, el amonio al ser un catión, puede ser retenido por el complejo de cambio negativo del suelo evitando su pérdida (Fuentes y González, 2007). Los diferentes tipos de fertilizantes nitrogenados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipo de fertilizantes nitrogenados.

Categoría	subcategoría	Ejemplos
Simples	Nítricos	Nitrato de calcio, Nitrato de potasio, Nitrato de amonio
	Amoniacales	Sulfato de amonio, fosfato de amonio
	Amidicos	urea
Compuestos	Binarios	Fosfato monoamónico
	Terminarios	NPK (15-15-15, 10-30-10)
Liberación lenta o controlada	Orgánicos	Lombricompost, gallinaza, conejaza
	Recubiertos	Urea acidulada
	De baja solubilidad	Urea formaldehído, isobutil aldehído y crotoaldehídos
	Inhibidores de actividad microbiana	Inhibidores de la enzima ureasa

Fuente: Modificado de Azeem *et al.*, (2014).

Los FLL contienen el N en formas que demoran significativamente más tiempo su disponibilidad para la planta que un fertilizante común (FAO, 2002). Estos fertilizantes presentan ventajas con respecto a las fuentes tradicionales como reducción de pérdidas de NL, flujo constante y sostenido de N en la interfase suelo – raíz, menor efecto salino, eliminación de la necesidad del fraccionamiento de la fertilización. Los FLL pueden ser de tres tipos: productos recubiertos, productos de baja solubilidad y productos que controlan la actividad microbiana, siendo estos últimos los menos convenientes si se quiere acompañar con organismos vivos como bacterias diazótroficas y micorrizas. En el primer tipo, las formas activas están envueltas en un material que se disuelve poco a poco con la humedad del suelo. En el segundo grupo se encuentran los fertilizantes estabilizados, también conocidos como de liberación controlada donde las formas químicas de N son unidas a polímeros que disminuyen su solubilidad liberando el N en forma amoniacal; estos fertilizantes hacen aportes constantes de N y su transformación total se produce en un periodo de seis meses (Azeem *et al.*, 2014). En el tercer grupo están aquellos denominados también fertilizantes estabilizados, cuyas formas químicas van acompañados de inhibidores de procesos de transformación de N en el suelo (IDAE, 2007).

Los abonos orgánicos han sido también considerados como FLL, debido a que una parte del N aportado es orgánica (Peñaloza y Chavez, 2010), la cual es mineralizada gradualmente, gracias a la actividad microbiana del suelo, a formas nítricas, que al igual que los fertilizantes de síntesis, pueden llegar a contaminar las aguas subterráneas (Andreu *et al.*, 2006).

En Colombia, las fuentes simples y compuestas son las más comúnmente usadas (DANE, 2017). Estos fertilizantes se caracterizan porque brindan formas de N de fácil absorción para las plantas, pero a su vez son de muy alto riesgo para su lixiviación. El FLL más utilizado es la urea recubierta de azufre que es de relativo bajo costo, está cubierta por una capa azufrada y libera lenta pero irregularmente el N, no es tóxica ni genera contaminación, pero tiene como desventajas, su sensibilidad a la luz y el calor, delicada para su manipulación, pobre sellado y es afectada por las propiedades del suelo (Naz y Sulaiman, 2016). Los abonos orgánicos se vienen produciendo de forma artesanal, elaborados en fincas con conocimientos empíricos y comercial, siendo

la gallinaza compostada el principal abono comercializado (DNP, 2009), con una producción de 1873000 ton/año para el 2014 (DANE, 2015). La dinámica de producción y mercadeo de abonos orgánicos aun es incipiente, y se necesita la participación del Estado, de la comunidad y de la empresa privada para dinamizar su mercadeo (Sánchez, 2017).

1.3.1. Eficiencia de la Fertilización Nitrogenada

La aplicación de fertilizantes nitrogenados ha contribuido a aumentar y mejorar la calidad de las cosechas y responder a la demanda mundial de alimentos. Sin embargo, el desequilibrio producido por la deficiente o excesiva aplicación de los fertilizantes es preocupante, especialmente en los países en vía de desarrollo (Dobermann, 2007). En este sentido, se necesitan estrategias que produzcan rendimientos más altos, que integren la conciencia ambiental y la rentabilidad del agricultor (Steward, 2007). Se necesita un manejo eficiente de los nutrientes, para lo cual se hace necesario desarrollar indicadores para medir dicha eficiencia. La Tabla 2 resume los indicadores de eficiencia más utilizados en la agricultura.

Tabla 2. Índices de eficiencia del uso de nutrientes utilizados en agronomía

Símbolo	Nombre	Cálculo	Interpretación	Valor en cereales
ER	Eficiencia aparente de recuperación	$RE = (U - U_0)/F$	Depende de la congruencia entre la demanda del cultivo y la liberación del nutriente desde el fertilizante. Es afectada por el método de aplicación y factores del cultivo	0,3 – 0,5 $kg \cdot kg^{-1}$
EF	Eficiencia fisiológica	$PE = (Y - Y_0)/(U - U_0)$	Depende de la habilidad de las plantas para convertir el nutriente adquirido en cosecha. Depende del genotipo, ambiente y manejo. Bajo EF sugiere crecimiento por debajo del óptimo debido a deficiencia nutricional, estrés hídrico, enfermedades, etc	40 – 60 $kg \cdot kg^{-1}$
EI	Eficiencia interna de utilización	$EI = Y/U$	Depende de la habilidad de las plantas para convertir el nutriente adquirido en cosecha. Depende del genotipo, ambiente y manejo. Muy alta EI sugiere deficiencia del nutriente. Muy baja EI sugiere pobre conversión del nutriente en la planta debido a estrés	30 – 90 $kg \cdot kg^{-1}$
EA	Eficiencia agronómica	$EA = (Y - Y_0)/F$	Depende de las prácticas de manejo	10-30 $kg \cdot kg^{-1}$

Fuente: Dobermann (2007). F= cantidad de nutriente aplicado ($kg \cdot ha^{-1}$); Y= rendimiento con aplicación de nutrientes ($kg \cdot ha^{-1}$); Y_0 = rendimiento sin aplicación del nutriente ($kg \cdot ha^{-1}$); U= Absorción del nutriente por la biomasa en madurez fisiológica de plantas fertilizadas ($kg \cdot ha^{-1}$); U_0 = Absorción del nutriente por la biomasa en madurez fisiológica de plantas no fertilizadas.

1.4. FIJACIÓN BIOLÓGICA DEL NITROGENO (FBN)

La FBN es una alternativa para incorporar N en el ecosistema (IDAE, 2007). Se define como la conversión del N atmosférico en N orgánico, mediante la acción exclusiva de microorganismos procariotas, en presencia del complejo enzimático de la nitrogenasa (Blasco y Burbano, 2015). Los microorganismos diazotófos son capaces de utilizar el N_2 atmosférico y transformarlo en amoníaco (NH_3), para continuar con el proceso de mineralización en el suelo. Las bacterias diazotróficas pueden promover de forma directa el crecimiento de la planta, puesto que favorece la solubilización de minerales y la producción de fitohormonas (Cassan y Díaz, 2016), además de protección contra fitopatógenos (Hernández *et al.*, 2014) y protección de las plantas contra situaciones de estrés como salinidad o presencia de compuestos tóxicos (Cassan y Díaz, 2016). Existen en la naturaleza tres sistemas de FBN: asociados a una planta, en simbiosis ó en forma libre (Orozco, 1999). La Tabla 3 muestra ejemplos de bacterias fijadoras que con mayor frecuencia se encuentran en el suelo.

A nivel global del total del N fijado, el 49% corresponden a fijación natural (FBN en suelos y océanos y por rayos) y aproximadamente el 51% corresponde a la fijada industrialmente por el hombre (Fowler *et al.*, 2013). La FBN a nivel mundial fija entre de 175 Tg·año⁻¹ de N (Blasco y Burbano, 2015). Las bacterias de vida libre pueden fijar entre 0,1 y 25 $kg \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$, las asociativas entre 12 y 84 $kg \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ y las simbióticas entre 35 y 600 $kg \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ (Osorio, 2014).

Tabla 3. Organismos y sistemas de FBN más comunes en el suelo.

Forma de FBN	Organismo fijador	Fuente de C y energía	Planta simbiote o asociada
Aeróbica libre	<i>Azotobacter, Derxia, beijerinckia</i>	MOS	
Microaerófila libre	<i>Frankia, Azospirillum</i>	MOS	
Asociada a raíz	<i>Azospirillum</i>	Exudados radicales	Gramíneas y algunas angiospermas
parasimbiótica	<i>Herbaspirillum sp; acetobacter sp</i>	fotosintatos	Cereales, caña de azúcar, batata, sorgo
simbiótica	<i>Frankia, rhizobium, Anabaena</i>	fotosintatos	leguminosas

Fuente: Orozco, (1999)

La FBN puede ser llevada a cabo gracias a la acción del complejo enzimático de la nitrogenasa, el cual consta de dos proteínas: la dinitrogenasa y dinitrogenasa reductasa. En la dinitrogenasa, el hierro y el molibdeno hacen parte del cofactor FeMo-co (MoFe_7S_8 homocitrato) cuya función principal es catalizar la reducción del N elemental. La dinitrogenasa reductasa es una proteína férrica, muy sensible al oxígeno, que se encarga de catalizar la reducción de la dinitrogenasa (Blasco y Burbano, 2015).

La FBN es un proceso reductor, endotérmico y el O_2 inhibe la actividad de la dinitrogenasa reductasa; esta tensión de O_2 debe estar entre 20 y 60 kPa para que se presente la actividad fijadora. Por lo tanto, las bacterias aerobias fijadoras de N deben desarrollar mecanismos que le permitan proteger la enzima a través de la inactivación del O_2 (Rascio y La Rocca, 2013). Dentro de estos mecanismos están:

- Eliminación rápida del O_2 por respiración.
- Producción de capas mucosas que restringen el paso del O_2 .
- Compartimentación de nitrogenasa en células especiales denominadas heterocistos o heteroquistes.
- Protección conformacional o formación de complejos con proteínas específicas, como la hemoglobina.

En hábitats con limitación de molibdeno, se forman las nitrogenasas alternativas en donde se utiliza el vanadio o el hierro para formar el cofactor y asegurar la continuidad en el proceso de FBN. La siguiente reacción química global muestra la FBN y la actividad de la nitrogenasa (Osorio, 2014):



La nitrogenasa también se ve regulada transcripcionalmente por el exceso de NH_3 , NO_3^- y aminoácidos, encontrando que los microorganismos evitan el alto costo de síntesis y operación enzimática cuando existe suficiente N disponible (Sánchez *et al.*, 2006). El NH_3 producido por la nitrogenasa no reprime la síntesis de la enzima, porque esta forma química se incorpora rápidamente a formas orgánicas usadas en la biosíntesis. Sin embargo, un exceso de NH_3 puede llegar a inhibir la producción de la enzima como mecanismo para ahorrar ATP (Madigan *et al.*, 2003). De acuerdo con Blasco y Burbano (2015), el exceso de amoníaco reprime la expresión de los genes *nif* encargados de codificar las proteínas responsables de la FBN. La FBN gasta considerable energía, puesto que los microorganismos deben disponer de un suministro rápido de electrones para que se produzca una FBN significativa. En condiciones naturales este consumo de energía puede variar entre 4 y 30 ATPs (Osorio, 2014).

Algunos factores que inciden negativamente en la FBN son: bajo nivel de fertilidad del suelo, bajo pH, bajas temperaturas y altos niveles de N. A pesar de que las bacterias fijadoras pueden garantizar el suministro de N para su crecimiento, es necesario que exista en el suelo un nivel bajo de N, para permitir el inicio exitoso de la FBN (McKenzie *et al.*, 2007).

La FBN ha sido ampliamente investigada en el mundo, en especial, la fijación simbiótica entre las plantas de tipo leguminosa y la bacteria *Rhizobium* (Divito y Sadras, 2014; Rodrigues *et al.*, 2013). Sin embargo, son menores las investigaciones en el uso de bacterias asimbióticas o de vida libre y su limitado uso se debe principalmente a que, contrario a las simbióticas, este tipo de bacterias por sí solas, no logran aportar el

suficiente N para obtener altos rendimientos en los cultivos y, en los casos de acompañamiento con fertilizantes nitrogenados, la presencia de formas solubles de N (como amonio y nitratos), inhiben la actividad del consorcio enzimático de la nitrogenasa (Ozturk *et al.*, 2003; Sánchez *et al.*, 2006). Además, a pesar de que son de vida libre, muchas de ellas son anaeróbicas o microaeróbicas, lo que hace necesario ubicarlas en la rizósfera para disminuir la tensión de oxígeno. También la FBN está en función de la presencia de carbono como fuente de energía (Unkovich y Baldock, 2008), lo que infiere la necesidad de suelos con altos contenidos de MOS y la aplicación de abonos orgánicos.

Las bacterias diazótrofes *Azospirillum*, *Bacillus* y *Pseudomonas* son los géneros más mencionados en los reportes de investigación (Perez Montaña *et al.*, 2014). La mayoría de los estudios realizados utilizando *Azospirillum spp* (86,7%) han sido en cereales, especialmente en maíz (Díaz-Zorita *et al.*, 2015). Algunas de ellas muestran buen comportamiento como complemento de la FN, pero aún se presenta limitaciones, ya que no siempre es consistente la respuesta a la inoculación. En general, la respuesta en producción a la inoculación con *Azospirillum* es exitosa en un 70% de los experimentos, en los cuales se obtuvieron respuestas agronómicas positivas, siendo esto una limitante para su uso a nivel comercial (Díaz-Zorita *et al.*, 2015). De acuerdo con Ozturk *et al.* (2003), cuando existe alta disponibilidad de N en el suelo para las plantas, la acción de las bacterias fijadoras se ve limitada. Frente a estas limitaciones, las investigaciones más recientes muestran la posibilidad de uso de bacterias diazótrofes en combinación con fertilizantes en dosis apropiadas brindando la posibilidad de obtener buenos rendimientos agrícolas (Kennedy *et al.*, 2004) a partir de estudios de mecanismos bacterianos de protección de la nitrogenasa a la acción del oxígeno molecular.

Gran parte de estas bacterias diazótrofes son aplicadas como biofertilizantes y hacen parte de las comúnmente llamadas “rizobacterias promotoras del crecimiento de plantas”. La biofertilización consiste en el uso de microorganismos para mejorar la fertilidad del suelo y la disponibilidad de nutrientes en la solución del suelo, permitiendo una mejor absorción por parte de las plantas y protegiéndolas contra las enfermedades (Castilla, 2006a). Una de las estrategias que se han puesto de manifiesto recientemente, es la aplicación de estas bacterias diazótrofes en conjunto con otros microorganismos, para asegurar su funcionalidad y supervivencia ante las nuevas condiciones de suelo, clima y naturaleza del cultivo a que se ven enfrentadas al momento de su aplicación. En muchos países como India, el uso de estos biofertilizantes ha resultado promisorio para la obtención de cosechas, reduciendo la contaminación y los costos de producción. Sin embargo, aún existen limitaciones para la producción de estos biofertilizantes, tales como la dificultad para encontrar cepas de microorganismos resistentes para la colonización de suelos diferentes a los de su procedencia, la vida corta de supervivencia de los microorganismos, la baja adaptabilidad de los microorganismos a nuevos entornos de cultivos y posibles cambios genotípicos durante su producción (Zaidi *et al.*, 2015).

1.5. LOS COLOIDES, LA CIC DEL SUELO Y LAS ENMIENDAS ORGANO MINERALES

Se denominan coloides del suelo a las partículas menores a 0,001 mm caracterizadas por estar eléctricamente cargadas y tener alta superficie específica, lo que les brinda alta reactividad química. Dentro de los coloides están los minerales de arcilla, los óxidos de hierro y aluminio y las sustancias húmicas (Jaramillo, 2014). Los minerales de arcilla, también conocidos como filosilicatos secundarios están formados por la combinación de láminas de tetraedros de Si^{+4} y láminas de octaedros de Al^{+3} (Figura 5). Cuando la combinación es una lámina de tetraedro de Si^{+4} y una de octaedros, se forma un filosilicato 1:1 como, por ejemplo, el grupo de las caolinitas (Figura 6). Cuando la combinación es dos láminas de tetraedro de Si^{+4} y en el centro una lámina de octaedro de Al^{+3} se forman minerales de arcilla 2:1 como, por ejemplo, el grupo de las esmectitas, donde las montmorillonitas son las más conocidas (Figura 6). Si en el momento de la formación del mineral de arcilla, existe una alta concentración de Al^{+3} , ocurre sustitución isomórfica en los tetraedros, donde el Si^{+4} es reemplazado por el Al^{+3} . Igualmente puede suceder en los octaedros, al reemplazar el Al^{+3} por Mg^{+2} ó Fe^{+2} . Estas sustituciones son posibles por el relativo similar tamaño de los iones implicados. Debido a que el ion reemplazante tiene menor carga que el reemplazado, se crea un desbalance de carga y el mineral adquiere

carga negativa que es neutralizada por cationes. La suma de todas las cargas negativas constituye la CIC del suelo (Osorio, 2014).

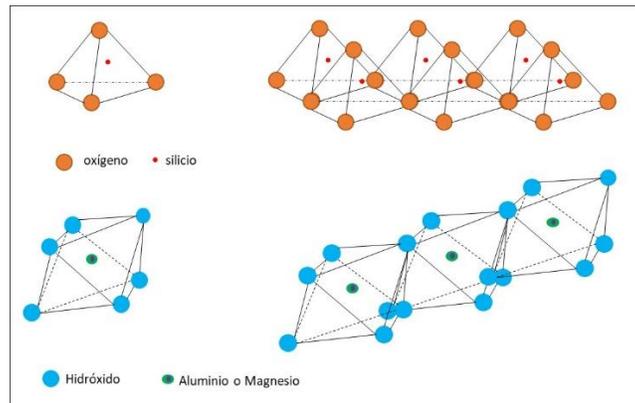


Figura 5. 1. (a) tetraedro de silicio. (b). lámina de tetraedros de silicio. 2. (a) Octaedro de aluminio. (b) lámina de tetraedros de aluminio.
Elaboración propia

Los coloides del suelo pueden poseer carga permanente y/o carga variable. La carga permanente es el resultado de sustituciones isomórficas de cationes en las unidades estructurales de tetraedros de silicio y octaedros de aluminio y generalmente es negativa y propia de los minerales de arcilla 2:1. La carga variable es dependiente del pH del suelo y es originada por la presencia de grupos hidroxilos y carboxilos que se encuentran en los bordes de los minerales. La carga variable puede ser negativa o positiva, dependiendo de las características del coloide y su punto isoeléctrico, así como de las características del medio y es propia de los minerales de arcilla 1:1, los óxidos de hierro y aluminio y los coloides húmicos. La suma de estas cargas es lo que constituye la capacidad de intercambio iónico y es la responsable de la adsorción de diversas sustancias como nutrientes, agua, metales pesados y sustancias orgánicas.

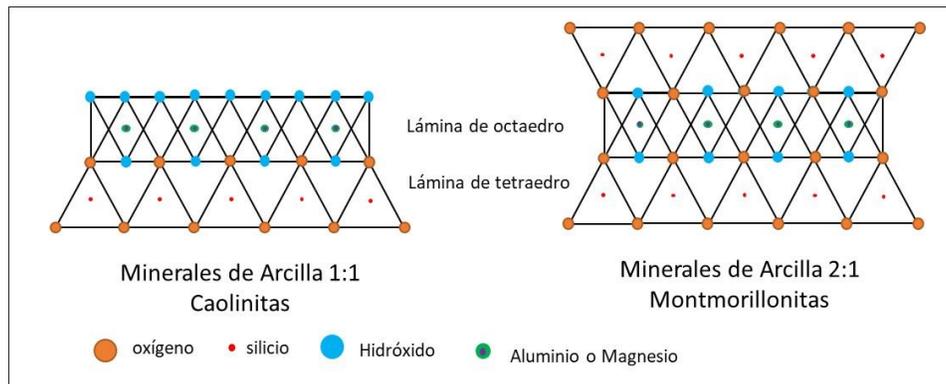


Figura 6. Estructuras cristalinas de arcillas 1:1 (caolinitas) y 2:1 (montmorillonitas)
Elaboración propia.

El humus es dispuesto en una organización junto a los coloides inorgánicos del suelo y elementos metálicos (principalmente Al, Fe y Ca) que adquiere, dentro de su inestabilidad termodinámica, una cierta estabilización temporal que en algunos suelos puede ser de miles de años (Macías *et al.*, 2010). Gran parte del humus puede estar estrechamente ligado con las partículas de arcilla, formando los denominados complejos arcillo- húmicos u órgano-minerales (Zhang *et al.*, 2013). Este fenómeno se presenta en todos los suelos, aunque el porcentaje de C presente puede variar desde 18% (espodosoles) hasta el 90% (andisoles). La formación de complejos órgano-minerales es el mecanismo por el cual los suelos protegen la MOS del ataque microbiano y de procesos oxidativos, conservándola por espacios de tiempo prolongados (Macías *et al.*, 2010). La mayor parte de la MOS

humificada hace reacción en la superficie del mineral de arcilla y no entre láminas por ser moléculas muy grandes para los espacios interlaminares. Las arcillas 2:1 como la montmorillonitas protegen mejor la MOS que las 1:1 como las caolinitas.

Los coloides húmicos generalmente son polianiónicos por lo que son repelidos por los minerales de arcilla cargados negativamente. Para la formación del complejo órgano-mineral es necesario entonces la presencia de cationes polivalentes. Se reconocen dos mecanismos fundamentales de enlace entre las sustancias húmicas y los coloides inorgánicos:

- a) Interacción ion – dipolo: son los enlaces que involucran más energía y pueden ser de dos clases:
 - Uniones formadas por cationes polivalentes entre arcillas de tipo mica y los polianiones húmicos. La intensidad con que un humato ó un fulvato son adsorbidos por una arcilla depende de la valencia del catión que actúa de puente (Figura 7A).

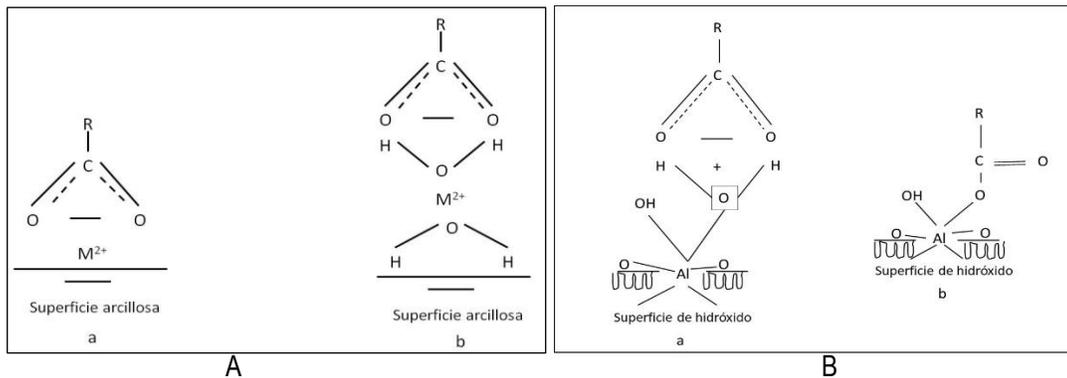


Figura 7. Mecanismo de enlace entre sustancias húmicas y coloides inorgánicos por interacción ion-dipolo.

A. Unión mediante un catión puente (a) en su forma más sencilla y (b) modelo más real, en el que el anión orgánico se une al catión mediante las moléculas de agua de la capa de hidratación de este. R es un coloide húmico polianiónico. B. (a) intercambio de anión (b) intercambio de ligando. R es un coloide húmico polianiónico. Fuente: adaptado de Wild, 1992.

- Uniones entre óxidos e hidróxidos cargados positivamente y los polianiones húmicos. Debido a su alto punto isoeléctrico, los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio desarrollan carga positiva en su superficie que les da la oportunidad de atraer aniones como los humatos y fulvatos. Sin embargo, estos tipos de enlaces son débiles, por lo que pueden ser desplazados por aniones como Cl^- y NO_3^- . Cuando ocurre un cambio de ligando, es decir, cuando el anión orgánico penetra el espacio de coordinación del hierro y aluminio y se incorpora a la capa superficial de OH^- , se forman enlaces muy fuertes que sólo pueden ser desplazados por aniones que son adsorbidos por gran cantidad de energía como los hidróxidos o el pirofosfato (Figura 7B).
- b) Puentes de hidrógeno y enlaces de Van der Waals: son de poca importancia por la debilidad del enlace, pero aditivos en la medida en que se van formando más este tipo de enlaces a medida que se va presentando deshidratación en el conjunto mineral de arcilla y los polianiones orgánicos como los grupos carboxilo, hidroxilo y amino. Los enlaces de Van der Waals hacen referencia a la unión débil de atracción entre compuestos húmicos y la superficie de arcilla.

La combinación de abonos orgánicos y minerales se denomina enmiendas órgano minerales, cuyo fin es brindar todos los beneficios que ofrece la aplicación de la materia orgánica, así como aumentar la CIC del suelo y conservar el carbono orgánico por más tiempo, gracias a los enlaces posibles entre el mineral y los coloides orgánicos. El uso de enmiendas órgano-minerales contribuye al secuestro de C en el suelo, mejora la estabilidad estructural, la capacidad de retención de agua, la disponibilidad de nutrientes en formas de liberación retardada, la actividad microbiana, entre otras (Almendros, 2004). Las enmiendas más estudiadas son las elaboradas a partir de zeolitas y abonos orgánicos.

Colombia posee un recurso potencial geológico minero importante, lo que hace posible la explotación de una variedad de recursos mineros como los metálicos entre los cuales están: los feldespatos (potásicos y plagioclasas), minerales de zinc, de aluminio y minerales sílicos como la zeolita, la vermiculita y la bentonita.

La potencialidad de uso de minerales, en especial la bentonita, es muy alta, debido a que es una roca compuesta principalmente por minerales de arcilla de tipo montmorillonita, y en menor proporción de caolinita y óxidos. De acuerdo a su ion intercambiable, se clasifican en cálcicas o no expandibles y sódicas o expandibles. La mayoría de las bentonitas se originan por la hidrólisis de las cenizas volcánicas. Su explotación se realiza en canteras a cielo abierto y el procesamiento consiste en la reducción y unificación de tamaño principalmente. En Colombia se tienen importantes yacimientos a lo largo de la cordillera central, en los departamentos de Tolima, Caldas y Valle del Cauca. Las bentonitas son usadas en la industria petrolera como recubrimiento de hoyos de perforación, como agente aglutinante, como clarificador de líquidos como vino y agua, como material de sellado de residuos tóxicos, como catalizador en procesos químicos, como excipiente en la industria farmacéutica y en la agricultura para mejorar propiedades de suelos. Su amplio uso se debe a su alta capacidad de adsorción, dada por su alta área específica y CIC (Largo y Villamarín, 2013) y a su bajo costo en comparación con otros minerales industriales.

1.6. NITRÓGENO LIXIVIADO PROVENIENTE DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA DE SISTEMAS PRODUCTIVOS AGRÍCOLAS

Las pérdidas de NL son inevitables a pesar de la implementación de las mejores prácticas de manejo agrícola, debido a eventos tan impredecibles como la precipitación (Cavero *et al.*, 2003). La concentración de nitratos en aguas superficiales es baja ($0 - 18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) pero puede llegar a alcanzar valores elevados como consecuencia de actividades agropecuarias (Anton y Lizaso, 2001). El NL proveniente de la agricultura está directamente relacionado con el manejo del riego, manejo de la FN (dosis, época de aplicación y fraccionamiento), las características del suelo, presencia de gravas y pedregosidad, el uso de la tierra y las condiciones climáticas (Diez *et al.*, 2000; Arauzo y Valladolid, 2013).

Las pérdidas de N por debajo de la zona de raíces de los cultivos son inevitables en manejos convencionales de sistemas de riego por superficie, debido a la baja eficiencia y uniformidad de aplicación, lo que conlleva a la aplicación de altas dosis (sobrefertilización) en los cultivos, registrando pérdidas de más de $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ de N (Cavero *et al.*, 2003). Valores entre 23 y $28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de N encontradas en el agua de drenaje de parcelas irrigadas son considerados bajos con buenas prácticas agronómicas y altos rendimientos (Cristobal-Acevedo *et al.*, 2002; Cavero *et al.*, 2003), puesto que el límite establecido por la Unión Europea para la concentración de nitratos en aguas subterráneas y superficiales es de $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (Arauzo y Valladolid, 2013) o de $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ y $11,3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ respectivamente expresadas como N-NO_3 (Reyes *et al.*, 2012).

Existe una relación estrecha entre NL y el método de riego utilizado en los sistemas agrícolas; métodos de riego más eficientes pueden disminuir en más del 50% las pérdidas de N de la zona de raíces (Tabla 4). Jégo *et al.* (2012) encontraron que la reducción de pérdidas de N es significativa cuando se mejora el manejo del riego que cuando se mejora el manejo de la FN.

Cuando se aplica dosis de FN entre 25% – 50% por encima de la óptima de un determinado cultivo, la lixiviación se aumenta de forma exponencial en $5 - 7 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de NO_3 (Delin y Stenberg, 2014), lo que sugiere que, a pesar de realizar balances adecuados para la determinación de la dosis, se debe considerar el tiempo de aplicación y los contenidos de N en el suelo proveniente de la descomposición de residuos de cosecha, así como las pérdidas por denitrificación. Incluso, aplicando altas DN, el contenido de NO_3^- en los suelos puede ser muy bajo y la lixiviación máxima, si también las láminas de riego son sobreestimadas (Cavero *et al.*, 2003) y las raíces de las plantas son muy cortas (Cavero *et al.*, 2012). Las pérdidas de nitratos varían de acuerdo a las fases fenológicas de las plantas, siendo mayor en sus primeras etapas y menor en la cosecha y es independiente de la fuente de fertilizante (orgánico o inorgánico) (Reyes *et al.*, 2012).

Tabla 4. Experiencias relacionadas con la relación entre N aplicado, N lixiviado y métodos de riego.

Dosis aplicada de N kg·ha ⁻¹ ·año ⁻¹	Dosis encontrada en el drenaje (% del N aplicado)	Textura	Método de riego	Fuente
153 – 350 (maíz y alfalfa)	44 - 56	-	Superficie	Causapé <i>et al.</i> (2002)
320 (en promedio) (maíz)	8,5	Arcillosa, franco arcillosa	Aspersión	Cavero <i>et al.</i> (2003)
220 (aguacate)	36 – 44 16 - 21	Franco arenosa	Manguera Riego localizado	Tapia <i>et al.</i> (2012)
3100 (pastos)	0,5	Arenosa	Aspersión	Velazco <i>et al.</i> (2009)
120- 180 (maíz)	4 - 6	-	aspersión	Almaguer 2013
150 (maíz)	26 - 50	Franco limosa	Goteo	Arbat <i>et al.</i> (2013)
300	50		Goteo	
360 (hortalizas)	42 - 99	Franca	goteo	Song <i>et al.</i> (2009)
225 (arroz-trigo)	2 - 10	-	superficie	Wang <i>et al.</i> (2004)

El manejo agronómico de cultivos resulta ser importante para la reducción de los NL. Prácticas como labranza mínima, disposición de residuos en la superficie como cobertura, disposición de drenajes y el fraccionamiento de la fertilización han mostrado buenos resultados (Arauzo y Valladolid, 2013; Zupanc *et al.*, 2011; Cristobal-Acevedo *et al.*, 2002). Sin embargo, el manejo de arvenses a pesar de disminuir la lixiviación de nitratos puede también disminuir la eficiencia de uso del N por parte del cultivo (Gholamhoseini *et al.*, 2013).

1.7. PRODUCCIÓN DE PLANTAS AROMÁTICAS

Las plantas aromáticas y medicinales han sido valoradas por su alto contenido en aceites esenciales, por sus propiedades medicinales, por su aroma y sabor característicos (Davies, 2004). En Colombia, el consumo de las plantas aromáticas y medicinales es tradicional y generalizado y ha ido en aumento su procesamiento en diferentes farmacias como jarabes, pastillas y otros compuestos obtenidos de forma natural obedeciendo a una tendencia mundial de consumo de medicinas alternativas (Posso, 2002; Fonnegra y Jiménez 2007).

Las plantas aromáticas condimentarias y medicinales han tomado tal importancia en el país que en la actualidad existe una Cadena Productiva Nacional de estas especies, promovida y apoyada por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, y a partir del 2006 se ha creado una en el Valle del Cauca jalonada por la Secretaría de Agricultura y Pesca del departamento. Las convocatorias realizadas por estos organismos gubernamentales han sido orientadas a la investigación y mejoramiento de tres líneas principalmente: material de siembra y mejoramiento genético, manejo integrado del cultivo que incluye el riego y la fertilización y manejo postcosecha y transformación (Posso, 2007a), en especial orientado hacia el mercado de aceites esenciales puesto que el país está importando casi ocho veces más de los que exporta. El cultivo de aromáticas y medicinales puede constituirse en una alternativa económica para pequeños agricultores y pequeñas agroindustrias (Barrientos *et al.*, 2012). Según Díaz (2003) el 14% de las plantas aromáticas que se comercializan en Colombia corresponden a aquellas obtenidas por recolección silvestre y el 16,7% proveniente de cultivos tecnificados. La Tabla 5 muestra los tipos de productores de plantas aromáticas que existen en Colombia.

Según los censos nacionales agrícolas reportados por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural el área cosechada en Colombia en plantas aromáticas en el año 2014 fue de 2606.7 ha con una producción de aproximadamente 12.315,7 Mg, de las cuales el 85 % fueron exportadas a diferentes países del mundo (Giraldo, 2014). A pesar de que es una cantidad alta, todavía está muy alejada de los valores que presentan los principales exportadores en Latinoamérica, como México (40.402 Mg), Chile, (11.238 Mg) y Perú (3.249). De acuerdo con el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2017) para el 2014 la mayor producción de plantas aromáticas y medicinales en el ámbito nacional se concentró en el departamento de Antioquia (36,7%) seguidos de los departamentos de Cundinamarca (22,9%), Valle del Cauca (20,2%), Cauca (9,0), Risaralda (2,6%) y

Norte de Santander (2,5%). De los municipios del departamento del Valle, los más representativos productores son: La Cumbre (36,6%), Yumbo (36,4%), Dagua (15,5 %), Guacarí (7,0%) y Palmira (1,7%).

Tabla 5. Segmentación de productores de plantas aromáticas presentes en Colombia.

Criterio	Tipo de productor		
	Convencional	Orgánico	Extractivo
Tipo de cultivo	Tradicional. Ubicados entre los 1000 y 2500 metros sobre el nivel del mar.	Cultivos orgánicos ubicados en su mayoría en zona de ladera.	Recolección silvestre
Mercado	Exportación	Local y externo	Nacional
Tamaño del área de producción	Grandes productores (1,8 hm ² en adelante). El 77% son propietarios de la tierra	Medianos y pequeños productores (0,5 ha en promedio)	Pequeños productores
Capital de explotación	Alta inversión en infraestructura	Bajo capital. Cultivos a libre exposición. La mayoría de los insumos se obtienen de la misma unidad productiva. Es intensivo en el mano de obra.	El capital es invertido en procesos de extracción y desplazamiento hasta los sitios donde se encuentra el material vegetal.
Manejo tecnológico	Prevalece el monocultivo. Utilizan sistemas de riego por goteo y aspersión. Realizan prácticas preventivas de control sanitario. Fertilización inorgánica.	Baja asistencia técnica. Uso de tecnologías generadas en la misma unidad productiva. Generalmente se utiliza rotación y asociación de cultivos. Inexistencia de transferencia y validación tecnológica.	Extracción de manera empírica en su mayoría sin determinar impactos ambientales de la extracción <i>in situ</i> de material vegetal

Fuente: Adaptado de López *et al.* (2009)

De acuerdo con la Secretaría de Agricultura y Pesca del Valle del Cauca (2016), en el 2015 el área sembrada y cosechada en aromáticas fue de 95,7 y 95,2 ha respectivamente, con una producción de 659 Mg y rendimiento de 6.92 Mg·ha⁻¹. El Valle del Cauca cuenta con una variedad de climas y suelos para la explotación y manejo de plantas aromáticas y medicinales; con excepción del té, los productores manejan áreas pequeñas que involucran alta mano de obra y el sustento para 290 familias de productores y las de los 720 empleados directos y 2160 indirectos (Posso, 2007b). Lo anterior constituye una gran oportunidad para el departamento que no puede dejar pasar y más con los tratados de libre comercio que puede potencializar su exportación. A partir de la rueda de negocios del 2010 realizada en Cali, la exportación de estevia al mercado chileno fue un hecho (Secretaría de Agricultura y Pesca del Valle del Cauca, 2010). La mayor parte de la producción que se comercializa mayoritariamente es en fresco y deshidratado y un pequeño porcentaje para la industria farmacéutica (Posso, 2007b).

1.7.1. El Cultivo de Estevia

La estevia (*Stevia Rebaudiana Bertoni*), es una planta aromática, perteneciente a la familia de las Asteraceae, utilizada como endulzante natural no nutritivo (Marín, 2004), con cero calorías, alternativo al azúcar y a los endulzantes artificiales, originaria de Brasil y Paraguay. Comercialmente tiene gran importancia por ser un sustituto directo del azúcar, se utiliza como medicamento natural para algunas enfermedades como diabetes, artritis, hepatitis crónica, pericarditis, hipertensión y también funciona como agente antioxidante, purificador y antihistamínico para enfermedades de la piel; posee otros usos como aditivo anti envejecimiento en productos cosméticos, en veterinaria como alimento para animales de granja y en agricultura como desinfectante de suelos, (Galván *et al.*, 2003; Jarma-Orozco *et al.*, 2003; Brandle, 2005; Jarma-Orozco *et al.*, 2005).

La producción mundial de estevia está alrededor de 100.000 a 200.000 Mg, de los cuales el 75% se cultiva en China continental, 8% en Paraguay y el restante está distribuida en países como Corea, Canadá, Malasia, Brasil, Colombia, Ecuador, entre otros (Salazar, 2014). En América Latina, entre los años 2009 y 2014, la cantidad de comidas y bebidas endulzadas con estevia creció a un ritmo de 53% (Vega, 2015). En Colombia, se emplearon en el 2015, 945 ha para la siembra de estevia y la producción participó con el 2,83% del mercado global de acuerdo a lo reportado por Ornelas (2016), y su consumo entre los años 2013 y 2015, creció en un 136% (Vega, 2015).

En cuanto su morfología, la estevia cuenta con raíces fibrosas, ramificadas y poco profundas, su tallo es erecto, semileñoso, con tendencia a inclinarse en las primeras etapas, pero después de las podas se convierte en una planta macollada, llegando a producir hasta 25 tallos. Sus hojas son elípticas, ovales y lanceoladas, donde se concentra la mayor parte de los edulcorantes. La flor es hermafrodita, pequeña y blanca. Una vez se alcance el 5% de la floración, se debe cosechar las hojas. Su propagación es posible por semillas o por esquejes, siendo esta última la más común. Para esto, se cuenta con cultivos madres que son mantenidos sanos constantemente, para el suministro de plántulas (Cassacia y Álvarez, 2006).

1.7.2. El cultivo de albahaca

La albahaca (*Ocimum basilicum* L.) pertenece a la familia de las Lamiaceae, originaria de la India, introducida en Europa por los griegos y los romanos. La albahaca se utiliza para la preparación de diferentes platos y en la industria farmacéutica, cosmética y de pesticidas. El alto valor económico de sus aceites es debido a la presencia de fenil propanoides y terpenoides (Sifola y Barbieri, 2006). En Colombia se han reportado cultivos de albahaca tipo exportación variedades Genovesa (*Ocimum basilicum* "Genovese") y Híbrida Nufar F1 principalmente desde el año 1998, donde los principales departamentos productores son Boyacá (73%), Valle del Cauca (19%), Cundinamarca (6%) y Antioquia (2%) (CCI, 2007). Según el Sistema de Estadísticas Agropecuarias, (2013) en el Valle del Cauca, la producción de albahaca genovesa en 2008 fue de 50 Mg cultivadas en 20 ha y pasó a 80 Mg en 40 ha en el 2010. Pese al potencial de producción que tiene, en Colombia esta planta ha sido poco estudiada puesto que aún se desconocen los requerimientos nutricionales, de riego y de control de plagas y enfermedades en el marco de las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) (López *et al.*, 2009).

La albahaca es herbácea, anual, de tallos erectos y ramificados, frondosa, que alcanza de 30 a 50 cm de altura. Las hojas de 2 a 5 cm, suaves, oblongas, opuestas, pecioladas, aovadas, lanceoladas y ligeramente dentadas. Las flores son blancas, dispuestas en espigas alargadas, asilares, en la parte superior del tallo o en los extremos de las ramas. Las densidades de siembra más utilizadas son 50.000, 60.000 y 100.000 plantas por hectárea (CCI, 2007).

2. DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DEL COEFICIENTE DEL CULTIVO (K_c) PARA ESTEVIA (*Stevia rebaudiana* B.) Y ALBAHACA (*Ocimum basilicum* L.)

En el presente capítulo se describe un breve contexto del manejo de las necesidades hídricas en estevia y albahaca, se señala el objetivo, los materiales y métodos realizados y los resultados alcanzados, así como las conclusiones relacionados con las curvas de K_c .

2.1. INTRODUCCIÓN

La agricultura es la principal actividad económica que a nivel mundial ocasiona mayor demanda de agua; el riego de tierras agrícolas utiliza entre el 70% y el 95% de los recursos hídricos en el mundo y es la práctica agrícola más ineficiente, afectando la cantidad y calidad de las fuentes de agua (Martínez, 2010).

Son pocos los estudios que se disponen para el cultivo de las plantas medicinales, aromáticas y condimentarias relacionados con el manejo del recurso hídrico, el cálculo de las láminas de riego y el efecto del estrés hídrico en las plantas, a tal punto que la mayoría de estos cultivos son producidos con riego suplementario, ocasionando pérdidas importantes de agua (Hadid, 2004). Las plantas aromáticas son importantes demandadoras hídricas puesto que la mayoría de sus K_c se encuentran por encima de 1,0 tal como lo reportaron Álvarez *et al.* (2010), para romero, Fronza y Folegatti (2003) para estevia y Ekren *et al.* (2012) para albahaca.

Diversos valores de K_c han sido reportados para estevia, los cuales fluctúan entre 0,25 y 1,16 en las etapas de germinación y crecimiento respectivamente, y entre 0,82 y 1,45 en las etapas de madurez y senescencia (González *et al.*, 2002; Fronza y Folegatti, 2003; Lavini *et al.*, 2008; Daza *et al.*, 2015; Reis, *et al.*, 2015; Villafañe *et al.*, 2016). Algunos autores han investigado el cálculo de láminas de riego para estevia teniendo en cuenta el potencial matricial edáfico, metodología que resulta muy particular a cada suelo. Por ejemplo, Niño *et al.* (2013) encontraron que en suelos franco arcillosos con potencial mátrico entre 10 y 20 cbar favoreció el crecimiento de las plantas de estevia y Serfaty *et al.* (2013) encontraron, en condiciones desérticas, que el potencial matricial debía estar entre 25 y 35 cbar, atendiendo la baja disponibilidad de agua, para obtener adecuados resultados de cosecha. Otra metodología empleada es variar en diferentes porcentajes, la humedad a capacidad de campo (CC) para el cálculo de adecuadas láminas de riego. Estos porcentajes recomendados varían desde el 100% hasta el 60% para obtener buenos resultados agronómicos (Lavini *et al.*, 2008; Karimi *et al.*, 2015).

De igual manera, son pocos los estudios relacionados con el manejo hídrico que se disponen para el cultivo de la albahaca en zonas tropicales. Se han empleado varias metodologías para estimar los requerimientos hídricos como la propuesta de Delgado & Daza (2012) utilizando la variación de coeficientes multiplicadores de la ETo, en condiciones de invernadero, encontraron que el coeficiente de 1,1 equivalente a un volumen diario promedio de 173 mL·planta⁻¹, fue el que obtuvo mejores respuestas en altura de planta (AP) y porcentaje de masa seca (MS). Sin embargo, este estudio no consideró las diferentes etapas fenológicas de la albahaca y utilizó la misma lámina de riego a lo largo de todo el ciclo del cultivo. Otra metodología es basada en el contenido de humedad a CC del suelo y en el balance hídrico. Al respecto Jerez y Barroso (2002) encontraron que cuando se emplea el 75% del balance evaporación – precipitación de la semana anterior al riego, se obtuvieron buenos rendimientos de biomasa con un comportamiento aceptable del estado hídrico de la planta. Sin embargo, Ekren *et al.* (2012) hallaron que las mejores respuestas agronómicas de la planta como AP y MS se obtuvieron cuando se empleó el 125% de la CC del suelo, mientras que la concentración de aceites en las hojas fue mayor cuando hubo estrés hídrico (50% de la CC). Para Khalid, (2006) el sometimiento a estrés hídrico en plantas de albahaca pueden disminuir la cosecha de MS pero incrementa la concentración de constituyentes esenciales de su aceite. Bekhradi *et al.* (2015) encontraron reducciones de hasta 40% de la cosecha de albahaca genovesa cuando se utilizaron láminas de riego equivalentes al 50% de la CC del suelo. Sin embargo, características agronómicas como longitud de tallo, área foliar y MS no presentaron diferencias significativas entre diferentes láminas de riego (100%, 75% y 50% de la CC). Lo anterior indica que la lámina de riego empleada en el cultivo de albahaca,

depende del uso final que tendrán las plantas, ya sea para su comercialización en fresco, en seco o para la extracción de aceites.

Los cultivos de estevia y de albahaca aún no cuentan con estudios suficientes con respecto a su Kc en condiciones tropicales que permitan el cálculo adecuado de las láminas de riego y un manejo adecuado del recurso hídrico.

2.2. OBJETIVO

Determinar las curvas experimentales del coeficiente del cultivo para el cálculo de las láminas de riego para las diferentes etapas fenológicas de estevia (*Stevia rebaudiana* B) y albahaca (*Ocimum basilicum*), con el fin de contribuir al manejo adecuado del agua en los sistemas productivos.

2.3. MATERIALES Y MÉTODOS

2.3.1. Localización y área de estudio

La investigación se realizó entre enero y julio de 2015 en cultivos comerciales de albahaca y estevia localizados en la finca Las Palmas (N 03 26.767' W 076 27.551'), vereda Cauca Seco, corregimiento de Juanchito (Candelaria) en el Departamento del Valle del Cauca (Colombia) (Figura 8). Los suelos utilizados correspondieron a la clasificación taxonómica *Fluventic Haplustepts* cuyas principales características físico químicas son mostradas en la Tabla 6.



Figura 8. Ubicación geográfica de la finca “Las Palmas”, corregimiento de Juanchito Candelaria (Valle del Cauca).

Fuentes: <https://www.google.com/maps/place/Candelaria,+Valle+del+Cauca,+Colombia/@3.4460383,-76.460905,457m/data=!3m1!1e3!4m2!3m1!1s0x8e3a0b9188d9373f:0x77a9f64e6dd55604!6m1!1e1;>
[https://es.wikipedia.org/wiki/Candelaria_%28Valle_del_Cauca%29.](https://es.wikipedia.org/wiki/Candelaria_%28Valle_del_Cauca%29)

Tabla 6. Caracterización físico química del suelo proveniente de la Finca “Las Palmas” Candelaria (Valle del Cauca).

Propiedad (unidades)	Valor	Propiedad (unidades)	Valor
pH	7,47	S (mg kg ⁻¹)	45,34
M.O. (g kg ⁻¹)	23,17	B (mg kg ⁻¹)	1,37
P disp (mg kg ⁻¹)	29,56	Cu (mg kg ⁻¹)	1,85
Ca (cmol(+) kg ⁻¹)	10,66	Fe (mg kg ⁻¹)	14,85
Mg (cmol(+) kg ⁻¹)	5,95	Zn (mg kg ⁻¹)	3,79
K (cmol(+) kg ⁻¹)	1,69	Textura (%)	A: 33,0, Ar: 37,4 y L: 29,6. Clase textural: Franco arcilloso
Na (cmol(+) kg ⁻¹)	0,44	Da (Mg m ⁻³)	1,17
Al (cmol(+) kg ⁻¹)	0,00	Porosidad (%)	49,23
CIC (cmol(+) kg ⁻¹)	16,90	Macroporosidad (%)	12,41
CICE (cmol(+) kg ⁻¹)	18,74	Microporosidad (%)	36,82

M.O: Materia orgánica; CIC: capacidad de intercambio catiónico; CICE: capacidad de intercambio catiónico efectiva; A: arena; Ar: arcilla; L: limo; Da: densidad aparente.

2.3.2. Diseño y construcción de Lisímetros de Drenaje (LD)

Se diseñaron y elaboraron 6 LD metálicos sin techo de un volumen igual a 0,125 m³. Las dimensiones del lisímetro se determinaron con base en la profundidad de las raíces y en el desarrollo del follaje de las plantas. Los LD fueron localizados al azar, tres en una parcela cultivada con estevia y tres en otra con albahaca. Dentro de cada lisímetro se distribuyeron las capas de suelo siguiendo el mismo orden del perfil encontrado en campo, procurando la menor disturbación posible. Después se saturó el suelo del lisímetro con agua durante tres días y se dejó drenar para permitir la acomodación de sus agregados. Cada lisímetro contó con dos orificios ubicados a 0,10 y 0,20 m de profundidad, que permitieron la medida de la humedad volumétrica por medio de un sensor de TDR (MASER MPM-160-B) previamente calibrado, el cual mide la constante dieléctrica del suelo y la transforma a valores de humedad volumétrica en tiempo real. En la parte inferior de cada lisímetro fue instalado un cono de drenaje conectado a una manguera plástica y a un recipiente tapado que permitió conducir el agua de drenaje, donde fue almacenada para su posterior medición del volumen (Figura 9).

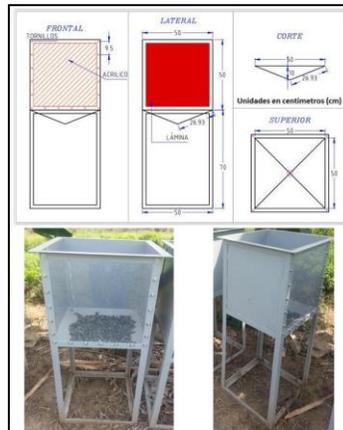


Figura 9. Diseño y construcción de los LD empleados en la experimentación.
Planos: Cortesía Ingeniero Hugo Meneses. Fotos propias.

2.3.3. Montaje y diseño experimental para cálculo de ET_c para el cultivo de estevia

El experimento se llevó a cabo entre los meses de febrero a mayo del 2015. Las condiciones climatológicas presentadas durante el desarrollo del experimento fueron: Temperatura media máxima de 30,2 °C, temperatura media mínima de 19,6 °C, humedad relativa media exterior de 77,5%, velocidad del viento promedio de 2,8 km·h⁻¹ y precipitación total de 263,5 mm. La variación promedio diaria de la precipitación fue de 0 a 26,3 mm, mientras que la ETo varió de 1,8 a 9,7 mm (Figura 10). Estos valores climatológicos fueron obtenidos de una estación meteorológica portátil (Vantage Pro2 Plus, Davis Instruments) debidamente calibrada e instalada en campo previamente, siguiendo las recomendaciones técnicas del fabricante y las suministradas por Allen *et al.* (2006).

En una parcela de 350 m² se sembró estevia a 0,30 m entre plantas y 0,30 m entre surcos. Se establecieron camas de 1,5 m de ancho por 13,0 de largo. La preparación del terreno consistió en un pase con motocultor para romper los agregados más grandes del suelo y tres pases con arado de cincel. Se utilizaron esquejes de estevia variedad Morita que fueron sembrados en marzo de 2015. El experimento tuvo un seguimiento hasta junio de 2015 con una duración de 96 días. Las etapas fenológicas o etapas de crecimiento del cultivo fueron determinadas siguiendo los lineamientos de Allen *et al.* (2006). Las etapas fenológicas de la estevia fueron: desarrollo y crecimiento (3–54 días después del trasplante-ddt), madurez (55–72 ddt) y cosecha y senescencia (73–96 ddt). Durante los primeros días del cultivo se utilizó una cubierta de polisombra para permitir la adecuación de los esquejes a las condiciones climáticas de la zona.

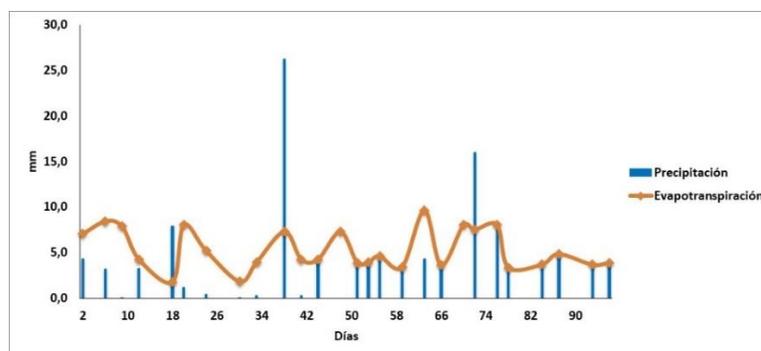


Figura 10. Registro de las láminas de evapotranspiración y precipitación durante el tiempo experimental para la determinación del Kc para el cultivo de estevia.

Se realizaron podas de crecimiento y sanitarias siguiendo las recomendaciones de Ramirez, (2011). Las plantas se fertilizaron con una solución nutritiva compuesta por NPK que contenía 200, 100 y 100 g·L⁻¹ respectivamente y se aplicó en dosis de 2,4 mL por planta. La fertilización se realizó 15 días después de la poda de crecimiento para todas las plantas tanto de las camas como las del lisímetro. La presencia de plantas arvenses como *Cyperus rotundus* fue eliminada de forma manual. El control de hongos como *Septoria steviae* Speg se realizó mediante la aplicación de fosfitos de cobre, fósforo y ácidos policarboxílicos en dosis de 200 cm³ por 100 L.

2.3.4. Montaje y diseño experimental para cálculo de ETc para el cultivo de albahaca

El experimento se llevó a cabo entre los meses de mayo a julio del 2015. Las condiciones climatológicas registradas durante todo el experimento con la estación meteorológica portátil fueron: temperatura media máxima de 32,8 °C, temperatura media mínima de 17,3 °C, velocidad de viento promedio de 5 km·h⁻¹. La precipitación promedio diaria registrada estuvo entre 0 mm y 4,95 mm, y la ETo estuvo entre 1,68 mm y 5,06 mm (Figura 11).

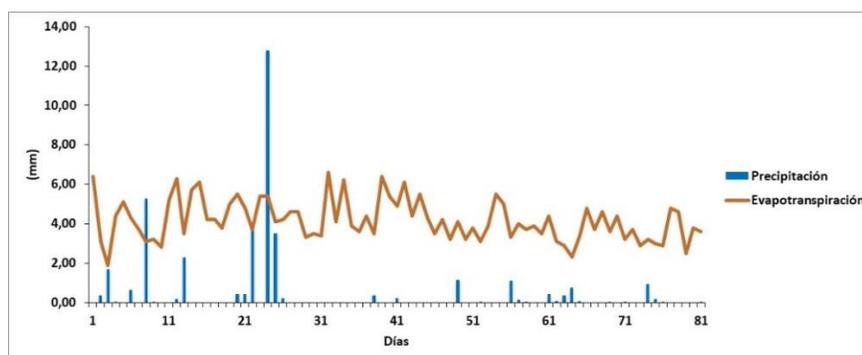


Figura 11. Evapotranspiración y precipitación registradas durante el tiempo experimental para la determinación del Kc para el cultivo de albahaca en el Valle del Cauca (Colombia).

El área experimental fue de 240 m², en la cual se realizaron labores de labranza previas como desmonte, arado y rastrillado. Se utilizaron semillas de albahaca variedad genovesa, las cuales fueron germinadas en semillero usando el mismo suelo como sustrato. Las plantas de albahaca fueron trasplantadas a los 20 días, sembradas a 0,5 m x 0,5 m y se abonaron con un fertilizante organo mineral al inicio del trasplante, cuyos ingredientes activos fueron fosfito asimilable, cobre, carbono y sodio. También se realizaron aplicaciones mensuales de 15-15-15 y urea en dosis de 0,5 g·planta⁻¹. La cantidad de cada fertilizante se determinó de acuerdo al análisis de suelos y a los requerimientos del cultivo siguiendo las recomendaciones de Bonilla y Guerrero (2010). Para el caso de los LD, estos fertilizantes se aplicaron disueltos en el volumen de agua de riego. A partir de los 20 ddt se realizaron aplicaciones periódicas de Eco Home Control Hongos, cuya composición es extracto de limón no comestible e ingredientes inertes para el control de *Fusarium* spp. Se realizaron podas en la rama principal, lo

cual según Bonilla y Guerrero (2010) es una buena práctica que ayuda a la planta de albahaca en su crecimiento arbustivo y la producción de brotes laterales. Las etapas fenológicas o etapas de crecimiento del cultivo fueron determinadas siguiendo los lineamientos de Allen et al. (2006). Las etapas fenológicas de la albahaca fueron: desarrollo y crecimiento (1–25 ddt), madurez (26–50 ddt) y cosecha y senescencia (51–71 ddt).

2.3.5. Balance hídrico y determinación de la curva del coeficiente del cultivo (Kc)

Se llevó un registro constante de las diferentes variables del balance hídrico, para luego calcular la ETc en lámina (mm) por medio de la ecuación (2).

Ecuación 2. Balance hídrico general
 $ET_c = P + R + C - ES - D \pm \Delta H.$

Donde P es la precipitación, R es el aporte de lámina por el riego, C es el aporte de agua a zonas de raíces por capilaridad, la cual se asumió como cero por ser un valor pequeño en las dimensiones del lisímetro comparado con los demás aportes, ES es la pérdida de agua por escorrentía, la cual igualmente se tomó el valor de cero puesto que el experimento se llevó a cabo en zona plana y las precipitaciones presentadas no ocasionaron escorrentía dentro del lisímetro, D es la lámina drenada y ΔH es el cambio en el contenido de humedad del suelo.

El suelo se llevó a estado de humedad de saturación y se dejó drenar por 24 horas para ser llevado a condiciones cercanas a la humedad de CC. Después del drenaje de 24 horas se midió con el equipo de TDR dentro de cada lisímetro para calibrar la humedad de CC en relación con los valores encontrados en laboratorio. Una vez alcanzada la humedad de CC, se realizó el trasplante de plántulas de estevia y albahaca con 20 y 10 días de germinación respectivamente, tanto en campo como en los LD. Las mediciones con el TDR previamente calibrado se hicieron todos los días, para monitorear el estado de humedad del suelo y se utilizó un coeficiente de agotamiento del 10%, el cual fue previamente determinado mediante ensayos de prueba y error. Este coeficiente de agotamiento es aquel en el cual se ha consumido el 10% del agua aprovechable. Una vez obtenidas las lecturas de humedad se dispuso aplicar las cantidades de agua teniendo en cuenta, además, la densidad aparente, el área y la profundidad previamente determinada (0,08 m hasta los 62 ddt y 0,10 m hasta la cosecha para estevia y 0,10 m hasta los 25 ddt, 0,14 m de 26–50 ddt y 0,15 de 51–71 ddt para albahaca).

El riego se realizó manualmente con una probeta volumétrica de 1000 mL, esparciendo el agua sobre toda la superficie del lisímetro. El agua de drenaje fue recolectada en los recipientes plásticos midiendo el volumen recogido. Este procedimiento fue realizado aproximadamente cada tres días, teniendo distribuciones de dos días en condiciones normales y hasta 4 días en periodos de lluvia. La precipitación fue determinada con la estación climatológica portátil y se ajustó al área de aplicación del lisímetro en el momento de realizar el balance hídrico.

Para la determinación de ETo, se empleó igualmente la estación climatológica portátil, la cual proporcionó los registros por hora de las variables utilizadas en la ecuación de Penman-Monteith como son la velocidad del viento, radiación solar, humedad y temperatura (Ecuación 3).

Ecuación 3. Ecuación modificada de Penman - Monteith

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

Donde: ETo es la evapotranspiración de referencia ($\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$); Rn es la radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$); G es el flujo de calor del suelo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$); T es la temperatura media del aire a 2 m de altura; U₂ es la velocidad del viento de día a 2 m de altura ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); γ es la constante psicométrica modificada utilizada en el método de Penman-Monteith ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); ($e_s - e_a$) es el déficit de presión de vapor (kPa); es es la presión

de vapor a saturación de la temperatura promedio del aire (kPa); e_a es la presión de vapor tomada a la temperatura a punto de rocío (kPa); Δ es la pendiente de la curva de presión de la saturación de vapor a una temperatura específica (kPa·°C⁻¹); G es la constante psicométrica modificada utilizada en el método de Penman-Monteith (kPa·°C⁻¹).

El registro se realizó por un periodo de 96 días para estevia y 71 para albahaca, ya que este fue el tiempo necesario para que las plantas alcanzaran la madurez para la primera cosecha y su respectiva comercialización. Posteriormente se procedió al cálculo de Kc para cada lisímetro siguiendo los lineamientos de Allen *et al.* (2006) y utilizando la ecuación 4.

Ecuación 4. Cálculo del coeficiente del cultivo (Kc).

$$Kc = ET_c / ET_o$$

Para el cálculo de los grados-día se tuvo en cuenta el modelo del seno simple con intervalo horizontal (ecuación 5) propuesta por Zalom *et al.* (1983).

Ecuación 5. Cálculo de grados-día por el método del seno simple.

$$\text{Grados-día} = \frac{1}{\pi} \left[\left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - T_l \right) * \left(\theta + \frac{\pi}{2} \right) + (T_u - T_l) * \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) - \alpha \cos \theta \right]$$

$$\theta = \text{sen}^{-1} \left[T_u - \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \div \alpha \right] \quad \alpha = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}$$

Donde Tmax es la temperatura máxima del día; Tmin es la temperatura mínima del día; Tl es el umbral inferior de la planta el cual para estevia se tomó 9 °C y para albahaca 15 °C; Tu es el umbral superior de la planta el cual para los dos cultivos se tomó 25 °C.

2.3.6. Tratamiento de los datos y Análisis estadístico

Se verificó la distribución normal de los datos usando el Test de Shapiro - Wilk para estevia y el Test de Kolmogorov - Smirnov para albahaca y se realizó el test de homogeneidad de varianzas (Test de Friedman) para cada cultivo, encontrando que no hubo diferencias significativas entre LD para las tres etapas fenológicas. También se realizó pruebas de correlación entre LD utilizando la prueba de Spearman con un nivel de significancia del 95%. Se realizaron regresiones lineales para el Kc por fase de cultivo con un nivel de confianza del 95% y se determinaron intervalos de confianza para la media.

2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se muestran los resultados conseguidos en la determinación de las necesidades hídricas y las curvas de Kc de ambos cultivos.

2.4.1. Necesidades hídricas del cultivo de estevia

Los valores de ETc obtenidos para los tres LD siguieron una distribución normal (p=0,146), cumplieron con la homogeneidad de varianzas (p= 0,997), y no presentaron diferencias entre sus medias (p=0,811), siguiendo similares tendencias (Figura 12). Los coeficientes de correlación de Spearman entre LD hallados (p<0,01) estuvieron entre 0,92 y 0,96. Los valores registrados de ETc estuvieron entre 1,16 mm alcanzado a los 30 ddt en el lisímetro 1 y 9,00 mm a los 63 ddt en el lisímetro 2.

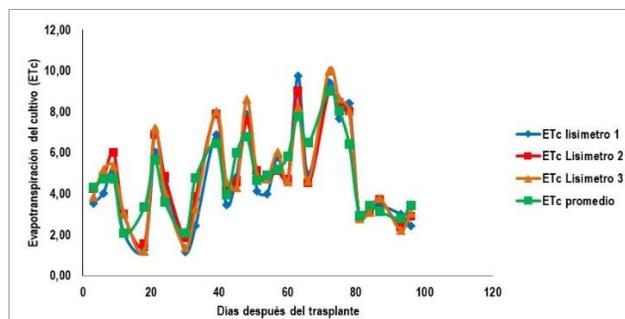


Figura 12. Variación de las necesidades hídricas del cultivo (ETc) en el periodo de crecimiento de estevia en LD.

Debido a las precipitaciones que se presentaron distribuidas durante el ciclo de la planta, los valores de ETc oscilaron permanentemente, encontrando que entre los 60 y 78 ddt las plantas de estevia demandaron mayor cantidad de agua (Anexo 1). En la etapa de crecimiento y desarrollo, la demanda de agua fue más baja debido a que las hojas de la planta de estevia aún son pequeñas, disminuyendo las pérdidas de agua por sus estomas. A medida que la planta va creciendo, su demanda de agua aumentó, a pesar de la ocurrencia de precipitaciones y la alta capacidad de almacenamiento de humedad en el suelo (microporosidad del 36%). El consumo de agua promedio diario fue de $4,91 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ y el consumo total de $471,4 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$, equivalentes a $4714 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ para el ciclo del cultivo evaluado. Este consumo total de agua es más bajo que el consumo del cultivo prevalente en la región de estudio que es la caña de azúcar ($10300 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$), pero por encima de otros cultivos representativos como maíz ($3600 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$) y soya ($3400 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$) (Pérez *et al.*, 2011). Serfaty *et al.* (2013) en su trabajo de investigación en condiciones desérticas de Israel, emplearon en cultivos de estevia $8000 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$, 40,6% más de agua que la empleada en esta investigación. González *et al.* (2002) en regiones de Paraguay, registraron el empleo de $1576 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ de agua para un cultivo de estevia realizado en suelos con una capa de 3,0 cm de bagazo de caña, razón por la cual este consumo fue más bajo. Aladakatti *et al.* (2012) utilizaron un volumen promedio de $20\ 384 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ en un cultivo de estevia cultivado durante dos años en suelos mantenidos a la humedad de CC (equivalente a $2548 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ durante tres meses). En Colombia, Niño *et al.* (2013) reportaron consumo de agua equivalente a $5488 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ por un periodo de 98 ddt en el departamento del Tolima.

El comportamiento de la ETc y de la ETo presentó tendencias similares (Figura 13a). El valor mínimo y máximo de ETo fueron 1,79 y 9,67 mm presentados a los 18 y 63 ddt respectivamente, mientras que los de ETc estuvieron entre 2,08 y 9,01, a los 12 y 72 ddt respectivamente. Entre los 3 y los 12 ddt, la ETo estuvo entre 30% y 51% por encima de la ETc, puesto que en estos primeros días el área foliar se empieza a desarrollar y la planta no proporciona suficiente cobertura al suelo, predominando la evaporación sobre la transpiración. Finalizando la etapa fenológica de crecimiento y desarrollo y durante la etapa de madurez la ETc sobrepasó a la ETo entre 7% y 28%. En la mayoría de los cultivos, en las primeras fases la ETo es mayor que la ETc, debido a que el área foliar es menor (Fronza y Folegatti, 2003). Araya, *et al.* (2011) en tef, encontraron que en las primeras etapas la ETc estuvo por encima de ETo y atribuyen este resultado al hecho de suministrar el agua a los microlisímetros por capilaridad, a la baja eficiencia del método de riego empleado y a la alta cobertura del suelo proporcionada por la planta, lo que determina el porcentaje de aumento entre las dos variables. En el caso de la estevia, este fenómeno puede atribuirse a la capacidad que tiene la planta en estas etapas fenológicas de cubrir el suelo, reduciendo la evaporación, lo que permite mayor almacenamiento de agua y reduce la frecuencia de aplicación. En la etapa de cosecha y senescencia la ETo estuvo entre 8% y 24% por encima de la ETc. Se encontró una baja relación ($R^2=0,43$) entre la ETo y la ETc registrada debido posiblemente al ataque de plagas en las hojas de la planta en la etapa de crecimiento y desarrollo (Figura 13b).

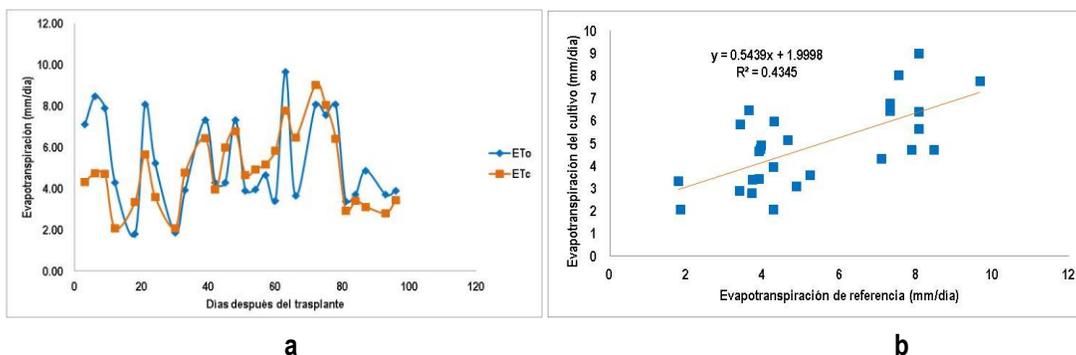


Figura 13. Variación de la evapotranspiración en el cultivo de estevia. (a) Comportamiento de la evapotranspiración de referencia (ETo) y las necesidades hídricas del cultivo (ETc) en un cultivo de estevia en el Valle del Cauca Colombia. (b) Regresión lineal encontrada entre ETo y ETc ($F= 19,21$; $p<0,001$).

2.4.2. Determinación del coeficiente del cultivo (Kc) para estevia

Los valores del Kc en el tiempo siguieron modelos lineales en cada etapa fenológica y estuvieron entre 0,76 y 0,84 (anexo 2). Los valores de Kc hallados oscilaron entre 0,48 y 1,35 para el lisímetro 1, entre 0,57 y 1,37 para el lisímetro 2 y entre 0,54 y 1,35 para el lisímetro 3. En promedio, los Kc oscilaron entre 0,55 y 1,36, donde los mayores valores se presentaron en la etapa de senescencia y cosecha. Los resultados obtenidos están por debajo de lo reportado por Fronza y Folegatti, (2003), cuyos valores estuvieron entre 1,16 y 1,45 y por Lavini *et al.* (2008) que reportaron valores entre 0,85 y 1,14, ambos en condiciones ambientales mediterráneas. No obstante, fueron más altos que los reportados por González *et al.* (2002), cuyos valores residieron entre 0,25 y 0,82, debido a que fueron hallados en cultivos con cobertura de mulch, que permitió menor pérdida de agua por evaporación. Villafañe *et al.* (2016) encontraron valores entre 0,36 y 0,59 en cultivos de estevia sembrada en condiciones parcialmente protegidas, donde las etapas del cultivo establecidas fueron más cortas que las halladas en el presente trabajo, situación que pudo deberse a diferencias en condiciones climáticas.

Los valores promedio de Kc por etapas fenológicas de estevia fluctuaron entre 0,85 y 1,24 (Tabla 7). Al analizar por etapas y realizar regresiones lineales, se encontró que los coeficientes de regresión fueron superiores a 0,6; sin embargo, en la etapa de madurez no se consiguió el comportamiento lineal sin pendiente, indicando que los valores de Kc alcanzaron un valor máximo pero no se estabilizaron por un periodo de tiempo prolongado, como es representado en la curva característica sugerida por la FAO y descrita por Allen *et al.* (2006), sino que en la etapa de madurez los valores fluctuaron entre 0,93 y 1,36 aproximadamente (Figura 14A).

Tabla 7. Valores promedio de coeficientes de cultivo (Kc) por etapa fenológica para estevia cultivada en el Valle del Cauca Colombia.

Etapas	Ddt (grados-día)	Media de Kc	Intervalo de confianza (95%)		R ²	Valor de F (P)	C.V. %	m	b
			Límite inferior	Límite superior					
Desarrollo	3 – 54 (58,7 – 789,4)	0,86	0,75	0,98	0,91	150,64 (<0.001)	24,37	0,012	0,514
Madurez	55 – 72 (804,0 – 1055,4)	1,24	1,14	1,34	0,34	0,44 (0,56)	6,53	-0,005	1,56
Cosecha y senescencia	73 – 96 (1069,62 – 1403,5)	0,85	0,71	0,99	0,81	21,87 (0,005)	17,71	-0,023	2,83

ddt= días después del trasplante; C.V.= coeficiente de variación; m y b corresponden a los valores de la ecuación de la recta $y=mx+b$

Similares resultados fueron reportados por Daza *et al.* (2015) quienes encontraron que las láminas de riego calculadas con un Kc de 1,2 fueron los que proporcionaron mejores resultados agronómicos en comparación con Kc de 1,0 y 1,1; este valor al ser utilizado para todo el ciclo del cultivo puede inducir pérdidas de nitratos por lixiviación y no lograr altos rendimientos. Reis *et al.* (2015) utilizaron Kc de 1,0 para calcular láminas de riego con agua de diferentes calidades y encontraron que no tuvo efecto negativo en la cosecha, cuando la conductividad eléctrica (CE) del agua de riego estaba por debajo de 2 dS·m⁻¹. Los consumos de agua reportada por estos autores estuvieron entre 3,44 y 7,68 mm·día⁻¹, similares a las encontradas en el presente trabajo.

A los 96 ddt, se encontró un acumulado de 1403,5 grados-día. La etapa de desarrollo estuvo comprendida entre los 58,7 y 789,4 grados-día mientras que la de madurez estuvo entre 804,0 y 1055,4 grados-día. La etapa de cosecha y senescencia comenzó a los 1069,6 y terminó a los 1403,5 grados-día (Figura 14B).

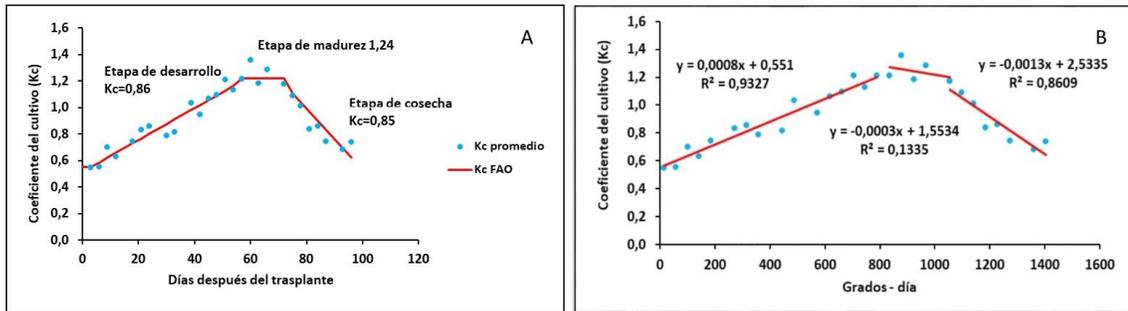


Figura 14. Curva promedio del coeficiente de cultivo (Kc) para estevia. A. En función de días después del trasplante. B. En función de grados- día

En la etapa de crecimiento y desarrollo de estevia el consumo promedio de agua fue de $4,57 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ (233,07 mm), mientras que en su etapa de madurez fue de $7,30 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$, (124,16 mm). A pesar de que el Kc en la etapa de crecimiento y desarrollo es menor, el periodo que dura esta etapa es más largo, lo que lleva a un consumo de 46,73% más de agua que la etapa siguiente. En la etapa de cosecha y comienzo de la senescencia, el consumo de agua fue de $4,28 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ (98,44 mm en total) reduciendo el consumo hídrico en 20,72% con respecto a la etapa fenológica anterior. En esta última etapa, el consumo de agua es menor y es donde se produce la mayor concentración de metabolitos y azúcares. Estos valores estuvieron por encima de los reportados por González *et al.* (2002), quienes encontraron consumos de $2,10 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ en etapa de crecimiento y $6,30 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ en etapa de madurez de la estevia y fueron similares a los encontrados por Niño *et al.* (2013) quienes reportaron un consumo promedio $5,60 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ y aseguran que mantener la humedad del suelo entre 0,20 – 0,30 cbar de tensión mátrica (cerca a CC), favorece variables agronómicas como longitud de tallo, MS foliar y concentración de edulcorantes. También Ramírez, (2011) sostiene que las necesidades hídricas de la estevia son de $5,00 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$, los cuales recomiendan ser aplicados cada tres días si los suelos son arenosos y cada 5 días si son arcillosos.

2.4.3. Necesidades hídricas del cultivo de albahaca

Los tres LD presentaron resultados similares de necesidades hídricas del cultivo (ETc) (Anexo 3). Los datos se distribuyeron normalmente ($p=0,228$) y no se encontraron diferencias entre sus medias ($p=0,962$). Los valores oscilaron entre un máximo de 8,58 mm presentado a los 34 ddt en el lisímetro 1 y un mínimo de 1,78 mm presentado a los 63 ddt en el lisímetro 3 (Figura 15). Los coeficientes de correlación de Spearman entre LD ($p < 0,01$) estuvieron entre 0,88 y 0,92.

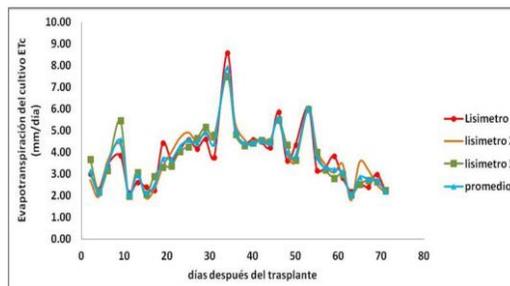


Figura 15. Variación de las necesidades hídricas del cultivo (ETc) en el periodo de crecimiento de albahaca en LD.

El mayor consumo de agua de la albahaca genovesa se presentó hacia el final de la etapa de crecimiento y desarrollo y en la etapa de maduración (Anexo 3). Generalmente en las etapas iniciales de los cultivos, la

transpiración es baja debido a que el área foliar es menor, por lo tanto, la mayor pérdida de agua se le atribuye en mayor proporción a la evaporación del suelo que a la transpiración de la planta (Allen *et al.*, 2006). En la primera etapa (crecimiento y desarrollo) se presentaron precipitaciones y altas temperaturas, que favorecieron la evaporación del agua del suelo, puesto que el experimento se llevó a cabo terminando el primer periodo de lluvias en el año e iniciando la época seca, comportamiento propio de las condiciones tropicales de Colombia. A medida que la planta creció, el consumo de agua aumentó, debido a su mayor demanda hídrica para favorecer la producción de biomasa y la formación de flores, aumentando la transpiración. Hacia la etapa de senescencia, la ETc disminuyó a valores similares a los registrados en las etapas iniciales. El promedio de la ETc registrada durante la etapa de estudio fue de 3,79 mm·día⁻¹ y el consumo total de agua durante el ciclo del cultivo fue de 269,38 mm equivalentes a 2693,80 m³·ha⁻¹, valores por debajo del consumo registrado para otros cultivos de la región como caña de azúcar (10300 m³·ha⁻¹), maíz (3600 m³·ha⁻¹) y soya (3400 m³·ha⁻¹) (Pérez *et al.*, 2011) e inclusive de cultivos de albahaca púrpura en Turquía (12120 m³·ha⁻¹) (Ekren *et al.*, 2012) y azafrán en Iran (6700 m³·ha⁻¹) (Azizi-Zohan, *et al.*, 2008).

El comportamiento de la ETc y ETo siguieron tendencias similares, aunque los valores de ETo siempre estuvieron por encima de la ETc (Figura 16a). Los valores de ETc representados es el promedio diario de los tres LD y el valor de ETo es el registrado a la misma hora por la estación meteorológica. Los valores extremos de ETo estuvieron entre 4,49 y 13,26 mm a los 11 y 34 ddt respectivamente, mientras que los de ETc estuvieron entre 2,01 y 7,91 mm a los 63 y 34 ddt correspondientemente.

En la etapa de inicio (0 – 25 ddt) la ETo estuvo entre 40% y 60% por encima de la ETc mientras que en la etapa de madurez, donde se evidenció mayor demanda de agua, estuvo entre 35% y 47% por encima de ETc. En la etapa de senescencia la ETo estuvo entre 47% y 67% por encima de la ETc. En la mayoría de los cultivos, en las primeras etapas la ETo es mayor que la ETc, debido a que el área foliar es más pequeña (Fronza y Folegatti, 2003). En el presente estudio, el agua se suministró por probeta obteniéndose resultados de similar tendencia entre ETc y ETo, con un coeficiente de regresión de 0,75 (Figura 16b). Las plantas de albahaca al no cubrir completamente el suelo, favorecieron la evaporación de agua, siendo mayor que la transpiración por lo que la ETc permaneció por debajo de ETo.

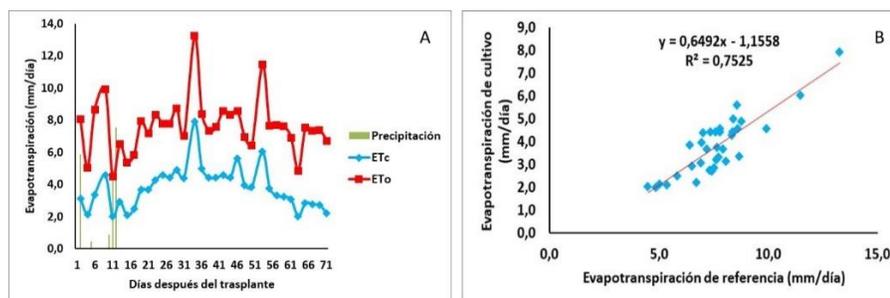


Figura 16. Variación de la evapotranspiración en el cultivo de albahaca. (a) Comportamiento de la evapotranspiración de referencia (ETo) y necesidades hídricas del cultivo (ETc) durante el experimento realizado en un cultivo de albahaca en el Valle del Cauca Colombia. (b) Regresión lineal encontrada entre ETo y ETc.

2.4.4. Determinación del coeficiente del cultivo (Kc) para albahaca

Los valores hallados de Kc en los tres LD se encuentra en el anexo 4. Los mayores valores de Kc (0,66 - 0,68) se hallaron en la etapa de madurez (46 – 50 ddt) y los valores más bajos (0,33 – 0,31) en etapa de senescencia y cosecha de hoja (67 – 71 ddt). Estos valores hallados están por debajo de los reportados por Delgado y Daza (2012) quienes al ensayar diferentes coeficientes que multiplican a la ETo encontraron que un valor de 1,1 fue el que mejor resultado brindó en el análisis de características agronómicas de planta, aunque sin diferencias significativas con valores de coeficientes iguales a 0,8. Estas diferencias pueden deberse a que el experimento de Delgado y Daza (2012) se desarrolló en condiciones de invernadero, con ensayos de prueba y error sin

realizar balances hídricos, mientras que el hallado en el presente estudio fue en condiciones de campo teniendo en cuenta dichos balances.

Los valores de Kc para las etapas fisiológicas de la albahaca genovesa estuvieron entre 0,42 y 0,59 (Tabla 8). Los valores alcanzados por etapa mostraron baja variabilidad con aceptable precisión, como lo muestra los coeficientes de variación. Al analizar por etapas y realizar regresiones lineales, las etapas de crecimiento y desarrollo y de senescencia obtuvieron coeficientes de regresión superiores a 0,6 mientras que en la etapa de madurez no se consiguió el comportamiento lineal, como es representado en la curva característica sugerida por la FAO y descrita por Allen *et al.* (2006), sino que en la etapa de madurez los valores fluctuaron entre 0,5 y 0,6 aproximadamente (Figura 17A).

Tabla 8. Valores promedio de coeficientes de cultivo (Kc) por etapa fenológica para albahaca genovesa cultivada en el Valle del Cauca Colombia.

Etapas	Ddt (grados – día)	Media de Kc	Intervalo de confianza (95%)		C.V. %	R ²	F(p)	m	b
			Límite inferior	Límite superior					
Desarrollo	1 – 25 (8,4 – 217,7)	0,46	0,42	0,50	12,8	0,65	18,34 (<0,01)	0,01	0,32
Madurez	26 – 50 (226,1 – 433,4)	0,59	0,56	0,61	6,10	0,01	0,00 (0,98)	0,0001	0,58
Cosecha y senescencia	51 -71 (442,4 – 612,0)	0,42	0,38	0,46	14,05	0,89	60,94 (<0,01)	-0,012	1,19

ddt: días después del trasplante; C.V. coeficiente de variación

A los 71 ddt, se encontró un acumulado de 612,0 grados-día. La etapa de desarrollo estuvo comprendida entre los 8,4 y 217,7 grados-día mientras que la de madurez estuvo entre 226,1 y 433,4 grados-día. La etapa de cosecha y senescencia comenzó a los 442,4 y terminó a los 612,0 grados-día (Figura 17B).

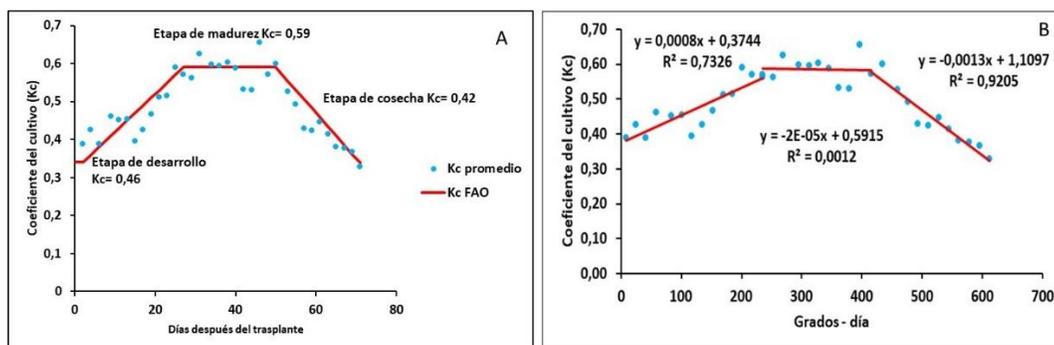


Figura 17. Curva promedio del coeficiente de cultivo (Kc) para albahaca (*Ocimum basilicum* L.).

A. En función de días después del trasplante. B. En función de grados-día

Se han reportado valores de Kc, similares a los hallados en el presente estudio, para diferentes cultivos como por ejemplo: 0,65 para cebolla (López-Urrea *et al.*, 2009), 0,22 – 1,05 para azafrán (Azizi-Zohan *et al.*, 2008), 0,55 – 1,09 para lechuga (Fernández-Pacheco *et al.*, 2014), 0,52 – 1,09 para melón (Shukla *et al.*, 2014), 0,82 para coliflor y 0,70 para col roja (Sahin *et al.*, 2009). López-Urrea *et al.* (2012) encontraron valores de Kc entre 0,60 y 0,75 para viñedos de tempranillo y los menores valores fueron hallados en el año donde se presentó la menor cobertura del suelo. Este fenómeno se atribuyó a que el componente de evaporación del suelo de la ETc después de aplicaciones de agua (precipitación o riego), puede ser alto al inicio del crecimiento, cuando la fracción de cobertura vegetal es mínima. Los bajos valores de Kc también puede atribuirse a que algunas plantas pueden desarrollar mecanismos de resistencia a la sequía, lo que se traduce en menor consumo de agua, como es el caso del cereal tef (*Eragrostis tef*) cultivado en zonas secas de Africa, cuyos valores de Kc varían entre 0,4 en etapa de senescencia y 1,0 en la etapa de madurez (Araya *et al.*, 2011). Sin embargo, Ojeda-Silvera *et al.* (2013) estudiaron 20 variedades de albahaca y encontraron que la variedad genovesa es una de las que menos resistencia presenta al estrés hídrico, en especial en sus etapas tempranas de crecimiento, puesto que afecta directamente la elongación y división celular.

En la etapa de crecimiento y desarrollo de la albahaca el consumo promedio de agua fue de $2,98 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ($74,4 \text{ mm}$). El mayor consumo de agua ocurrió en su etapa de madurez con valor aproximado promedio de $4,87 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$, ($121,8 \text{ mm}$ en total), el cual fue 38,9% mayor que la etapa anterior. En la etapa de cosecha y comienzo de la senescencia, el consumo de agua fue de $3,16 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ($63,2 \text{ mm}$ en total) reduciendo el consumo hídrico en 48,1% con respecto a la etapa fenológica anterior. De acuerdo con Bekhradi *et al.* (2015), este menor consumo de agua permite la concentración de aceites y metabolitos en las hojas, muy apetecidos en la industria. Similares resultados fueron reportados por Jerez y Barroso (2002) quienes encontraron que reponiendo el 100% de la lámina de agua correspondiente a la evaporada en la semana anterior, la albahaca blanca redujo el potencial hídrico foliar de $-0,6 \text{ MPa}$ en la etapa de madurez a $-1,4 \text{ MPa}$ en la etapa de senescencia, lo que se manifestó en menor consumo de agua y mayor porcentaje de MS.

2.5. CONCLUSIONES

Las curvas de Kc determinada en cada lisímetro siguieron modelos lineales en cada etapa fenológica para ambos cultivos. Los valores medios de Kc hallados para estevia fueron 0,86 para la etapa de crecimiento y desarrollo ($4,57 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$), 1,24 para la etapa de madurez ($7,30 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$) y 0,85 para la etapa de cosecha y senescencia ($4,28 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$). En el caso de la albahaca, los valores medios de Kc hallados fueron 0,45 para la etapa de crecimiento y desarrollo ($2,98 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$), 0,59 para la etapa de madurez ($4,87 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$) y 0,42 para la etapa de cosecha y senescencia ($3,16 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$). Ambas curvas en su etapa de madurez no se ajustaron a la curva típica de Kc descrita por la FAO.

3. PLAN DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA PARA LOS CULTIVOS DE ESTEVIA (*Stevia rebaudiana* Bert.) Y ALBAHACA (*Ocimum basilicum* L.)

En el presente capítulo se presenta una introducción a la FN con énfasis en el uso de FLL y la fertilización en plantas aromáticas. Se muestra el objetivo del capítulo, los materiales y métodos empleados, los resultados de la mejor dosis de FN en estevia y albahaca, las tasas de mineralización de los abonos orgánicos empleados y las mejores fuentes de FLL también son descritos, con el fin de poder establecer un plan de fertilización para las dos especies estudiadas. Por último, se muestran las conclusiones del capítulo.

3.1. INTRODUCCIÓN

En los años 50 la producción total de fertilizantes nitrogenados era de 4,8 Mton·año⁻¹, donde el 77% se fabricaban por el proceso Haber – Bosch y para el 2016 la producción subió a 181 Mton·año⁻¹, siendo los países de India y China los mayores productores (FAO, 2017; IFIA, 2013). Los fertilizantes nitrogenados suministran más de la mitad del N mundial demandado por los cultivos y su utilización asegura la alimentación de cerca del 45% de la población mundial (Smil, 2011). Su aplicación en dosis adecuadas ha aumentado la MOS y el NTS, al incrementar la biomasa y los residuos de cosecha (Jackson *et al.*, 2012) lo que se constituye en un importante sumidero de carbono (Andreu *et al.*, 2006). Sin embargo, las eficiencias de aplicación y utilización del N en los sistemas agrícolas están por debajo del 50%, lo que ha llevado a la utilización de nuevas alternativas como el uso de FLL. Existen varios estudios relacionados con el uso de FLL y sus beneficios en diferentes sistemas productivos como flores (González *et al.*, 2007), maíz (Barrios *et al.*, 2012; Quintanilla *et al.*, 2013), avena (Florez *et al.*, 2007), trigo (Hadas *et al.*, 2004) y pastos (Moreno *et al.*, 2007).

Los abonos orgánicos también pueden ser considerados como FLL al suministrar el N gradualmente de acuerdo a su tasa de descomposición. Las DN aplicadas deben ser de acuerdo a la habilidad del material para liberar N (N potencialmente mineralizable), que complementen o incluso reemplacen la FN y que está en función principalmente de los componentes solubles y la relación C/N, en donde a menor componentes solubles y amplias relaciones C/N, menos N será mineralizado (Hadas *et al.*, 2004). Sin embargo, su composición es muy particular (DNP, 2009) y está en función de la calidad de las materias primas, del proceso de compostaje y el manejo de almacenamiento (Hirel *et al.*, 2011), lo que conlleva a que cuando se requiera realizar balances de N para definir dosis adecuadas, se recurra a valores y tasas de mineralización teóricos de contenidos de N (Cavero *et al.*, 2003). Además, la eficiencia de uso es baja puesto que alrededor del 50% de los abonos orgánicos se pierden en el almacenamiento y transporte y otro 25% se pierde después de la aplicación en el suelo (Hirel *et al.*, 2011).

La mayoría de los composts de residuos vegetales utilizados en la agricultura en condiciones controladas, poseen tasas de descomposición menores al 35% en el primer año (Burbano, 1998) mientras que los estiércoles pueden alcanzar tasas hasta del 70% en el mismo periodo de tiempo (Andreu *et al.*, 2006). Las aplicaciones periódicas de abonos orgánicos por largo tiempo permiten incrementar el contenido de MOS, aumentar la eficiencia en el suministro del N (Hadas *et al.*, 2004) y reducir el uso de importantes cantidades de fertilizantes minerales (IDAE, 2007).

El N potencialmente mineralizable hace referencia a la cantidad máxima de N disponible que puede liberar un abono orgánico después del proceso de mineralización llevado a cabo por los microorganismos del suelo. Se determina a partir de la cuantificación de N mineralizado disponible en el tiempo. La cantidad de N mineralizado por unidad de tiempo se conoce como la tasa de mineralización y permite establecer el potencial de liberación de N de un abono orgánico, así como el tiempo adecuado de aplicación para garantizar el suministro de N a las plantas. Diversos modelos matemáticos se han estudiado para describir la mineralización del N en abonos orgánicos a partir de datos experimentales obtenidos en procesos de incubación (Tabla 9). La mayoría de ellos calculan la cantidad de N mineralizado (Nm) en un tiempo determinado (t), a partir de una cantidad de N orgánico

potencialmente mineralizable (No), siguiendo modelos matemáticos lineales y no lineales, donde las constantes son propias del abono en cuestión.

Tabla 9. Modelos matemáticos utilizados para el estudio de la mineralización del N de abonos orgánicos.

Modelo	Lineal/No lineal/linealizable	Ecuación	Autores
Simple exponencial	No lineal	$N_m = N_o(1 - e^{-kt})$	Stanford y Smith (1972)
Doble exponencial	No lineal	$N_m = N_o S(1 - e^{-ht}) + N_o(1 - S)(1 - e^{-kt})$	Molina <i>et al.</i> (1980) y Inubushi <i>et al.</i> (1985)
Simple exponencial	No lineal	$N_m = N_o(1 - e^{-kt^b})$	Marion <i>et al.</i> (1981)
Hiperbólico	No lineal	$N_m = \frac{N_o t}{\left(\frac{1}{t^2} + t\right)}$	Juma <i>et al.</i> (1984)
Simple exponencial	No lineal	$N_m = N_1 + N_o(1 - e^{-kt})$	Jones <i>et al.</i> (1984)
Potencial	linealizable	$N_m = At^b$	Broadbent (1986)
Simple exponencial lineal	No lineal Lineal	$N_m = N_1(1 - e^{-k_1 t}) + k_0 t$ $N_m = A + Bt$	Cabrera (1993) -
Polinomial de segundo orden	linealizable	$N_m = A + Bt + Ct^2$	-
Simple exponencial	linealizable	$N_m = Ae^{kt}$	-

Nm= N mineralizado; No= N orgánico potencialmente mineralizable; t=tiempo; S=N orgánico fácilmente mineralizable; (1-S) = N orgánico recalitrante; N1= N mineralizado en el suelo inicial; k, h, k₁, k₀, A, B y C son constantes.

Actualmente se aplican tasas altas de compuestos nitrogenados, por encima de 100 kg·ha⁻¹, pero esta tendencia ha ido cambiando debido al elevado precio de los fertilizantes determinado por los altos costos energéticos y los crecientes impactos ambientales (Smil, 2011). La determinación de la adecuada DN es indispensable para evitar la sobrefertilización, disminuir los costos de producción, reducir contaminación y restringir el consumo de lujo por parte de las plantas (Rivacoba *et al.*, 2013). El rendimiento es directamente proporcional al suministro de N, hasta alcanzar un valor máximo de cosecha a partir del cual tiende a disminuir con el aumento de la fertilización (Cavero *et al.*, 2003). En países desarrollados, los agricultores fertilizan con dosis por debajo o iguales al óptimo económico, para minimizar la lixiviación del N y la subsecuente presión ambiental (Delin & Stenberg, 2014). Sin embargo, en muchos cultivos tropicales se desconocen estos puntos óptimos económicos, lo que ha llevado a la sobrefertilización, reduciendo la fertilidad de los suelos, incrementado el riesgo de pérdida de nutrientes a través de la erosión y el riesgo de lixiviación y contaminación (Tilman *et al.*, 2002).

Son pocos los estudios relacionados con la FN de plantas aromáticas y medicinales; al igual que los hortícolas, los cultivos de aromáticas ofrecen un alto riesgo de contaminación ambiental por nutrientes y más aquellos con riego que emplean altas dosis de fertilizantes (Schenk, 2006). Las DN utilizadas para la producción de aromáticas a nivel mundial están entre 50 y 150 kg·ha⁻¹ de N, utilizando fuentes inorgánicas al inicio de los cultivos y aplicadas de forma localizada. La Tabla 10 muestra algunas experiencias, tanto nacionales como internacionales, relacionadas con la FN de estevia y albahaca, con las cuales se obtuvieron los mejores rendimientos. Vale la pena resaltar que los estudios mencionados solo consideran la respuesta del cultivo y no consideraron la posible lixiviación de N por cuenta de la fertilización.

Las plantas aromáticas actúan como “ingenieros ecosistémicos” que, al ser utilizadas como cultivo asociado, contribuyen a través de su biomasa y de los exudados de sus raíces, a incrementar el N orgánico y disponible del suelo, debido al aumento de la actividad enzimática de la ureasa y la proteasa y al incremento de poblaciones de microorganismos relacionados al ciclo del N, como bacterias nitrificantes, desnitrificantes y fijadoras (Chen *et al.*, 2014). En especial, estos autores encontraron que la albahaca incrementó los contenidos de N orgánico y N disponible en 11,8% y 16,3% respectivamente de un suelo franco arenoso debido posiblemente al aumento de la actividad enzimática de la proteasa y la ureasa.

Tabla 10. Experiencias relacionadas con la FN en estevia y albahaca.

Especie	DN kg·ha ⁻¹	Fertilizante	MF Mg·ha ⁻¹	Fuente
Albahaca	100	Urea	1,7	Cabanillas <i>et al.</i> (2009)
		Lombricompost	2,7	
Albahaca	50	Solución nutritiva	4,3	Contreras y Gómez (2008)
Albahaca	75	Triple 15	13,9	Cenoz y Burgos (2000)
	150		16,8	
	300		18,6	
Albahaca	300	Nitrato de amonio	18,0	Sifola & Barbieri (2006)
Albahaca	17,3	Bocashi	2,6	López (2005)
	34,6		2,7	
	51,8		3,7	
Estevia	50	Inorgánico	0,25*	Clementelli & Zevallos (2009)
	100	Inorgánico	0,30*	
	75	Lombricompost	0,25*	
Estevia	15	Inorgánico	0,15*	Apaza (2003)
	30		0,16*	
	60		0,23*	
Estevia	100	Urea	0,65*	Bonilla <i>et al.</i> (2007)
	100	Compost	0,39*	
	100	Gallinaza	0,32*	
Estevia	70	inorgánico	1,0**	Galván <i>et al.</i> (2003)
	170		2,5**	
Estevia	180	inorgánico	1,2**	Ramírez (2011)
Estevia	120	urea	0,7*	Cortéz (2012)
	80		0,9*	

*Rendimiento en MS de hoja en el segundo corte; ** rendimiento primer año

3.2. OBJETIVO

- ✓ Definir un plan de FN para estevia (*Stevia rebaudiana B*) y albahaca (*Ocimum basilicum*) teniendo en cuenta la aplicación de FLL inorgánicos y orgánicos, y reducir la lixiviación de N.

3.3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.3.1. Localización

Los experimentos se realizaron en los invernaderos del Laboratorio de Aguas y Suelos Agrícolas LASA de la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR) de la Universidad del Valle, ubicados en el municipio de Santiago de Cali, Valle del Cauca, a una altura de 979 msnm; en latitud 3° 22' 22.29" N y longitud 76° 31' 49.22" O. Los valores de temperatura y precipitación promedio anual fueron de 25 °C y 909 mm respectivamente.

3.3.2. Descripción del suelo

El suelo utilizado provino de la finca "Las Palmas" (N 03 26.767' W 076 27.551'), vereda Cauca Seco, corregimiento de Juanchito (Candelaria) en el Valle del Cauca (Colombia). Las propiedades del suelo utilizado se mostraron en el capítulo 2 (Tabla 5).

3.3.3. Caracterización de los abonos orgánicos

Los abonos orgánicos fueron caracterizados siguiendo la norma técnica NTC 5167 (2011), los cuales presentaron pH ligeramente alcalino, alta CIC y baja relación C/N (Tabla 11).

Tabla 11. Caracterización de los abonos orgánicos utilizados en la experimentación de uso de FLL en estevia y albahaca.

Abono orgánico	pH	CIC cmol(+)- kg ⁻¹	CO %	NT %	C/N	K %	Ca %	Mg %
Lombricompost	7,3	24,6	13,0	1,22	13,0	1,0	3,8	1,1
Gallinaza compostada	7,5	34,5	16,0	1,43	12,3	1,2	11,2	0,4

CIC = capacidad de intercambio catiónico; CO = carbono orgánico; NTS = Nitrógeno total

3.3.4. Construcción y calibración del tanque evaporímetro

Se construyó un tanque evaporímetro clase A de de 0,60 m de diámetro y 0,19 m de altura el cual se ubicó a 0,10 m de la superficie del suelo (Figura 18). El tanque evaporímetro se construyó en hierro galvanizado, y se cubrió con una capa pintura de aluminio de color blanco en su interior y exterior, su fondo se pintó de color negro según especificaciones de Allen *et al.* (2006). La calibración del tanque evaporímetro se realizó registrando el valor diario de evaporación, tanto del prototipo como del tanque ubicado en la estación meteorológica de la Universidad del Valle sede Meléndez.



Figura 18. Calibración del tanque evaporímetro. Tanque de la estación meteorológica (izquierda) y tanque prototipo (derecha).

El registro de la evaporación se realizó utilizando un limnómetro de gancho ubicado en forma perpendicular al tanque evaporímetro, en el cual, por medio de una regla milimetrada se pudo cuantificar la diferencia de nivel diariamente. Con el registro de los datos de ambos tanques, se realizó una regresión lineal y se obtuvo una confiabilidad en la correlación de los datos registrados; con ello se garantizó que la lectura de evaporación registrada en el tanque evaporímetro del prototipo, se ajustaría a la lectura real de evaporación registrada por el tanque evaporímetro clase A ubicado en las instalaciones de la Universidad del Valle. El coeficiente de tanque es un factor numérico que multiplica la evaporación y depende de la humedad relativa, la velocidad del viento y del tipo de cobertura que hay a su alrededor, que pueden afectar los registros de evapotranspiración de referencia (ET_o). El factor utilizado fue de 0,75 y fue determinado siguiendo las recomendaciones de Allen *et al.* (2006). El coeficiente de regresión alcanzado fue de 0,9764 ($p < 0,01$).

3.3.5. Diseño y construcción de Lisímetros de Drenaje (LD)

Los LD consistieron en recipientes plásticos de 0,25 m de altura por 0,20 m de diámetro, recubiertos con malla y grava donde se dispuso el suelo (Figura 19). El recipiente se perforó en la parte inferior lateral y se instaló una manguera conectada a un segundo recipiente debidamente tapado, dentro del cual se ubicó un vaso graduado para la recolección del lixiviado. Se estableció una diferencia de altura entre el lisímetro y el recipiente recolector para favorecer el flujo. Cada lisímetro fue inclinado con un ángulo de 10° con el fin de garantizar el flujo del total del lixiviado. La recolección se realizó diariamente y la muestra fue guardada en condiciones refrigeradas hasta cuando se contó con suficiente cantidad de lixiviado (30 mL) para ser analizado.



Figura 19. LD empleados para la recolección de nitrato lixiviado en plantas de estevia y albahaca.

3.3.6. Diseño experimental para la determinación de Dosis Nitrogenada (DN) para los cultivos de estevia y albahaca.

Se estableció un diseño completamente al azar, donde se propusieron 5 tratamientos con tres repeticiones cada uno para cada cultivo. Los tratamientos establecidos fueron: testigo sin ninguna aplicación (T), DN de 50, 100, 150 y 200 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (T50, T100, T150 y T200 respectivamente). Estas dosis fueron escogidas con el fin de reducir la cantidad de fertilizante usado sin afectar las propiedades agronómicas, se reduzcan las pérdidas por lixiviación y afecte lo menos posible las propiedades del suelo. Se utilizó urea como fuente nitrogenada, la cual contenía el 46% de N y fue adicionada tres días antes con la lámina de riego necesaria para llevar al suelo a CC (aproximadamente 100 mL). Se realizaron aplicaciones de P_2O_5 y K_2O de 25 y 80 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para estevia (Galván *et al.*, 2003) y de 65 y 200 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ respectivamente para albahaca (Bonilla y Guerrero, 2010). La unidad experimental consistió en un lisímetro de drenaje, con una planta en su interior a la cual se le realizaron todas las mediciones. Las DN utilizadas fueron escogidas con base a los requerimientos de plantas de estevia (Casaccia y Álvarez, 2006) y de albahaca (Bonilla y Guerrero, 2010).

Las variables de respuesta evaluadas fueron N-amoniaco lixiviado medido, para el caso de la estevia, en tres momentos durante el cultivo (a los 29, 85 y 115 días después del trasplante, ddt) y para el caso de la albahaca en dos momentos (a los 24 y 77 ddt). La determinación se hizo tomando un volumen de 30 mL de lixivados, el cual se colocó en un tubo de destilación, se le adicionó MgO previamente seco y se destiló, utilizando NaOH al 40%; luego se capturó el N volatilizado en una solución de H_3BO_3 e indicador a base de bromocresol verde y rojo de metilo disueltos en etanol y se realizó la cuantificación del amonio usando H_2SO_4 0,001 N en la titulación. Posteriormente cuando el tubo de destilación se enfrió, se adicionó aleación de Devarda y se volvió a destilar, siguiendo el mismo protocolo anterior para luego realizar la cuantificación de la concentración de nitrato (IGAC, 2006). También se midió el volumen total de lixivados recogidos por el periodo de cuatro meses y se calculó la cantidad de amonio y nitratos por unidad de área.

Las variables del suelo determinadas fueron: pH por el método potenciométrico en relación suelo: agua 1:1, conductividad eléctrica (CE) determinada por medio del conductímetro relación 2:1, MOS, por el método de Walkley – Black se determinó el carbono orgánico oxidable, usando como oxidante el dicromato de potasio y el ácido sulfúrico y dejando reposar la muestra por 24 horas; este carbono se multiplicó por el factor de Van Bemmelen de 1,724 para determinar la materia orgánica; este factor indica que en 100 g de materia orgánica, hay 58 g de carbono orgánico. Posteriormente, se realizó las lecturas en el espectrofotómetro a 645 nm, utilizando una curva patrón de glucosa anhidro. El NTS se determinó por el método de Kjeldahl, donde una muestra de suelo se puso en digestión con ácido sulfúrico R.A. y catalizadores compuestos por sulfato de cobre y sulfato de potasio, por 2,5 horas a 350 °C hasta alcanzar coloración transparente. Seguidamente, se destiló con soda al 40% y se recogió el N volatilizado en ácido bórico con indicador. La titulación se realizó con ácido sulfúrico (IGAC, 2006).

En la planta se midió AP (medida desde la base del tallo hasta el ápice, diámetro de tallo (a 0,2 m de la superficie del suelo), MF y MS, una vez cosechada la parte aérea de la planta, fue pesada y secada en estufa a 55 °C por 24 horas, porcentaje de MS calculado a partir del peso de MF y MS, N foliar (NF) (método Kjeldahl) realizando predigestión por 24 horas con H₂SO₄ R.A. y catalizadores compuestos por sulfato de cobre y sulfato de potasio. Posteriormente, se realizó la digestión sometiendo la muestra foliar a 250 °C por 30 minutos y luego a 350 °C por dos horas, hasta lograr que las muestras quedaran verdes translúcidas. Luego, se realizó su destilación usando soda al 40% y recogiendo el N amoniacal en ácido bórico con indicador. El NF fue cuantificado usando ácido sulfúrico en la titulación.

También se midió el rendimiento de hoja seca en tonelada por hectárea. Se consideraron los indicadores “eficiencia aparente de recuperación de N (ER)” y “eficiencia interna de utilización (EI)” propuestos por Dobermann (2007). También se calculó la eficiencia en el uso del agua (EUA) siguiendo los lineamientos de Steduto *et al.* (2012). La EUA se determinó como la relación entre el rendimiento de masa fresca y masa seca obtenida y la cantidad de agua utilizada.

3.3.7. Diseño experimental para la determinación de la curva de mineralización del N de abonos orgánicos: lombricompost y gallinaza.

El diseño experimental fue completamente al azar unifactorial (Tipo de abono orgánico) con 6 tratamientos y tres repeticiones para un total de 18 unidades experimentales. Los factores a evaluar fueron los abonos orgánicos lombricompost y gallinaza y los niveles fueron 200, 250 y 300 kg·ha⁻¹ de N contenido en cada uno de ellos. El suelo fue tamizado a 2 mm y fue dispuesto en bolsas de polietileno de 10 cm de diámetro x 15 cm de altura con 250 g de suelo. Cada bolsa constituyó una unidad experimental. Las bolsas fueron dispuestas al azar en condiciones controladas bajo invernadero y fueron saturadas con agua, para dejar drenar por 24 horas hasta alcanzar la humedad de CC (37%) (Figura 20). Posterior a esto, se realizó un monitoreo diario con un medidor de humedad volumétrica Time Domain Reflectometry (TDR) para mantener la humedad a 2/3 de la humedad de CC (Ribó *et al.*, 2003).



Figura 20. Unidades experimentales para el estudio de la mineralización de abonos orgánicos.
Cortesía: Brenda Marcela Montoya

Con base en el contenido de N de cada abono, se calcularon los pesos correspondientes a DN de 200, 250 y 300 kg·ha⁻¹ de N con una balanza de 0,001 g de precisión y se adicionó superficialmente las respectivas DN (primeros 7 cm) a la respectiva unidad experimental. Las bolsas fueron incubadas aeróbicamente por 16 semanas, realizando la determinación de N-amoniacal cada semana hasta la sexta semana y luego cada dos semanas hasta la semana 16. La extracción de muestras se realizó de los primeros cuatro centímetros de la superficie del suelo, para lo cual se homogenizó y cuarteó la muestra del suelo y se extrajo una submuestra de 0,5 g.

Para la determinación de la concentración de N mineral se empleó el método de extracción Keeney y Nelson, el cual consiste en adicionar 50 mL de KCl 2N a la muestra de 5 g de suelo seco agitar por una hora a 180 r.p.m. y filtrar. De este filtrado, se tomó una alícuota de 10 mL, se adicionó 0,2 g de MgO para la determinación del contenido de amonio y se destiló. A la misma muestra destilada, una vez fría se le adicionó 0,2 g de aleación

de Devarda para la determinación de la concentración de nitrato. Los destilados fueron capturados en H_3BO_3 con indicador mixto y finalmente se titularon con H_2SO_4 0.005 N (IGAC, 2006).

A los datos obtenidos se les realizó verificación de su distribución normal y homogeneidad de varianzas. Se realizaron análisis de varianza (ANOVA) de una sola vía y prueba de Tukey (POSTANOVA) para determinar diferencias significativas entre tratamientos. Para las variables de lixiviación (amonio, nitrato y nitrógeno total) se realizó ANOVA de medidas repetidas. A partir de los valores promedio de N mineral se construyeron las curvas de mineralización, que presentan la evolución del contenido de N mineral en el tiempo; las curvas fueron ajustadas a los modelos de Stanford y Smith (1972) y Broanbent (1986). El ajuste y estimación de parámetro se realizó empleando el software R y su librería START, tomando como medidas de ajuste el Cuadrado Medio del Error (CME) y el coeficiente de regresión R^2 .

3.3.8. Diseño experimental para la evaluación de Fertilizantes de Liberación Lenta (FLL) para la fertilización nitrogenada (FN) de estevia y albahaca.

El diseño del experimento utilizado fue unifactorial completamente al azar. Se contó con 14 tratamientos los cuales son descritos en la Tabla 12; se evaluaron dos abonos de rápida liberación (nitrato de calcio (NC) con 15,5% de N-amoniaco y 18,5% de Ca^{2+} y sulfato de amonio (SA) con 21% de N-amoniaco y 24% de S respectivamente), urea recubierta con azufre (U) (con 40% de N y 6% de S) y dos abonos orgánicos (lombricompost y gallinaza) cuyas principales características se presentaron en la Tabla 12. Los tratamientos fueron: testigo sin ninguna aplicación (T), nitrato de calcio en dosis de $150\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (NC), sulfato de amonio (SA), urea recubierta (U), en dosis de 100, 150 y $200\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ y gallinaza (G) y lombricompost (L) en dosis de 200, 250 y $300\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Cada tratamiento tuvo tres repeticiones para un total de 42 unidades experimentales; cada unidad experimental consistió en un lisímetro de drenaje donde fueron dispuestas las plantas (Figura 21). Cada lisímetro fue llenado con suelo previamente tamizado por 2 mm y una plántula de estevia o de albahaca, de acuerdo a cada experimento.

Tabla 12. Descripción y DN de los tratamientos utilizados en el experimento de uso de FLL para estevia y albahaca.

Tratamiento	Descripción	DN ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)
T	Testigo absoluto	0
NC	Nitrato de calcio	150
U100	Urea de liberación lenta	100
U150	Urea de liberación lenta	150
U200	Urea de liberación lenta	200
SA100	Sulfato de amonio	100
SA150	Sulfato de amonio	150
SA200	Sulfato de amonio	200
L200	Lombricompost	200
L250	Lombricompost	250
L300	Lombricompost	300
G200	Gallinaza	200
G250	Gallinaza	250
G300	Gallinaza	300



Figura 21. Disposición de LD y montaje de sistema de riego localizado para estevia.

En el caso de la estevia, los fertilizantes orgánicos y U se aplicaron 8 días antes del trasplante mientras que los inorgánicos se aplicaron en dos fracciones cada una con el 50% de la DN, al momento del trasplante y 30 días después del trasplante. Para la albahaca los abonos orgánicos fueron aplicados a los 8 ddt mientras que los fertilizantes convencionales (NC, SA) fueron adicionados disueltos en el agua de riego en el momento del trasplante. La urea recubierta (U) fue adicionada tres días antes del trasplante para ambos cultivos.

Como variables de respuesta se determinó el porcentaje de NF, NTS por el método de Kjeldahl al final del experimento y contenido de nitratos y amonios en agua de lixiviación por el método de extracción de KCl 2N. Se realizaron dos mediciones durante el ciclo del cultivo de estevia, a los 45 y 90 ddt y de albahaca a los 24 y 55 ddt. Las determinaciones se realizaron siguiendo los protocolos de IGAC (2006).

También se consideraron variables como el pH, CE y MOS, descritos anteriormente. Así mismo, se realizaron mediciones a propiedades agronómicas de la planta como AP, diámetro de tallo, masa fresca y seca aérea, porcentaje de masa seca y rendimiento en Mg·ha⁻¹. Se consideraron los indicadores ER y EI propuestos por Dobermann, (2007)

3.3.9. Labores culturales

Siembra: Los esquejes de estevia variedad Morita fueron suministrados por la empresa Makrostevia de la ciudad de Pereira (Colombia). Estos esquejes fueron sembrados de a uno por lisímetro a 10 cm de profundidad. Las distancias entre LD fueron de 0,30 m. Para la albahaca variedad genovesa las semillas fueron suministradas por la empresa Fercon y sembradas en bandejas de germinación por un periodo de 20 días. Una vez las plántulas consiguieron los 0,20 m de AP fueron trasplantadas a los LD, los cuales fueron ubicados a una distancia de 0,20 m entre ellos.

Podas: Para la estevia la labor de la poda consistió en retirar el ápice o yema terminal de cada una de las ramas laterales con el fin de estimular el crecimiento arbustivo de la planta, esta poda se denomina de formación. La primera poda de formación se realizó 10 ddt y posterior a ella se realizaron las podas de formación cada 20 días, preferiblemente en horas de la mañana para evitar pérdida de agua. Para la albahaca se realizaron podas de formación cada 15 días.

Riego: Para los experimentos relacionados con el cálculo de la mejor DN, la lámina de riego utilizada fue calculada a partir de la lectura registrada en el TDR y la humedad de CC. Se utilizó un coeficiente de agotamiento del 10%, es decir, la decisión de regar se basó al alcanzar el 90% de la humedad de CC, para evitar la pérdida de agua excesiva del suelo que favorece la aparición de grietas que contribuyen al flujo preferencial del agua.

Para los experimentos de evaluación de FLL nitrogenados, se aplicó una lámina de riego calculada a partir de los requerimientos hídricos de la planta, estimados con el tanque evaporímetro y los Kc descritas en el capítulo anterior. Para determinar el volumen de agua que se aplicó a cada tratamiento se utilizó la ecuación 6.

Ecuación 6. Cálculo del volumen de riego

$$\text{Volumen de riego} = E * Kc * C_x * A$$

Dónde:

E: Evaporación en mm, medida en el tanque evaporímetro.

Kc: coeficiente único del cultivo determinado para cada etapa.

Cx: Coeficiente del tanque evaporímetro. De acuerdo a su disposición en el invernadero el coeficiente utilizado fue de 0,75 (Allen *et al.*, 2006).

A: Área de la sección transversal del lisímetro.

Los volúmenes de riego utilizados se suministraron de forma manual para ambos cultivos, en estevia estuvieron entre 50 y 330 mL·planta⁻¹, y en albahaca estuvieron entre 70 y 500 mL·planta⁻¹. En los días más calurosos, cuando las plantas presentaron estrés hídrico, fue necesaria aplicación de riego suplementario, utilizando la lámina necesaria para llevar el suelo a la humedad de CC.

Control de plagas y enfermedades: Para la estevia, el control de plagas se realizó de forma manual, identificando oportunamente las plantas afectadas y procediendo a su limpieza, eliminando todo rastro de la plaga en la planta. Durante el ciclo del cultivo no se presentó ninguna enfermedad que afectara el correcto desarrollo de la investigación. Para la albahaca se realizaron fumigaciones con extracto de ajo para el control de pulgones (*Mizus ersicae*).

3.3.10. Análisis estadístico

La verificación de la distribución normal de los datos se hizo siguiendo la prueba de Shapiro Wilk y la homogeneidad de varianzas se determinó con la prueba de Levene. Se realizó un análisis estadístico descriptivo y análisis de varianza de una vía para determinar diferencias significativas entre tratamientos. Para las variables que siguieron distribución normal y tuvieron varianzas homogéneas se realizó un análisis de postanova (Test de Tukey al 95% de confiabilidad). Para el caso de las variables que no obtuvieron homogeneidad de varianza se realizó la comparación de medias mediante la prueba de Dunnett. Para las variables que no siguieron distribución normal, se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis para verificar la distribución homogénea entre tratamientos y la prueba de las medianas para determinar la existencia de diferencias significativas. Para las variables “amonio lixiviado”, “nitrate lixiviado” y nitroneno amoniaco lixiviado” se realizó ANOVA de medidas repetidas. Se utilizó el programa estadístico IBM SPSS Statistics 20.

3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se muestran los resultados encontrados para la mejor determinación de la DN para estevia y albahaca, la mineralización de los abonos orgánicos y la mejor fuente de FLL para ambos cultivos.

3.4.1. Dosis Nitrogenada (DN) adecuada para estevia

Para la determinación de la mejor DN en estevia, se tuvo en cuenta el efecto de la dosis en la lixiviación de N, en las propiedades agronómicas de la planta, en las propiedades del suelo después del corte de la planta y en las eficiencias de fertilización y de uso del agua.

3.4.1.1. Efecto de la Dosis Nitrogenada (DN) en la lixiviación de Nitrógeno.

Para los tres tiempos, la cantidad de amonio lixiviado fue menor que la cantidad de nitrato lixiviado (Tabla 13). Se encontraron diferencias estadísticas entre tiempos de muestreo para la concentración de amonio y de N-amoniaco total (anexo 5). La pérdida de N total por lixiviación estuvo entre 9,98 y 32,00 mg·L⁻¹ a los 29 ddt, encontrándose diferencias significativas entre las DN aplicadas. La menor pérdida de amonio ocurrió para la mayor DN evaluada, mientras que la mayor pérdida, ocurrió en el tratamiento T, sin diferencias significativas para las demás DN. Caso contrario ocurrió con el nitrato donde las mayores DN (150 y 200 kg·ha⁻¹) fueron las que presentaron la mayor lixiviación. Estos resultados indican que a los 29 ddt, el proceso de mineralización, es decir, la transformación de amonio a nitratos ya se había realizado. Este proceso se vio favorecido por condiciones ambientales, como por ejemplo el pH, el cual a valores entre 7 y 8, como los presentes en los suelos de cada tratamiento, la actividad microbiana es estimulada y se acelera la nitrificación (Bertola *et al.*, 2004).

Tabla 13. Efecto de la DN en la lixiviación de amonio, nitrato y total amoniacal a los 29, 85 y 115 días después del trasplante (ddt) en estevia.

Tratamientos	29 DDT		
	NH ₄ ⁺ mg·L ⁻¹ (F= 2,24; p=0,14) ¹	NO ₃ ⁻ mg·L ⁻¹ (F=7,17; p=0,00) ²	N-total mg·L ⁻¹ (F= 4,62; p=0,02) ¹
T	7,26±3,03a	9,46±4,18b	16,72±7,19ab
T50	3,11±0,23ab	7,52±0,91b	10,63±1,13b
T100	3,11±0,23ab	6,87±1,37b	9,98±1,53b
T150	4,80±0,72ab	27,22±2,37a	32,00±2,79a
T200	1,81±0,13b	26,70±7,11a	28,52±7,18a
Tratamientos	85 DDT		
	NH ₄ ⁺ mg·L ⁻¹ (p= 0,138) ³	NO ₃ ⁻ mg·L ⁻¹ (F=1,74; p=0,22) ⁴	N-total mg·L ⁻¹ (p=0,37) ³
T	6,61±3,90a	4,92±3,19b	11,54±7,07a
T50	3,24±0,57a	12,05±2,34ab	15,29±1,88a
T100	2,98±0,52a	7,78±2,17ab	10,76±2,52a
T150	4,93±0,13a	13,09±5,71ab	18,02±5,77a
T200	4,80±0,72a	16,46±2,52a	21,26±3,03a
Tratamientos	115 DDT		
	NH ₄ ⁺ mg·L ⁻¹ (p=0,20) ³	NO ₃ ⁻ mg·L ⁻¹ (p=0,31) ³	N-total mg·L ⁻¹ (p=0,37) ³
T	1,04±0,13a	2,72±0,90a	3,76±0,91a
T50	1,68±0,25a	3,24±0,26a	4,92±0,26a
T100	2,20±0,26a	4,02±0,26a	6,22±0,45a
T150	2,33±0,39a	6,22±2,92a	8,56±3,14a
T200	2,46±0,47a	2,33±0,59a	4,80±1,03a

Promedios de tres repeticiones ± error estándar. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas entre las medias. ¹Comparación de medias por la prueba de Duncan al 95% ²Comparación de medias por la prueba de Dunnett al 95%. ³Prueba no paramétrica de Kruskal Wallis y comparación de medianas. ⁴Comparación de medias por la prueba de Dunnett al 90%.

A los 85 ddt, no se encontraron diferencias significativas en la lixiviación de amonio, cuyos valores estuvieron entre 2,98 y 6,61 mg·L⁻¹ correspondientes a las DN de 100 kg·ha⁻¹ de N aplicado y el T respectivamente. La cantidad de nitratos lixiviados fue menor a los encontrados a los 29 ddt, lo que evidencia la importancia de la etapa fenológica de la planta y el desarrollo de sus raíces en la absorción y la lixiviación de N-NO₃. La DN de 200 kg·ha⁻¹ fue la que presentó la mayor lixiviación de nitrato, pero sin diferencias estadísticas con las demás DN, con excepción del testigo quien obtuvo la menor pérdida. La pérdida de N total estuvo entre 10,76 y 21,26 mg·L⁻¹ correspondientes a las DN de 100 y 200 kg·ha⁻¹. Es de resaltar que las DN menores (20 y 10 kg·ha⁻¹) aumentaron la cantidad de nitratos lixiviados, mientras que las mayores DN (150 y 200 kg·ha⁻¹) disminuyeron dicha cantidad. Estos resultados pueden estar asociados a la inmovilización del N que se presenta a concentraciones más altas de N, a pérdidas por volatilización durante los procesos de amonificación y desnitrificación o a fenómenos de fijación ocurridas en las intercapas de los minerales de arcilla de tipo 2:1 presentes en el suelo.

A los 115 ddt se realizó la última medición antes de la primera cosecha y se encontró que la concentración de amonio y nitrato lixiviados fue aún menor que las mediciones en los días anteriores, sin diferencias estadísticas entre los tratamientos. La pérdida de amonio estuvo entre 1,04 y 2,46 mg·L⁻¹ correspondientes al T y T200 respectivamente, mientras que la pérdida de nitrato estuvo entre 2,33 y 6,22 mg·L⁻¹ en correspondencia con T200 y T150. La reducción de N total lixiviado con respecto a la primera medición fue entre 54% y 83% más bajo y fue directamente proporcional a las DN empleadas. Esta reducción está directamente relacionada con la absorción de N por la planta y con la acumulación de N en el suelo.

Cabe destacar que la mayor concentración de amonios en los lixiviados fue encontrada a los 85 ddt en todos los tratamientos, mientras que la de nitratos disminuyó entre el 40% y 90% con el tiempo. A pesar de que las concentraciones halladas en todos los tratamientos no superaron la máxima concentración recomendada por la OMS de 50 mg·L⁻¹ de nitratos (Arauzo y Valladolid, 2013), la presencia de N en los lixiviados implica disminución en las eficiencias de la FN y aumento en los costos de producción.

Los volúmenes de lixiviados recolectados en el periodo de seguimiento del cultivo no presentaron diferencias significativas entre las DN aplicadas, en ningún momento de medición, ni en el total del volumen lixiviado (Figura 24). El manejo del riego tuvo un efecto positivo significativo en la lixiviación del N y en los volúmenes lixiviados. Los valores hallados estuvieron por debajo de los 400 mL, lo que se considera bajo, lo que se debió al control

de la humedad del suelo, sin superar las láminas de riego equivalentes a la humedad de CC. La aplicación de láminas muy altas de riego puede conllevar a pérdidas excesivas de agua y N por lixiviación, como lo encontrado por Urrutia y Daza (2015), quienes encontraron que en cultivos comerciales de estevia, con riego por gravedad, la pérdida de volúmenes de lixiviado estuvo entre 2500 y 3000 mL a los 90 ddt. A pesar de que en un suelo a CC, el agua esta almacenada en los microporos y no debería presentarse percolación; la lixiviación presentada pudo deberse posiblemente a la presencia de flujos preferenciales, que aparecen en los procesos de secado y humedecimiento, en presencia de arcillas expansivas, que alteran la porosidad estructural del suelo (Cerisola *et al.*, 2005). Por lo tanto, para evitar mayores pérdidas de agua y nutrientes por lixiviación, se debe evitar la aparición de dichos flujos preferenciales, mediante el manejo de la humedad del suelo, con coeficientes de agotamiento bajos.

Los resultados hallados sugieren que la aplicación de fertilizante nitrogenado reduce la lixiviación de amonio, pero incrementa la de nitrato. Esto se debe a que los fertilizantes nitrogenados disminuyeron el pH del suelo y favoreció el proceso de nitrificación. Las mayores pérdidas de N-total fueron obtenidas para T50, T100 y T150, sin diferencias significativas entre los tratamientos, debido a la alta variabilidad encontrada (Figura 22).

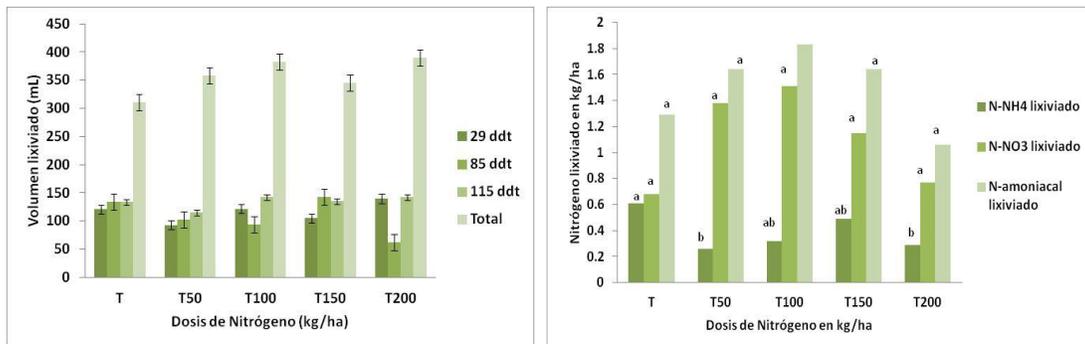


Figura 22. Volumen de lixiviados recogidos y NL total para cada DN en estevia. (Izquierda) A los 29 días después de la siembra (ddt) ($F=0,29$; $p=0,88$), a los 85 ddt ($F=2,85$; $p=0,08$), a los 115 ddt ($F=2,28$; $p=0,13$) y el total recolectado ($F=0,55$; $p=0,70$). Las barras indican el intervalo de confianza para la media. (Derecha) En forma de amonio (N-NH₄⁺) ($F=2,72$; $p=0,09$), nitrato (N-NO₃⁻) ($F=1,08$; $p=0,42$) y amoniacal ($F=0,58$; $p=0,68$). Comparación de medias por prueba de Tukey al 95%.

La pérdida de nitrato total en unidades de kg·ha⁻¹ no fue directamente proporcional con las DN suministrado como se esperaba (Figura 23). Se encontró una relación matemática polinómica de segundo orden con alto coeficiente de regresión entre estas dos variables. Hallando el máximo a la ecuación encontrada, una DN de 94 kg ha⁻¹ es la que mayor pérdida de nitratos se produce (1,43 kg·ha⁻¹), la cual es baja en comparación con otros estudios relacionados con la lixiviación de nitratos (Arias *et al.*, 2009).

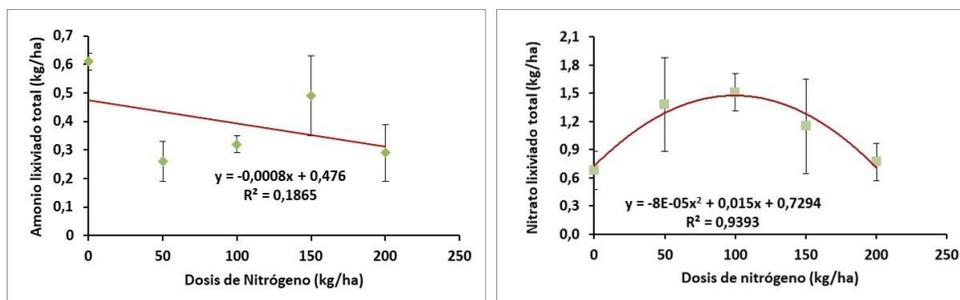


Figura 23. Relación entre la DN aplicada y la lixiviación de amonio y nitrato en estevia. Las barras indican el error estándar.

3.4.1.2. Efecto de la Dosis Nitrogenada (DN) en propiedades agronómicas de estevia:

El efecto de la aplicación de las DN en algunas características agronómicas de la estevia se puede apreciar en la Tabla 14. Las DN de 100, 150 y 200 kg·ha⁻¹ presentaron los mayores valores de AP, diámetro del tallo, MF y MS, porcentaje de MS y rendimientos.

La AP estuvo entre 57,7 y 102,7 cm para el T y T100 respectivamente. La AP más baja encontrada fue para el T, la cual fue estadísticamente diferente de las alcanzadas con T50, T100 y T150. No se Encontraron diferencias entre las dosis evaluadas (T50, T100, T150 y T200). La DN de 100 kg·ha⁻¹ obtuvo una AP 45 cm por encima de las plantas del T y entre 15 y 25 cm por encima de las otras DN. Maniruzzaman *et al.* (2016) en suelos básicos no encontraron diferencias entre las DN de 150, 200, 250 y 300 kg·ha⁻¹ para la AP de estevia, encontrando valores de 90 cm en promedio. Las AP obtenidas estuvieron por encima de los valores promedios reportados por Zetina *et al.* (2014) (28,5 cm), Gusqui *et al.* (2010) (60 cm) y Salgado (2013) (57,8 cm), cuyos cultivos fueron llevados a cabo al aire libre. Los resultados hallados sugieren que el aumento de la temperatura en condiciones de invernadero parece favorecer el crecimiento de la planta, más no el engrosamiento del tallo. Las temperaturas elevadas por encima de 30 °C y la baja luminosidad propician el crecimiento de tallos delgados con mayor área de parénquima y mayor reserva de asimilados que favorecen el desarrollo y crecimiento de las plantas (Ortega *et al.*, 2010).

Tabla 14. Efecto de la aplicación de DN en variables agronómicas de estevia a los 110 ddt.

Tratamiento	AP (cm) ¹	Diámetro de tallo (mm) ¹	MF aérea total (g) ¹	MS total (g) ²	Porcentaje de MS	Rendimiento de hoja fresca (Mg·ha ⁻¹) ²	Rendimiento de hoja seca (Mg·ha ⁻¹) ²
T	57,7±0,04b	4,77±0,19a	47,10±1,57ab	15,93±1,09ab	33,76±1,23ab	5,24±0,17ab	1,77±0,12a
T50	93,7±0,07a	4,50±0,06a	25,86±1,32b	12,17±2,15b	27,68±2,66b	4,78±0,79b	1,72±0,16a
T100	102,7±0,07a	4,77±0,23a	61,97±4,89a	20,60±3,18ab	32,85±2,81ab	6,89±0,54a	2,29±0,35a
T150	89,0±0,08a	4,28±0,34a	52,67±5,53ab	16,97±1,92ab	32,18±0,67ab	5,85±0,61ab	1,88±0,21a
T200	79,0±0,03ab	4,48±0,19a	59,03±5,30ab	22,17±2,11a	37,55±1,24a	6,56±0,59a	2,46±0,24a
F	7,66	0,88	3,98	3,25	3,39	3,71	2,05
P	0,00	0,51	0,04	0,06	0,05	0,04	0,16

Promedio de tres repeticiones ± error estándar. ¹Comparación de medias por la prueba de Tukey (95%). ²Comparación de medias por la prueba de Tukey (90%). AP= altura de planta; MF= Masa fresca; MS= Masa seca.

Los diámetros de tallo estuvieron entre 4,28 y 4,77 mm sin diferencia estadística significativa entre tratamientos. No se encontró ningún efecto de la DN aplicada en esta variable agronómica. Los valores hallados estuvieron por debajo de los reportados por Gusqui *et al.* (2010) quienes encontraron valores por encima de los 9 mm, cuando usaron vermicompost en DN de 5 Mg·ha⁻¹. De igual manera, Salgado (2013) reportó valores de diámetro de tallo de alrededor de 7 mm a los 70 ddt usando DN de 130 kg·ha⁻¹ de nitrato como nutrición a plantas de estevia variedad Eirete. Sin embargo, Zetina *et al.* (2014), hallaron con la aplicación de 350 mg·kg⁻¹ de N, diámetros de tallo de 4,85 mm, valores similares a los hallados en el presente estudio. Estas diferencias encontradas pudieron deberse a la ocurrencia de altas temperaturas durante el periodo experimental, que hicieron que la planta presentara mayor elongación de tallo y menor desarrollo de diámetro. El aumento de temperatura y el suministro adecuado de agua, favorece la evapotranspiración de la planta, lo que se traduce en apertura estomática que incrementa la absorción de CO₂ y aumenta la fotosíntesis. El efecto de temperatura elevada y constante durante el ciclo del cultivo, pudo afectar la producción de masa y por tanto los rendimientos, contrario a lo reportado por Páez *et al.* (2000), donde encontraron el efecto negativo de altas temperaturas en el crecimiento de plantas de tomate.

La MF estuvo entre 25,9 y 61,9 g·planta⁻¹ correspondientes a T50 y T100 respectivamente mientras que la MS estuvo entre 12,17 y 22,17 g·planta⁻¹ correspondientes a T50 y T200. Los tratamientos T, T100, T150 y T200 no presentaron diferencias significativas entre sus resultados de MF y MS, pero si fueron diferentes de T50. La DN de 100 kg·ha⁻¹ estuvo entre 24,0% por encima de T50. El T200 obtuvo 45,1%, más de MS total que T50. Los resultados obtenidos estuvieron por debajo de los reportados por Salgado (2013), quien obtuvo MF hasta 112,3 g·planta⁻¹ a DN superiores a las utilizadas en el presente estudio. Zetina *et al.* (2014) encontraron valores de MS por debajo de los hallados, entre 3,28 y 9,15 g·planta⁻¹ con aplicaciones de 350 mg·kg⁻¹.

Los rendimientos de hoja fresca estuvieron entre 4,78 y 6,89 Mg·ha⁻¹ para los tratamientos T50 y T100 respectivamente. Los tratamientos T, T100, T150 y T200 kg ha⁻¹ no presentaron diferencias significativas entre ellos, pero si fueron diferentes de T50. La DN de 100 y 200 kg·ha⁻¹ obtuvieron 30,6% y 27,1% más de rendimiento que T50, respectivamente. Los rendimientos de hoja seca estuvieron entre 1,72 y 2,46 Mg·ha⁻¹ para T50 y T200 respectivamente. No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos. Para T200, el rendimiento estuvo 30,1% y 28,0% por encima de T50 y T respectivamente. Yang *et al.* (2013) obtuvieron rendimientos de hasta 4,5 Mg ha⁻¹ al utilizar DN de 225 kg·ha⁻¹ y Gusqui *et al.* (2010) alcanzaron 2,9 Mg·ha⁻¹ con 50 Mg·ha⁻¹ de vermicompost. Salgado (2013) encontró rendimientos de 2,78, 4,05 y 5,06 Mg·ha⁻¹ para DN de 118, 172 y 215 kg·ha⁻¹ de N respectivamente. Maniruzzaman *et al.* (2016), al fertilizar con 150 kg·ha⁻¹ de N en suelos básicos, obtuvieron rendimientos de 0,52 Mg·ha⁻¹ de hoja seca de estevia, mientras que al utilizar DN de 300 kg·ha⁻¹ de N, obtuvieron 0,96 Mg·ha⁻¹ de hoja seca.

El porcentaje de NF promedio hallados estuvo entre 1,36% y 2,46% correspondientes a los tratamientos T y T50 respectivamente (Figura 24). De acuerdo con Osorio (2014), los contenidos de NF en general para las plantas están en el orden de 2% y 6%. Borda-Molina *et al.* (2009) han reportado contenidos de NF para estevia entre 1,92% y 2,20%, valores similares a los de Salgado (2013) quien encontró valores entre 1,8% y 2,8%. La DN de 50 kg·ha⁻¹ fue la que obtuvo el mayor porcentaje, pero sin diferencias significativas con las DN mayores. Maniruzzaman *et al.* (2016) obtuvieron valores de NF entre 1,15% y 1,62% para DN de 100 y 300 kg·ha⁻¹ respectivamente, los cuales estuvieron por debajo de los encontrados en el presente trabajo.

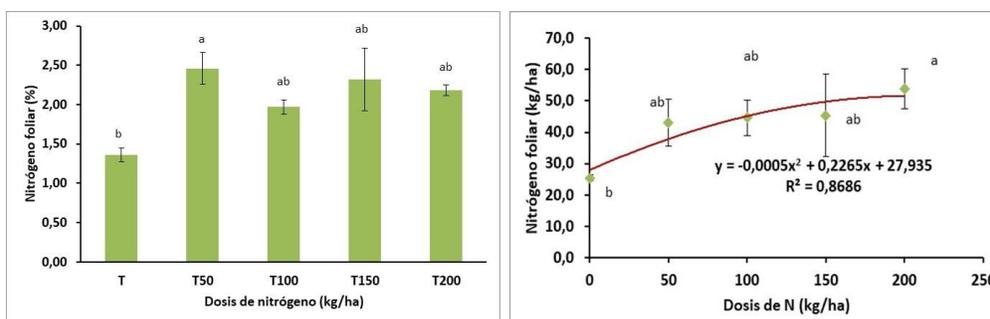


Figura 24. Contenido de NF en plantas en función de la DN en estevia. Relación entre la DN aplicada y el contenido de NF en estevia. A. Prueba de comparación de medias por la prueba de Tukey al 95%. Las barras indican el intervalo de confianza para la media con confiabilidad del 95% (F=4,16; p=0,03). B. Comparación de promedios mediante la prueba de Duncan al 95% (F=1,78; p=0,21). Regresión polinomial de grado dos (F=6,67; p=0,13).

La extracción de N por parte de las plantas estuvo entre 26 y 54 kg·ha⁻¹ correspondientes a T y T200 respectivamente (Figura 24). Al relacionar la extracción de N por las plantas y las DN aplicadas, se encontró una relación polinomial de segundo orden. A medida que se aumentó la DN, las plantas de estevia realizaron una mayor extracción. Sin embargo, los valores extraídos no fueron estadísticamente diferentes, aunque T200 si obtuvo la mayor extracción. De acuerdo a la ecuación hallada, la máxima extracción de N por las plantas ocurriría a una DN de 226 kg·ha⁻¹, con una extracción de N de 53,6 kg/ha. Sin embargo, el hecho de que ocurra la mayor absorción, no implica las mejores respuestas agronómicas como se evidenció anteriormente, sino puede deberse a un “consumo de lujo”, y posiblemente este exceso puede conducir a una inhibición en la toma de otros elementos como el P.

3.4.1.3. Efecto de la Dosis Nitrogenada (DN) en las propiedades del suelo

Después de 115 ddt, una vez se realizó la cosecha, se determinó el estado final de algunas propiedades químicas del suelo (Tabla 15). No se encontraron diferencias significativas en los valores de pH, los cuales estuvieron entre 6,17 y 6,51 clasificados como ligeramente ácidos, aunque si fueron más bajos del valor inicial (7,47). La presencia de la planta y la absorción de nutrientes contribuyeron a la acidificación del suelo. Los valores de pH alcanzados son adecuados ya que en el rango entre 5,5 y 6,5 se incrementa la disponibilidad de nutrientes para la planta.

Tabla 15. Efecto de la aplicación de DN en propiedades del suelo a los 96 ddt en estevia.

Tratamiento	pH	C.E. (dS·m ⁻¹)	MOS (%)	NTS (%)
T	6,39±0,05a	0,40±0,13a	2,62±0,04	0,034±0,02
T50	6,46±0,08a	0,32±0,07a	2,69±0,03	0,036±0,01
T100	6,36±0,01a	0,29±0,05a	2,77±0,14	0,038±0,00
T150	6,51±0,02a	0,40±0,13a	2,79±0,12	0,046±0,01
T200	6,17±0,05a	0,36±0,01a	2,50±0,04	0,044±0,01
F	1,66	0,29	1,85	0,75
p	0,24	0,88	0,20	0,58

Promedio de tres repeticiones de la concentración de hidrógeno ± error estándar. Comparación de medias por la prueba de Tukey (95 %). Letras iguales quiere decir que no hay diferencias significativas entre tratamientos.

Los valores de CE estuvieron entre 0,29 y 0,40 dS·m⁻¹ sin diferencias significativas entre DN aplicadas ni con el testigo y son valores deseables para la mayoría de los cultivos (González *et al.*, 2015). Los volúmenes de lixiviación producidos en las distintas DN no ocasionaron diferencias en la concentración de sales en la solución del suelo. Jácome *et al.* (2013) encontraron que la CE disminuyó después de la aplicación de abonos orgánicos e inorgánicos en un cultivo de frijol y afirmaron que la principal razón de esta situación obedece a la absorción de aniones y cationes formadores de sales por las plantas.

Los niveles de MOS estuvieron entre 2,50% y 2,79% sin diferencias estadísticas entre tratamientos. Sin embargo, cabe resaltar que se presentó un leve incremento en su valor en comparación con el inicial (2,32%). Este aumento pudo deberse a la presencia de la planta y al aporte de sustancias orgánicas que pudieron activar la actividad microbiana. A pesar de no ser significativamente diferentes, fueron T100 y T150 los que mostraron mayor aumento en el contenido de MOS.

Los niveles finales de NTS estuvieron entre 0,034% y 0,046% catalogados como bajos (González *et al.*, 2015). No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos y explica los niveles adecuados de NF hallados. Gran parte de este NTS se encuentra en formas orgánicas, tal como se intuye de los valores de MOS, con un contenido de N menor al 5% (Blanco, 2003). Pero existe otro porcentaje aportado por la urea que se encuentra en formas disponibles solubles, que son susceptibles de adsorberse en el complejo de cambio del suelo en forma de amonio, ser absorbido por la biota del suelo y aprovechado por cultivos posteriores, puede ser lixiviado, o por fijación en arcillas expansivas.

Una tendencia a aumentar el NTS con la DN puede ser observada en la Figura 25. Si bien es cierto que este NTS podría ser aprovechado por cultivos siguientes, también es de alto riesgo su presencia, ya que, mediante los procesos de mineralización, se promueve la formación de NO₃⁻ y es susceptible a lixiviación. A pesar de que las altas DN permiten mayor acumulación de NTS, esto no se vio reflejado sustancialmente en la absorción del N por parte de la planta ni en el rendimiento de la misma. Prueba de lo anterior es posible observar, al calcular las eficiencias de utilización del N. De acuerdo con Dobermann (2007), la ER esta del orden de 0,3 a 0,5 para cereales y en sistemas bien manejados pueden alcanzar valores de 0,8. Para el caso de la estevia, a menor DN empleada la eficiencia fue mayor, donde T50 fue la que obtuvo mejores resultados (0,86), siendo significativamente diferente de las demás DN (Figura 26); sin embargo, la EI alcanzada por esta DN, no fue diferente de las demás, alcanzando valores entre 0,11 y 0,16 Mg de MF por cada kg de N absorbido, por encima de los obtenidos para los cereales.

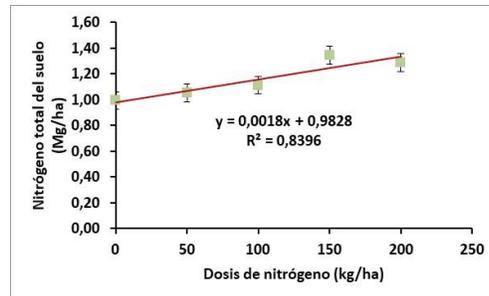


Figura 25. NTS a los 105 después del trasplante obtenido con la variación de DN en estevia. Comparación de medias por prueba de Tukey al 95% ($F = 0,75$; $p = 0,58$). Regresión lineal. ($F = 15,70$; $p = 0,03$).

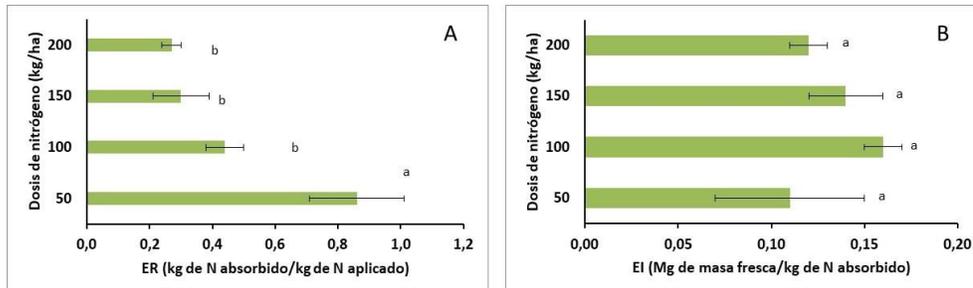


Figura 26. Eficiencia de la FN en estevia usando diferentes DN. (A) Eficiencia aparente de recuperación ($F = 8,64$; $p = 0,01$) (B) Eficiencia interna de utilización ($F = 0,82$; $p = 0,52$) del N para diferentes DN utilizadas. Comparación de promedios mediante la prueba de Tukey al 95%

3.4.1.4. Efecto de la Dosis Nitrogenada (DN) en la eficiencia del uso del agua (EUA)

En cuanto al uso eficiente del agua se encontró que T100, T150 y T200 presentaron los mayores valores (por encima de $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) (Figura 27), similares a los registrados para hortalizas como tomate y tubérculos como papa. Los resultados sugieren que la FN favorece la EUA, al obtener mayores cosechas por volumen de agua aplicado, situación favorable en el contexto del manejo eficiente del recurso hídrico.

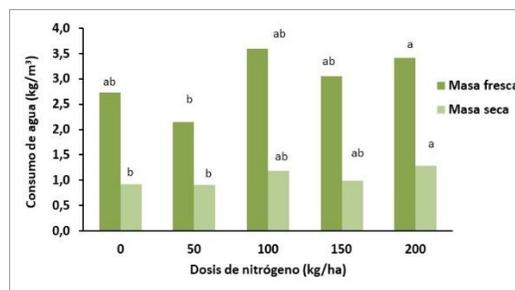


Figura 27. Uso eficiente de consumo de agua en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ de MF y MS en función de la DN en estevia. Comparación de medias realizada con la prueba de Tukey al 95% ($F = 3,71$; $p = 0,04$) para MF y prueba de Duncan al 90% ($F = 2,03$; $p = 0,17$) para MS.

De acuerdo a los resultados obtenidos, no fue fácil establecer la mejor DN para las condiciones de estudio. Sin embargo, la DN apropiada puede estar entre 50 y $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, al presentar valores de lixiviación de nitratos del orden de $1,4 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, que es menor al 3% de la aplicación realizada. La DN de $50 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ presentó los mayores valores de NF y por consiguiente, la mejor ER, mientras que la DN de $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ obtuvo los mejores resultados agronómicos de la estevia como rendimiento de hoja y mejor EI.

3.4.2. Dosis Nitrogenada (DN) adecuada para albahaca

A continuación, se muestran los resultados relacionados con el efecto de la dosis en la lixiviación de N, en las propiedades agronómicas de la planta, en las propiedades del suelo después del corte de la planta y en las eficiencias de fertilización y de uso del agua por la albahaca.

3.4.2.1. Efecto de la Dosis Nitrogenada (DN) en la lixiviación de Nitrógeno

Las concentraciones de amonio y nitrato lixiviados a los 24 ddt estuvieron entre 1,03 y 6,09 mg·L⁻¹ para los primeros, correspondientes a T200 y T respectivamente, y entre 10,99 y 42,33 mg·L⁻¹ para los segundos, correspondientes a T200 y T respectivamente (Tabla 16). Se observó que a menor DN empleada, la lixiviación de amonio fue menor pero la de nitrato aumentó, indicando con esto que el proceso de mineralización del N aumentó con la DN suministrada, dejando mayor concentración de formas oxidadas solubles de N. Ninguna de las concentraciones de nitratos halladas superó los límites descritos por la OMS de 50 mg·L⁻¹ pero las concentraciones de amonio sí estuvieron por encima de las comúnmente encontradas en aguas superficiales y subterráneas de 0,5 mg·L⁻¹. El T fue el que menor cantidad de N-amoniaco perdió por lixiviación sin diferencia significativa con T100, pero sí por debajo de los valores alcanzados por las demás DN.

Tabla 16. Efecto de la DN en la lixiviación de amonio, nitrato y total a los 24 y 55 días después del trasplante (DDT) en albahaca.

Tratamientos	24 DDT			55 DDT		
	NH ₄ ⁺ mg·L ⁻¹ (F= 25,91; p= 0,00)	NO ₃ mg·L ⁻¹ (F=9,08; p=0,02)	N-total mg·L ⁻¹ (F=5,99;p=0,01)	NH ₄ ⁺ mg·L ⁻¹ (F=2,49; p=0,11)	NO ₃ mg·L ⁻¹ (F=4,88;p=0,02)	N-total mg·L ⁻¹ (F=5,38; p=0,01)
T	6,09±0,01a	10,99±0,84c	17,08±0,83c	2,50±0,47a	5,04±1,52b	7,54±1,18b
T50	2,17±0,07b	34,33±0,85a	36,49±0,78a	3,44±0,30a	9,62±2,31ab	13,06±2,33ab
T100	2,93±0,47ab	30,44±8,41abc	33,38±8,83abc	2,92±0,23a	13,42±2,55ab	16,36±2,77ab
T150	3,27±0,65ab	23,35±1,17b	26,62±0,85b	2,94±0,61a	13,59±1,63ab	16,51±1,39ab
T200	1,03±0,20b	42,33±1,97a	43,36±1,77a	4,14±0,39a	19,83±3,72a	23,98±4,10a

Promedio de tres repeticiones ± error estándar. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas. Comparación de promedios por la prueba de Dunnett con 95% de confianza. Anova de medidas repetidas ver anexo 6.

Se encontraron diferencias significativas en las concentraciones de amonio y nitrato para los dos tiempos de medición ($p < 0.001$; Anexo 6). A los 55 ddt, las concentraciones de amonio y nitrato lixiviados fueron menores, debido a la mayor utilización por la planta y la biota del suelo. Las concentraciones de amonio estuvieron entre 2,50 y 4,14 mg·L⁻¹, sin diferencias significativas entre tratamientos, mientras que las de nitrato estuvieron entre 5,04 y 19,83 mg·L⁻¹ correspondientes a T y T200 respectivamente para ambos casos. Al igual que en la medición anterior, no se superaron los límites establecidos por la OMS. Análogo al experimento con estevia, la lixiviación de N se redujo a medida que pasó el tiempo. A los 55 ddt la reducción de N total lixiviado estuvo entre 38% y 64% con respecto a los 24 ddt y fue inversamente proporcional a la DN aplicada.

Los volúmenes de lixiviados estuvieron entre 450 y 745 mL para los diferentes tratamientos (Figura 28) y se encontraron diferencias significativas entre volúmenes en los dos tiempos de medición (anexo 6). No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, aunque los volúmenes fueron más altos a los registrados para la estevia. Estas diferencias pudieron deberse a la ocurrencia de flujos preferenciales ocasionados por la presencia de arcillas expansivas. Al utilizar láminas de agua bajas, debido a los bajos Kc de la albahaca, baja frecuencia de aplicación del agua, sumado a las altas temperaturas ocurridas durante el experimento que alcanzaron los 38 °C en el invernadero, ocasionaron fenómenos de secado y humedecimiento que dieron paso a la aparición de grietas que favorecieron la lixiviación. Debido a que hubo días calurosos, el agua aplicada no fue suficiente, llegando a presentarse estrés en las plantas, por lo que se hizo necesaria la aplicación de riego complementario, lo que pudo ocasionar mayor volumen de lixiviación.

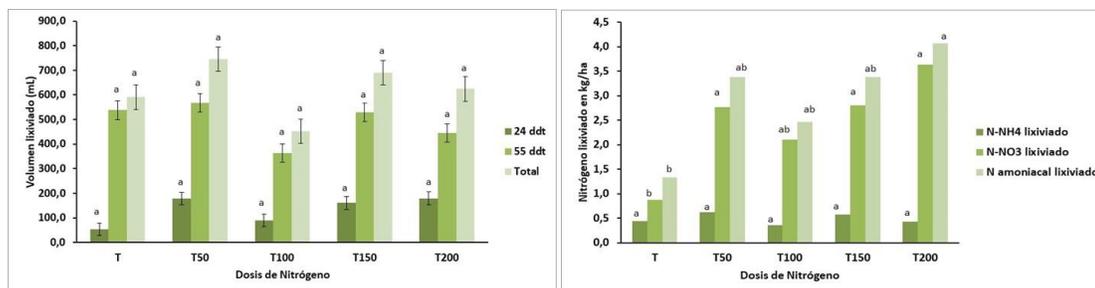


Figura 28. Volumen lixiviado para las diferentes DN en albahaca. NL total en albahaca. A. A los 24 días después de la siembra (ddt) ($F=2,12$; $p=0,15$), a los 55 ddt ($F=0,75$; $p=0,58$) y el total recolectado ($F=1,10$; $p=0,41$). B. En forma de amonio ($N-NH_4^+$) ($F=0,59$; $p=0,68$; Tukey 95%), nitrato ($N-NO_3$) ($F=2,30$; $p=0,13$; Duncan 90%) y amoniacal ($F=1,84$; $p=0,2$; Duncan 95%) en función de la DN aplicada.

El comportamiento de la pérdida de amonio con relación a las DN no tuvo un comportamiento claro (Figura 29). La aplicación de N usando como fuente la urea, promueve los procesos de aminificación y amonificación, generando cantidades que no alcanzan a ser absorbidas por las plantas, ni a ser retenidas por el suelo, por lo cual se lixivian, aunque sea en pocas cantidades si se compara con el nitrato. La concentración de nitrato lixiviado en los lixiviados aumentó proporcionalmente con la DN aplicada, indicando que, a mayor concentración de urea en el suelo, se favorece el proceso de nitrificación, dejando formas oxidadas de N disponibles para la planta y la biota del suelo, pero susceptibles a ser lixiviadas. En este estudio se encontró que se lixivian a razón de 0,01 kg por cada kg de N aplicado en una hectárea de suelo, valores bajos que se deben principalmente a la eficiente aplicación de agua de riego.

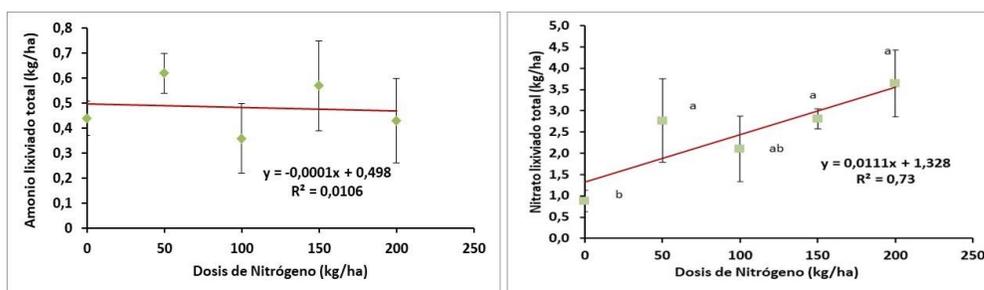


Figura 29. Relación entre la DN aplicada y la lixiviación de amonio y nitrato en albahaca. Las barras indican el error estándar.

En el cultivo de albahaca, la pérdida de nitratos lixiviados resultó directamente proporcional a las DN aplicadas (Figura 29). Las DN empleadas presentaron diferencias significativas en la cantidad de nitrato lixiviado por unidad de área en comparación con el T, con excepción de T100. La cantidad de nitratos lixiviados estuvieron entre 0,8 y 3,6 $kg \cdot ha^{-1}$ para el T y T200 respectivamente. Sin embargo, al comparar el porcentaje de pérdida de nitrato por lixiviación con respecto a la DN aplicada, se encontró que a mayor DN este fue menor (5,5% para T50, 2,1% para T100, 1,87% para T150 y 1,82% para T200). Este resultado puede deberse a que las mayores DN promueven la actividad microbiana del suelo, induciendo a procesos de inmovilización, dejando menos concentración de formas inorgánicas como el nitrato en el suelo. Sin embargo, es posible que, al realizar la evaluación por más tiempo, las pérdidas de nitratos aumenten para las mayores DN.

3.4.2.2. Efecto de la Dosis Nitrogenada (DN) en propiedades agronómicas de albahaca.

Las AP de albahaca estuvieron entre 55,8 y 68,2 cm para el T y T100 respectivamente, sin diferencias estadísticas entre tratamientos (Tabla 17), resultados similares a los reportados por Yepes *et al.* (2016) quienes encontraron que la AP de albahaca es independiente a la DN aplicada. Los tratamientos T100 y T150 fueron los que obtuvieron mayores AP, con diferencias entre 10 y 15 cm con respecto al T. Estas diferencias en AP pueden favorecer la fotosíntesis puesto que les permiten tener mayor acceso a luz. Los valores encontrados

estuvieron por encima de los reportados por Ledesma *et al.* (2013), cuyas AP estuvieron entre 14 y 37 cm, al utilizar diferentes dosis de compost proveniente de residuos orgánicos domiciliarios y por González (2013) quien al usar aislados bacterianos de *bacillus spp*, las plantas alcanzaron AP de 36 cm máximo. González *et al.* (2009) encontraron AP entre 50,0 y 58,3 cm, similares a las halladas en esta investigación, cuando utilizaron relaciones de amonio/nitrato igual a 20/80, demostrando que la FN tuvo incidencia en el crecimiento de la planta. Pandey *et al.* (2016) encontraron AP entre 65 y 79 cm donde los mayores valores correspondieron a tratamientos que combinaban abono orgánico y fertilizante de síntesis química en dosis de 2500 kg·ha⁻¹ de abono orgánico y 50 kg·ha⁻¹ de fertilizante inorgánico.

Tabla 17. Efecto de la aplicación de DN en variables agronómicas de albahaca.

Tratamiento	AP (cm) ¹	Diámetro de tallo (mm) ¹	MF total (g) ²	MS total (g) ³	Porcentaje de MS	Rendimiento de hoja fresca (Mg·ha ⁻¹) ²	Rendimiento de hoja seca (Mg·ha ⁻¹) ³
T	55,8±5,10a	3,5±0,55a	69,3±2,55b	24,5±3,15a	35,7±5,72a	7,8±0,28b	2,8±0,35a
T50	65,1±8,18a	4,3±0,35a	65,9±5,53b	27,1±8,66a	39,3±10,57a	7,4±0,62b	3,0±0,97a
T100	68,2±3,95a	4,6±0,64a	102,1±9,51a	44,2±12,94a	44,2±12,62a	11,4±1,06a	4,6±1,45a
T150	65,6±6,72a	4,7±0,17a	92,3±6,03ab	41,1±2,92a	44,5±1,22a	10,3±0,68ab	5,0±0,33a
T200	58,7±4,12a	4,1±0,27a	65,3±16,64b	20,6±8,38a	29,3±4,92a	7,3±1,73b	2,3±0,94a
F	0,79	1,19	3,61	1,66	0,61	3,61	1,66
P	0,56	0,37	0,05	0,23	0,66	0,05	0,24

Promedio de tres repeticiones ± error estándar. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas entre tratamientos. ¹Comparación de promedios por la prueba de Tukey (95 %). ²Comparación de medias por la prueba de Duncan (95%). ³ Comparación de medias por la prueba de Duncan (90%).

Los diámetros de tallo estuvieron entre 3,5 y 4,7 mm correspondientes al T y T150 respectivamente, sin diferencias significativas entre DN aplicadas. Diferentes resultados fueron encontrados por Guerrero (2008), al encontrar diámetros menores de 2 mm utilizando soluciones Steiner, las cuales contenían 16,42 g·L⁻¹ de N. La aplicación de N aumentó entre 14,6% y 25,5% el diámetro con respecto al T, siendo T150 el que mejor respuesta obtuvo.

El tratamiento T100 obtuvo el mayor valor de MF en plantas de albahaca sin diferencia significativa con T150. Esta DN obtuvo 36,0%, 35,5% y 32,1% más de MF que T200, T50 y T respectivamente. González *et al.* (2009) encontraron MF entre 65,5 y 84,9 g·planta⁻¹ al fertilizar con nitrato y amonio, similares a las halladas en este estudio. En cuanto la MS hallada, nuevamente T100 presentó valores similares con T, T50 y T150. La MS obtenida con esta DN estuvo 50,4% por encima de la alcanzada en el T200. Estos resultados respaldan la hipótesis de que a mayor DN, la inmovilización del N se presenta y no es disponible para las plantas en el momento oportuno, lo que se refleja en menor ganancia de MS por parte de la planta. Los rendimientos de hoja seca obtenidos con T100 y T150, no presentaron diferencias estadísticas con los demás tratamientos.

El NF estuvo entre 0,30% y 2,55% correspondientes al T y a T200 respectivamente (Figura 30). Los tratamientos T50, T100 y T150 no presentaron diferencias significativas entre ellas, pero si con T200 y con T. La mayor DN estuvo 63,9%, 63,1% y 58,4% por encima de las tres DN menores respectivamente. A pesar de que N es fundamental para la división celular y por tanto el crecimiento de plantas, estas diferencias en NF no se vieron reflejadas en diferencias en la AP ni en los rendimientos de MF y MS. Ferreira *et al.* (2015) no recomiendan el uso de altas DN cuando se va a realizar un único corte de plantas de albahaca con fines farmacéuticos o homeopáticos debido a que puede alterar sus compuestos volátiles. Mota & Sanchez (2013), sembraron plántulas de albahaca en 300 g de vermicompost de café por planta (1,04% de N), aportando N por encima de las DN empleadas en el presente trabajo y obtuvieron mayores valores de NF, entre 2,2% y 2,8%, situación que pudo deberse a la baja densidad de este material orgánico que permite mejorar las relaciones de porosidad y favorece la absorción de nutrientes.

A medida que se incrementó la DN aplicada, la cantidad de N absorbido y acumulado en las hojas por unidad de área aumentó (Figura 32). El comportamiento de absorción de N siguió un modelo polinómico de segundo orden donde su máximo valor fue alcanzado con una DN de 207 kg·ha⁻¹ y se obtuvo una extracción de N de

38,9 kg/ha. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre T100, T150 y T200, mostrando que con la DN menor se puede obtener similar absorción de N por la planta que con DN más altas. Además, el 34% del N aplicado en la DN de 100 kg·ha⁻¹ fue absorbido por la planta, mientras que sólo el 23% y el 20% lo fue por las DN más grandes, lo que indica mayor eficiencia.

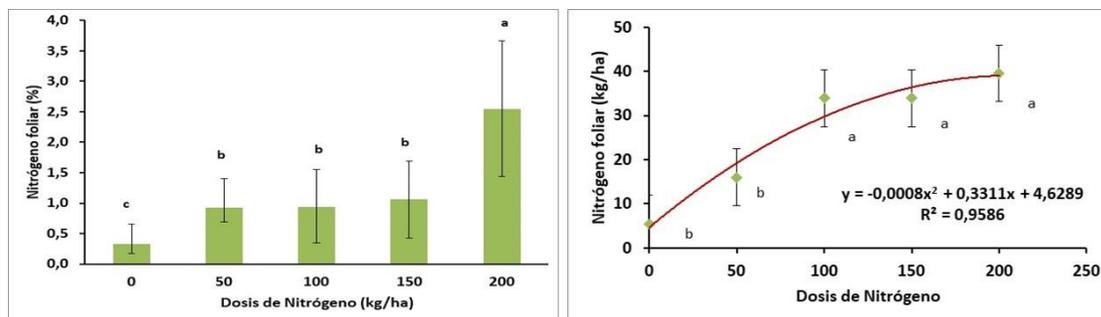


Figura 30. Contenido de NF y relación entre la DN aplicada y el contenido de NF en albahaca.

A. Prueba de comparación de medias por la prueba de Duncan al 95%. Las barras indican el intervalo de confianza para la media con confiabilidad del 95% (F=27,04; p=0,00). B. Prueba de Duncan al 90% (F=1,57; p=0,26). Regresión polinomial de grado dos (F=23,15; p=0,04)

3.4.2.3. Efecto de la Dosis Nitrogenada (DN) en las propiedades del suelo

La aplicación de las DN afectó el pH y el NTS al final de los 76 ddt (Tabla 18). El pH del suelo varió entre 5,89 y 6,32 correspondientes a T200 y el T respectivamente, donde se encontraron diferencias estadísticas entre tratamientos. Se encontró que a mayor DN aplicada, mayor fue la acidificación del suelo, pero sin diferencias significativas entre las tres DN mayores. Este resultado se debe a la reacción química ocurrida en la nitrificación donde la transformación del amonio en nitrito conlleva a la liberación de H⁺ al medio, disminuyendo su pH. Todos los tratamientos, incluido T, presentaron valores de pH por debajo del valor inicial (7,47), debido posiblemente a la extracción de nutrientes por parte de la planta, al proceso de nitrificación ocurridos y a la aplicación del riego que, con la lixiviación de nitratos, también se presenta el lavado de bases intercambiables que promueven la acidificación del suelo. Los porcentajes de MOS estuvieron entre 2,63% y 3,28% para T y T50 kg·ha⁻¹ respectivamente, valores cercanos a los hallados en la caracterización inicial del suelo.

El NTS estuvo entre 0.035% y 0.143% para T y T100. Estos valores alrededor de 0,1% son frecuentes en los suelos agrícolas, especialmente los que están cultivados (Navarro y Navarro, 2003). Los tratamientos T50 y T100 fueron las que presentaron el valor más alto de NTS después de los 76 ddt, sin diferencia estadística entre ellos. La planta absorbió el 34% de esta aplicación, obteniendo las más altas respuestas agronómicas y la menor lixiviación. La DN más alta presentó el menor contenido de NTS, el mayor contenido de NF, aunque no se vio reflejada en el peso seco y en el rendimiento de hoja, lo que podría interpretarse como un exceso de absorción, conocido también como “consumo de lujo” que hace a las plantas más susceptibles a plagas y enfermedades y menos tolerante a condiciones climatológicas como sequías. Las DN más altas presentaron las mayores pérdidas de nitratos en los lixiviados, reduciendo la concentración de NTS y la consecuente reducción del pH.

Tabla 18. Efecto de la aplicación de DN en propiedades del suelo cultivado con albahaca a los 76 después del trasplante.

Tratamiento	pH ¹²	C.E. (dS m ⁻¹) ³	MOS (%) ³	NTS (%) ³
T	6,32±0,64b	0,95±0,27a	2,63±0,21a	0,035±0,01c
T50	6,25±0,27b	1,27±0,50a	3,28±0,08a	0,118±0,01ab
T100	6,07±0,63ab	0,68±0,17a	2,73±0,18a	0,143±0,02a
T150	6,07±0,83ab	0,99±0,33a	2,80±0,08a	0,082±0,01bc
T200	5,89±0,34a	1,53±0,83a	2,80±0,14a	0,047±0,01c
F	7,30	0,46	2,78	12,06
P	0,005	0,76	0,09	0,00

¹Promedio de tres repeticiones de la concentración de hidrógeno ± error estándar. ²comparación de medias por la prueba de Dunett (95%). ³comparación de medias por la prueba de Tukey (95%).

La CE no se vio afectada por las DN aplicadas cuyos valores estuvieron entre 0,68 y 1,53 dS·m⁻¹, sin diferencias entre DN, indicando que la aplicación de las DN utilizando como fuente la urea no produjo salinización de los suelos, como también lo sugieren Fernandez *et al.* (2006).

El NTS después de 76 ddt de albahaca y la DN aplicada siguieron un modelo polinomial de segundo orden, donde las DN de 50 y 100 kg·ha⁻¹ registraron los valores más altos, sin diferencias estadísticas entre ellas (Figura 31). De acuerdo a la ecuación, la DN que deja mayor concentración de N en el suelo (3,6 Mg/ha) es de aproximadamente 88,7 kg·ha⁻¹, DN intermedia entre 50 y 100 kg·ha⁻¹. Es posible que aplicaciones de N por encima de este valor sean susceptibles a perderse por lixiviación y contribuyan a la acidificación del suelo y DN por debajo, no suplan los requerimientos de la planta.

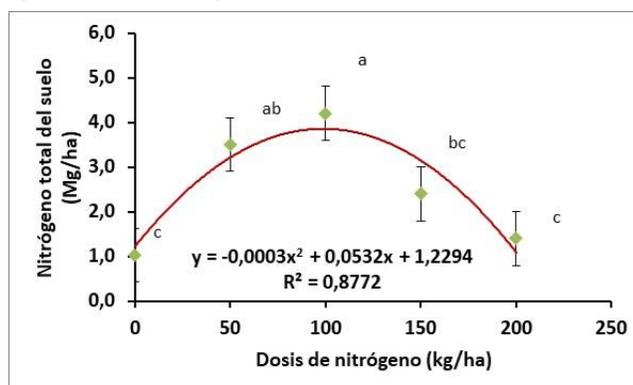


Figura 31. NTS a los 71 después del trasplante en función de la DN aplicada en albahaca. Comparación de medias por prueba de Tukey al 95% (F= 13,18; p< 0,001). Regresión polinómica de orden tres. (F=10,11; p=0,23).

No se encontraron diferencias significativas para la ER y la EI, debido probablemente a la alta dispersión de los datos (C.V. de 72,3% y 79,5%, respectivamente) (Figura 32A y 32B). Sin embargo, las dosis más bajas utilizadas brindaron los mayores valores de ER, por encima del 30% y EI alrededor de 0,6 Mg de MF por kg de N absorbido. Estas eficiencias no estuvieron altas y aún es posible mejorarlas realizando más estudios acerca de la época de aplicación, uso de otras fuentes de fertilizante nitrogenado y viabilidad de fraccionamiento de la fertilización.

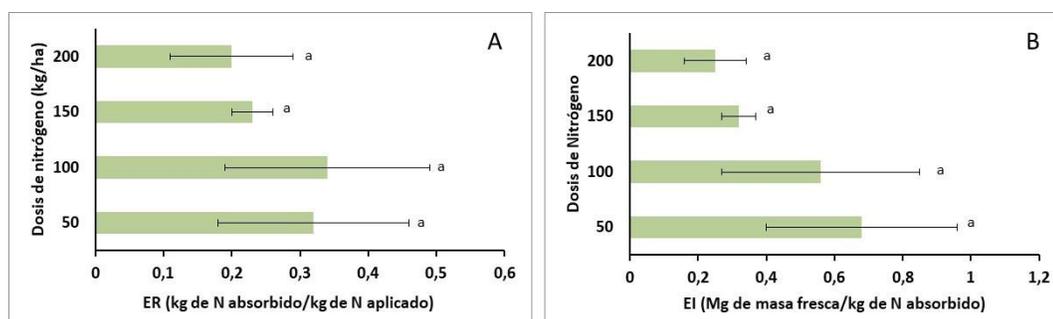


Figura 32. Eficiencia de la FN en albahaca usando diferentes DN. (A) Eficiencia aparente de recuperación (F=0,38; p=0,77) (B) Eficiencia interna de utilización (F=0,94; p=0,47) del N para diferentes DN de aplicación.

3.4.2.4. Efecto de la Dosis Nitrogenada (DN) en la eficiencia del uso del agua (EUA)

Los tratamientos T100 y T150 también consiguieron la mayor eficiencia, con diferencias significativas con las demás DN (Figura 33). Estas DN consiguieron más de 15 kg de MF y 5 kg de MS por metro cubico de agua aplicado, valores por encima de los reportados para cultivos como los cereales (1,3 kg·m⁻³) (Reta *et al.*, 2010).

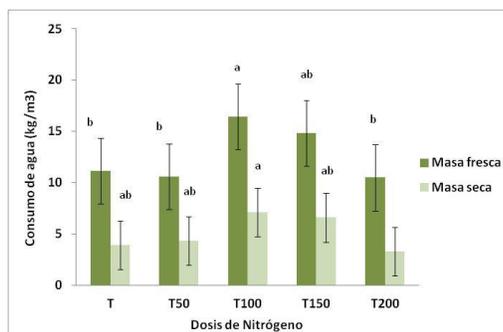


Figura 33. Uso eficiente de consumo de agua en kg/m³ de MF y MS en función de la DN en albahaca. Comparación de medias realizada con la prueba de Duncan al 95% (F=3,61; p=0,05) para MF y al 90% (F=1,66; p=0,23) para MS.

De acuerdo a los resultados hallados es posible asegurar que la DN más adecuada de N para el cultivo de albahaca en las condiciones climatológicas y para el tipo de suelo en estudio es de 100 kg·ha⁻¹. Esta DN produjo la menor pérdida de N por lixiviación, las mejores respuestas agronómicas de la planta, la mayor absorción de N, sin diferencias con DN más altas y aumentó el contenido de NTS. También obtuvo la mayor eficiencia en el uso de fertilizantes y en el consumo de agua por parte de la planta.

3.4.3. Curva de mineralización del Nitrógeno (N) para los abonos orgánicos lombricompost y gallinaza

La figura 34 muestra la evolución observada en el proceso de mineralización de N en las formas químicas de NH₄⁺ y NO₃⁻ durante las 16 semanas de incubación, para las diferentes dosis de abonos orgánicos empleados. La concentración de amonio en el suelo para los dos abonos y las diferentes dosis aumentó en la segunda semana, a partir de este tiempo disminuyó hasta la semana 10 para incrementar luego hacia la semana 16. El aumento se debe a la amonificación de compuestos orgánicos mientras que la reducción es atribuible al proceso de nitrificación en el suelo, en donde una gran parte del amonio es oxidado a formas nítricas. En el caso del lombricompost, se observó que las dos primeras semanas las concentraciones de amonio en el suelo estuvieron por encima de 50 mg·kg⁻¹, producto probablemente del proceso de amonificación. Hacia la tercera, quinta, sexta y doceava semana los niveles de amonio fueron más bajos, indicando fenómenos de inmovilización realizado por la microbiota del suelo ó de nitrificación, así como de fijación por parte de minerales de arcilla 2:1, lo que impediría su acumulación (Videla *et al.*, 2005). Para todo el tiempo de incubación, la DN de 200 kg·ha⁻¹ fue la que presentó las mayores concentraciones de amonio durante el periodo de incubación.

La gallinaza presentó los menores valores de amonio a la cuarta, quinta, sexta, octava y doceava semana de incubación, donde se indica la ocurrencia de la mineralización del N; en comparación con el lombricompost, este proceso tardó en presentarse entre una y dos semanas, debido probablemente a su relación C/N más alta y a la presencia de compuestos de más lenta descomposición. El comportamiento entre DN fue muy similar, donde las semanas 2 y 3 obtuvieron las más altas concentraciones de amonio para luego disminuir a lo largo del tiempo de la experimentación y volver a aumentar a partir de la semana 14. Durante las semanas 1, 6 y 12 no se presentaron diferencias significativas entre abonos ni entre DN, indicando similares concentraciones. En la mayoría del resto de semanas fue la gallinaza la que presentó mayor concentración de amonio, debido probablemente a la alta concentración inicial de N total que tenía este abono, con excepción de la dosis de 300 kg·ha⁻¹ que presentó un comportamiento similar al lombricompost.

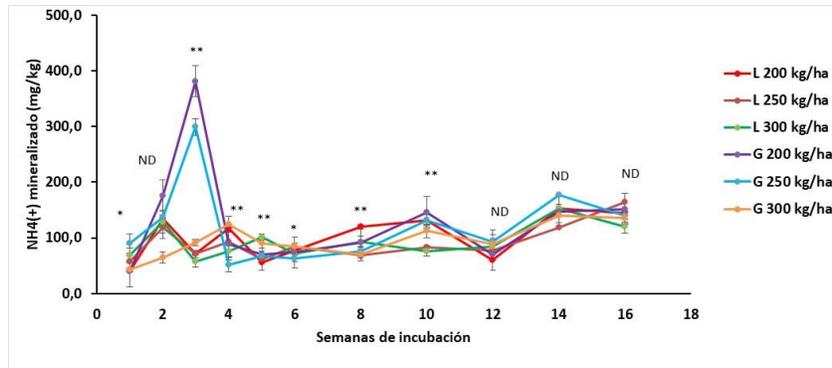


Figura 34. Amonio mineralizado a partir de la aplicación de diferentes dosis de abonos orgánicos. Promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. L= lombricompost; G= Gallinaza. (**) Diferencias significativas al 1% mediante Test de Tukey. (*) Diferencias significativas al 5% mediante Test de Tukey. (ND) No hay diferencias. Las comparaciones se hicieron entre tratamientos para una misma semana. Ver Comparación entre tratamientos en anexo 7 y ANOVA de tres factores en anexo 8

Para el caso del nitrato (NO_3^-) las concentraciones estuvieron entre 33 y 490 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, sin diferencias estadísticas entre abonos para la mayoría de las semanas evaluadas (Figura 35). Las DN de 200 y 250 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ presentaron las mayores concentraciones de nitratos para los dos abonos evaluados. Las variaciones de la concentración pueden deberse a periodos cortos de mineralización e inmovilización, comportamiento propio de suelos enmendados con materiales orgánicos de baja relación C/N. Es posible que hayan ocurrido pérdidas por volatilización, en especial en la etapa de amonificación, debido a que las materas no eran muy profundas y la aplicación de abonos orgánicos se hizo en los primeros 7 cm. Además, la volatilización del NH_4^+ sucede principalmente en suelos neutros o alcalinos, como el suelo utilizado en este estudio, con lo cual se produce amoniaco.

La nitrificación fue mayor en los suelos con gallinaza que en los de lombricompost, puesto que en la segunda y tercera semana se encontró mayor contenido de nitratos debido a la estimulación microbiana. A partir de esta semana, los abonos se comportaron muy similares, para todas las DN. Independientemente del abono, la concentración de nitratos es mayor que la concentración de amonios para la mayoría de las semanas, lo que indica que la principal forma de acumulación de N mineral en el suelo es en nitratos, lo que constituye un riesgo inminente, puesto que el exceso puede perderse por lixiviación y por ende contaminar suelos y aguas subterráneas. Los resultados concuerdan con lo dicho por Osorio, (2014) quien asegura que, en los suelos neutros y alcalinos, la forma química predominante del N inorgánico es el nitrato.

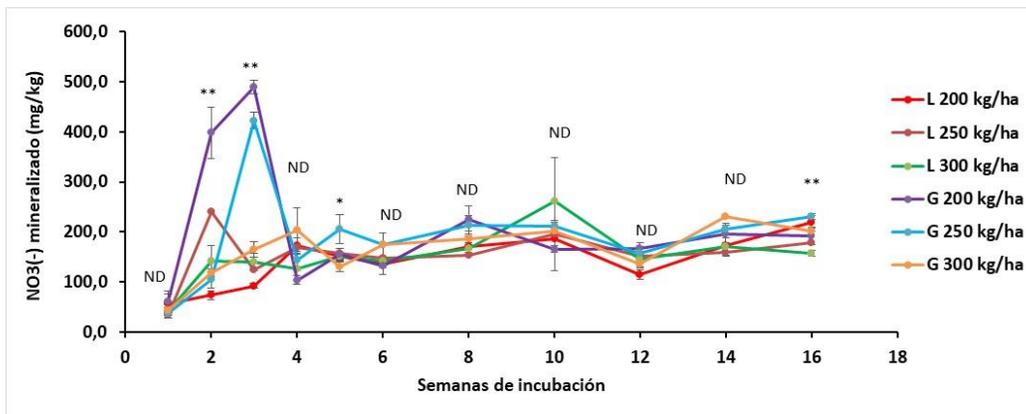


Figura 35. Nitrato mineralizado a partir de la aplicación de diferentes dosis de abonos orgánicos. Promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. L= lombricompost; G= Gallinaza. (**) Diferencias significativas al 1% mediante Test de Tukey. (*) Diferencias significativas al 5% mediante Test de Tukey. (ND) No hay diferencias. Las comparaciones se hicieron entre tratamientos para una misma semana. Ver Comparación entre tratamientos en anexo 7 y ANOVA de tres factores en anexo 8.

La mayor disponibilidad de N inorgánico para las plantas se presentó en la segunda y tercera semana, debido probablemente a la reducción de tamaño de partícula del suelo y la entrada de oxígeno producida por el tamizaje del suelo, que fue necesario para organizar las unidades experimentales, favoreciendo la mineralización de la materia orgánica (Videla *et al.*, 2005) (Figura 36). Esta mineralización puede deberse a la mayor velocidad de descomposición de compuestos orgánicos simples como azúcares y proteínas en las primeras semanas que en el resto del tiempo de incubación. Con el tiempo la velocidad de mineralización disminuye, debido al agotamiento de fuentes orgánicas de fácil descomposición y a la presencia de sustancias recalcitrantes, cuya descomposición es más lenta (Videla *et al.*, 2005); estos procesos químicos están estrechamente relacionados con el proceso de mineralización del C (Bruun *et al.*, 2006).

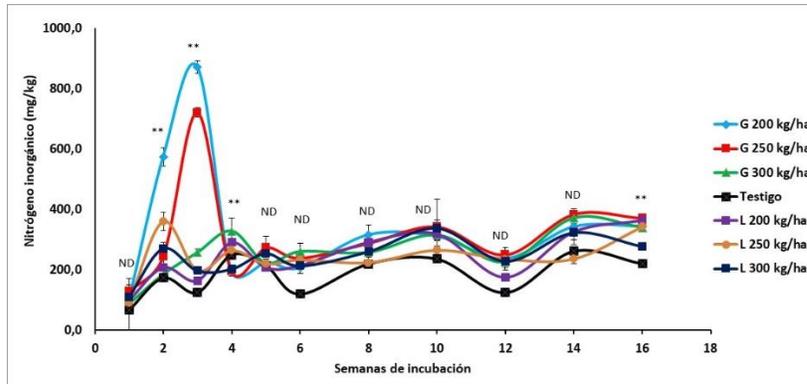


Figura 36. Curva de N inorgánico disponible (amonio + nitrato) en el suelo proveniente de diferentes DN de abonos orgánicos durante 16 semanas de incubación.

Promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. L= lombricompost; G= Gallinaza. (**) Diferencias significativas al 1% mediante Test de Tukey. (*) Diferencias significativas al 5% mediante Test de Tukey. (ND) No hay diferencias. Las comparaciones se hicieron entre tratamientos para una misma semana. Ver Comparación entre tratamientos en anexo 7

Las mayores DN de abonos orgánicos, no generaron la mayor disponibilidad de N en el suelo. La DN más alta ($300 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) con gallinaza fue la que más bajo N disponible generó durante la mayor parte del periodo de incubación, independiente del tipo de abono. Este comportamiento puede ser explicado debido a que, a mayor materia orgánica aplicada, se presenta mayor estímulo a la actividad microbiana, la cual inmoviliza el N, liberándolo en un periodo de tiempo posterior. La concentración de N inorgánico en el suelo está influenciada por el clima y por la demanda de N por los microorganismos del suelo, lo que hace que los contenidos y concentraciones de estos iones sean altamente variables en el tiempo (Osorio, 2014). Cuando se suministra materiales orgánicos con contenidos medios y altos de N (1% – 3%), se promueve un aumento en la concentración de N inorgánico al suelo por la descomposición de estos residuos, pero sus valores son muy variables en el tiempo. Las altas temperaturas registradas durante el periodo de incubación ($28 - 35 \text{ }^\circ\text{C}$) pudieron acelerar la actividad microbiana, aumentando al mismo tiempo la liberación y/o consumo de N inorgánico, mostrando la alta dinámica del N en el suelo. Esta dinámica limitó la estimación de la disponibilidad de NO_3^- y NH_4^+ para las plantas, pero si se pudo establecer que el aporte del 25% del NH_4^+ y NO_3^- del N total suministrado por el lombricompost se hizo entre la semana 3 y 4. Para la gallinaza, el aumento de dosis en $50 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ implicó una semana extra para alcanzar el aporte del 25% de NH_4^+ y de NO_3^- , así este porcentaje fue alcanzado a las semanas 2, 3 y 4 para las DN de 200, 250 y $300 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Por lo tanto, si lo que se espera es que los abonos orgánicos sean fuente de N para los cultivos, su aplicación debe realizarse mínimo con dos semanas de antelación al trasplante. La inmovilización del N, se relaciona con valores de mineralización menores a cero o por debajo del suelo testigo.

La Figura 37 muestra los periodos de mineralización e inmovilización hallados para las DN de los abonos empleados. El lombricompost presenta su mayor periodo de mineralización a la segunda semana de su aplicación y periodos de inmovilización hacia la cuarta (L300) y octava semana (L250), mientras que la gallinaza a la tercera semana mostró su mayor periodo de mineralización del N y solamente un periodo de inmovilización hacia la cuarta semana (G200 y G250). La precocidad del lombricompost con respecto a la gallinaza en suministrar el mayor contenido de N, obedece a que su relación C/N es más baja y a que sus componentes

químicos son más sencillos que permite ser degradados a una mayor velocidad; sin embargo, su bajo contenido de N total, hace que la dinámica microbiana sea alta tal como lo encontraron Vargas y Daza (2014) favoreciendo la mineralización e inmovilización en ciclos más cortos, manteniendo los niveles de N estables en el tiempo. La gallinaza por otro lado, tiene compuestos moleculares más complejos y relación C/N más alta que hace que el aporte de N disponible sea más demorado.

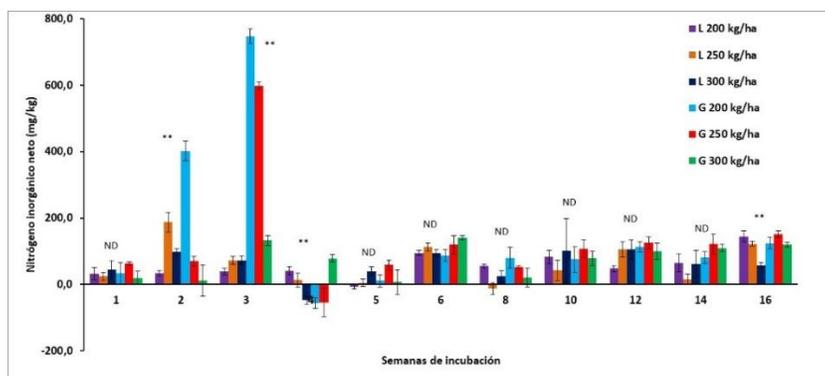


Figura 37. Mineralización (+) e inmovilización (-) del N en el suelo después de la aplicación de abonos orgánicos durante 16 semanas de incubación.

Promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. L= lombricompost; G= Gallinaza. (**) Diferencias significativas al 1% mediante Test de Tukey. (*) Diferencias significativas al 5% mediante Test de Tukey. (ND) No hay diferencias. Las comparaciones se hicieron entre tratamientos para una misma semana. Ver Comparación entre tratamientos en anexo 7.

El porcentaje de N inorgánico acumulado (N soluble + N mineralizado) respecto al N total en las DN de 200, 250 y 300 kg·ha⁻¹ de lombricompost fueron de 5,4%, 5,4% y 4,5% respectivamente durante las 16 semanas de incubación. En el caso de la gallinaza, la DN de 200 kg·ha⁻¹ fue la que obtuvo el mayor porcentaje de mineralización (12,0%), en comparación con las DN de 250 kg·ha⁻¹ (10,0%) y 300 kg·ha⁻¹ (5,9%). A medida que se aumentó la DN de aplicación, el porcentaje de mineralización disminuyó, debido probablemente a fenómenos de inmovilización o de pérdidas por volatilización durante la etapa de amonificación de compuestos orgánicos. El N mineralizado en abonos orgánicos está entre el 10% y el 50% durante el primer año de aplicación (Chaves *et al.*, 2004). Sin embargo, Kaleem Abasi *et al.* (2007) encontraron porcentajes más bajos de mineralización de N de 9%, 10% y 8% para abonos de estiércol de vaca, oveja y aves respectivamente. La gallinaza obtuvo mayor porcentaje mineralizado que el lombricompost, lo que corresponde con la menor presencia de periodos de inmovilización, mostrados anteriormente. Figueroa *et al.* (2012) encontraron porcentajes entre 7,0% y 9,0% de N mineralizado con respecto al total contenido en gallinaza y lombricompost.

La Tabla 19 muestra los resultados de la modelación de la mineralización del N para las diferentes DN de lombricompost y gallinaza respectivamente. Para ambos abonos los valores de R² estuvieron por encima de 0,7, mostrando que el modelo de Broadbent (1986) es uno de los que mejor describen el proceso de mineralización de abonos orgánicos con baja relación C/N. En el lombricompost las DN de 250 y 300 kg·ha⁻¹ obtuvieron constantes (A y b) muy similares, mientras que la DN de 200 kg·ha⁻¹ presentó la mitad de la constante A, y una constante b mayor. Para la gallinaza, las DN de 200 y 300 kg·ha⁻¹ presentaron valores similares de la constante A. mientras que la b resultaron diferentes entre sí.

Tabla 19. N Mineralizado acumulado obtenido mediante el ajuste de resultados al modelo de Broadbent (Nm= Atb) para las diferentes DN de lombricompost y gallinaza.

Abono orgánico	kg/ha de N	Parámetros		R ²	CME
		A	b		
Lombricompost	200	33,35***	1,02***	0,991	0,037
	250	66,21	0,86**	0,739	0,220
	300	60,36***	0,85***	0,942	0,037
Gallinaza	200	139,7	1,15***	0,700	0,514
	250	407,9***	0,55***	0,830	0,051
	300	156,16***	0,58***	0,983	0,005

*** altamente significativo (p < 0,001)

La Tabla 20 muestra los resultados de la modelación de la mineralización de N para las diferentes DN de los abonos orgánicos siguiendo el modelo matemático exponencial de Stanford y Smith (1972), el cual simula una reacción cinética de primer orden. Para ambos abonos y las tres DN evaluadas, este modelo fue el de mejor ajuste a los datos experimentales, encontrando coeficientes de determinación (R^2) entre 0,90 y 0,98. El éxito de este modelo radica en considerar un valor de N orgánico potencialmente mineralizable, que representa la capacidad que tiene un abono orgánico de suministrar N a un cultivo en el tiempo. De acuerdo con el modelo de Stanford y Smith (1972), en tiempos muy largos de evaluación ($t \rightarrow \infty$), el N mineralizado es igual al N potencialmente mineralizable. Para los dos abonos, al cabo de 16 semanas ya se había mineralizado más del 50% del N potencialmente mineralizable.

Tabla 20. Parámetros del modelo de Stanford y Smith ($N_m = N_0(1 - e^{-kt})$) para las diferentes DN de lombricompost y gallinaza.

Abono orgánico	kg/ha de N	Parámetros		R^2	CME
		N_0 (mg·kg ⁻¹)	k (mg·semana ⁻¹)		
Lombricompost	200	9069	0,004	0,982	2,73
	250	532.72***	0,2015***	0,924	4,87
	300	1079.00**	0,0509*	0,969	3,79
Gallinaza	200	1993,0***	0,227***	0,908	21,70
	250	1565,0***	0,123**	0,922	14,04
	300	7627	0,007	0,981	4,40

*** 99% de significancia; ** 95% de significancia; * 90% de significancia

Comparando los abonos orgánicos, la gallinaza contiene mayor cantidad de N potencialmente mineralizable que el lombricompost, lo cual está relacionado con su contenido inicial de N y con las condiciones en que se realizó el proceso de compostaje. Sin embargo, para los tratamientos L200 y G300 el modelo exponencial no logró describir el comportamiento de la mineralización en sus primeras etapas, que a pesar de obtener altos R^2 no fueron estadísticamente significativos. La mineralización de estos dos tratamientos fue lineal a lo largo de las 16 semanas (Figura 38).

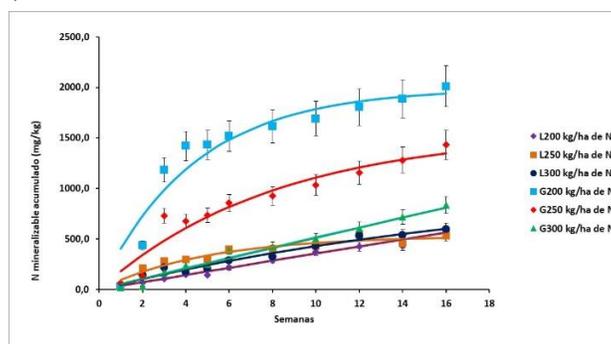


Figura 38. N Mineralizado obtenido por el modelo de Stanford y Smith ($N_m = N_0(1 - e^{-kt})$) para las diferentes DN de lombricompost y gallinaza.

Las barras indican el error estándar.

Los valores hallados de N potencialmente mineralizable fueron mucho más altos de los reportados para biosólidos deshidratados por Silva *et al.* (2013) (24,11 mg·kg⁻¹), cuyos datos experimentales siguieron mejor el modelo de Broadbent (1986) que el de Stanford y Smith (1972) debido posiblemente al bajo contenido de N total de la enmienda. Chaves *et al.* (2004) aseguran que los patrones de mineralización de abonos orgánicos con baja relación C/N generalmente se ajustan a un modelo cinético de primer orden.

Al igual que Galvis y Hernández (2004), en las primeras 5 semanas de incubación, el N mineralizado acumulado se comportó linealmente y después el incremento de N disminuyó paulatinamente durante el periodo de incubación, alcanzando una tendencia asintótica. Kaupa y Rao (2014) encontraron que la mineralización del N en gallinaza fue más rápida en los primeros 30 días con tasas de mineralización de alrededor de 1,5 mg·kg⁻¹·día⁻¹ y luego la liberación de N se hizo más lenta (0,8 mg·kg⁻¹·día⁻¹). El N mineralizado en las primeras cinco semanas hace referencia al N lábil, procedente de materia orgánica fácilmente mineralizable y es atacada por

microbios “zymogéneos”; a partir de esta semana, el N se considera estabilizado y proviene de sustancias orgánicas recalcitrantes, donde los grupos de microorganismos “autóctonos” realizan la descomposición.

La tasa de mineralización (k) fue mayor para las DN de 250 y 200 kg·ha⁻¹ para lombricompost y gallinaza respectivamente y fueron del orden de 0,20 y 0,23mg·kg⁻¹·semana⁻¹ de N para lombricompost y gallinaza en su orden. Estas tasas estuvieron por encima de las halladas por Quemada y Menacho (1999) para lodos de depuradora, que con DN de 80 Mg·ha⁻¹, la tasa de mineralización fue del orden de 0,10 mg·kg⁻¹·semana⁻¹ de N. Esta diferencia pudo deberse en primer lugar, al bajo contenido de N que contienen estos lodos (0,16%) y a las DN altas empleadas, que favorecen el proceso de inmovilización. Chaves *et al.* (2004) encontraron tasas de mineralización para abonos verdes alrededor de 0,38 mg·kg⁻¹·semana⁻¹ de N, y Gil *et al.* (2011) encontraron tasas de 0,098 y 0,44 mg·semana⁻¹ para compost de estiércol y residuos de aguas residuales compostados, similares a los hallados en el presente estudio, debido a su alta estabilidad alcanzada en el proceso de compostaje, lo que conlleva a procesos lentos de mineralización del N. Kaupa & Rao (2014) encontraron tasas de mineralización para estiércol de aves de corral de 0,68 mg·semana⁻¹, resultando más alta a la hallada en el presente estudio. Las tasas de mineralización encontradas están directamente relacionadas con las altas temperaturas presentadas durante el periodo de incubación que estimularon la actividad microbiana. Al respecto, Guntiñas *et al.* (2012) encontraron que la mineralización del N es más sensible a la temperatura de incubación que al contenido de humedad del suelo, encontrando que a 25 °C y al 80% de la humedad de CC, la mineralización es máxima. Para L200 y G300 que siguieron una mineralización lineal, alcanzaron velocidad de suministro de N de 5,1 y 7,2 mg·kg⁻¹·día⁻¹ en las 16 semanas.

La gallinaza suministró la mayor cantidad de N mineralizable, especialmente las DN de 200 (1735 mg·kg⁻¹) y 250 kg·ha⁻¹ (1449 mg·kg⁻¹), con diferencias significativas con el lombricompost en las mismas DN de 200 kg·ha⁻¹ (669 mg·kg⁻¹) y 250 kg·ha⁻¹ (725 mg·kg⁻¹) (Figura 39A). Cabe resaltar la alta variabilidad de los datos (CV = 44%), lo que evidencia la necesidad de rigurosidad en el muestreo y en la selección de la muestra a analizar. La gallinaza suministró mayor cantidad de N disponible (1346 mg·kg⁻¹) que el lombricompost (695 mg·kg⁻¹), con diferencias significativas entre ellos (Figura 39B), ya que la gallinaza tenía menor relación C/N y mayor concentración de N total, donde las diferencias en el proceso de mineralización radicarón probablemente en la composición orgánica de cada abono (Florez *et al.*, 2007). Las DN de 200 y 250 kg ha⁻¹ fueron las que mayor cantidad de N disponible presentaron independiente del abono aplicado, (1202 mg·kg⁻¹ y 1087 mg·kg⁻¹ respectivamente) mientras que la DN de 300 kg·ha⁻¹ sólo aportó 773 mg·ha⁻¹, que es 35,7% y 28,9% menos que el suministrado por las otras dos DN, respectivamente (Figura 39C). Esto concuerda con lo anunciado por Boeira (2009) quien afirma que una disminución de la fracción de mineralización puede presentarse al aumentar la DN, debido a la predominancia de la inmovilización sobre la mineralización. Florez *et al.* (2007) también encontraron que, a los 120 días de incubación, las DN más altas aportaban menos N inorgánico al suelo.

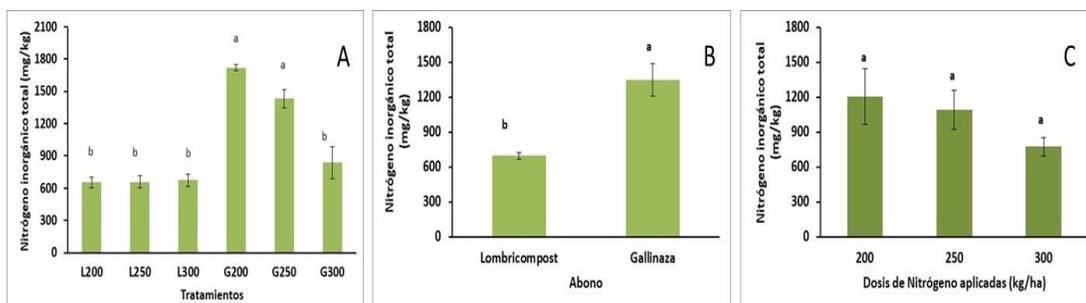


Figura 39. N total mineralizado después de 16 semanas de incubación.

a) lombricompost (L) y gallinaza (G) en tres DN. Prueba de Tukey al 95% (F= 31,89; p< 0,001). b) Comparación entre abonos (F=21,06; p<0,001). c) Comparación entre DN Prueba de Levene (F=1,60; p= 0,23). Letras iguales indican que no hay diferencias significativas.

3.4.4. Uso de Fertilizantes de Liberación Lenta (FLL) en la Fertilización nitrogenada (FN) de estevia

A continuación, se mostrarán los resultados encontrados al utilizar FLL de síntesis y orgánicos en el NL, en las propiedades agronómicas, en las propiedades del suelo al finalizar el primer corte y en las eficiencias de fertilización y del uso del agua en la estevia.

3.4.4.1. Efecto de los Fertilizantes de Liberación Lenta (FLL) en el Nitrógeno Lixiviado (NL)

Al analizar las concentraciones de NL a los 45 ddt se encontraron valores entre 0,21 y 31,0 mg·mL⁻¹ (Tabla 21, anexo 9). No se encontraron diferencias estadísticas entre tiempos de muestreo ni en la interacción tiempo por tratamiento. Las mayores concentraciones de nitratos se presentaron en los tratamientos con NC y SA, mostrando que estos fertilizantes suministraron N rápidamente para las plantas, pero son propensos a perderse por la lixiviación. Por otra parte, se hallaron concentraciones menores en los abonos orgánicos, debido a que, en su composición, la mayor parte del N presente es orgánico, por lo cual es necesaria la realización del proceso biológico de la mineralización, para llegar a formas químicas inorgánicas asimilables por la planta. A pesar de utilizar un Kc promedio de 1,2 para la determinación de la lámina de riego y usar FLL orgánicos e inorgánicos (L, G, U), se presentó lixiviación de nitratos para todos los tratamientos. La aparición de flujos preferenciales en la matriz del suelo, dado su alto contenido de arcillas, hace que el agua aplicada de riego no se distribuya uniformemente y que se presente dicha lixiviación. Sin embargo, la utilización de U, L y G, logró disminuir la concentración de NL en 88%, 84% y 74% respectivamente en comparación con SA200. Similares resultados fueron reportados por Alfaro *et al.* (2006), quienes valoraron la lixiviación de nitratos al aplicar 150 kg·ha⁻¹ de N por medio de abonos orgánicos e inorgánicos y encontraron que la concentración de nitratos en los lixiviados fue 50% más alta en los tratamientos con abonos inorgánicos que con los orgánicos.

Tabla 21. Efecto del uso de abonos nitrogenados de liberación lenta en la lixiviación de nitrato durante el periodo experimental de estevia.

Tratamiento	Nitratos Lixiviados (mg·L ⁻¹)		Volumen lixiviado (mL)	
	45 ddt	90 ddt	45 ddt*	90 ddt*
T	2,07 ±4,13cb	3,31 ±6,00abc	150,00±75,78a	162,67±47,92abcd
NC	25,83 ±26,38ab	11,57 ±6,17ab	155,00±29,30a	105,00±18,77abcd
U100	3,10 ±3,98bc	3,51 ±4,55abc	428,67±77,71a	416,33±42,55a
U150	3,10 ±6,20bc	1,24 ±1,24abc	286,33±187,83a	289,67±60,25abcd
U200	3,72 ±5,68bc	1,03 ±0,42ab	300,00±80,60a	371,33±62,71ab
SA100	7,65 ±4,31abc	1,86 ±2,59abc	380,67±62,29a	184,33±78,46abcd
SA150	4,96 ±6,56bc	0,41 ±0,83bc	284,67±57,34a	26,67±6,67d
SA200	31,00 ±15,75a	12,4 ±12,40a	121,67±15,21a	380,00±161,81a
L200	3,31 ±3,38bc	0,83 ±0,83bc	263,67±80,58a	74,00±37,22cd
L250	4,96 ±5,01bc	3,10 ±1,89abc	160,33±16,76a	117,67±45,56bcd
L300	2,89 ±5,79bc	0,62 ±0,72bc	235,00±67,35a	116,33±74,10bcd
G200	8,06 ±5,40abc	1,45 ±1,10abc	409,00±230,51a	253,33±108,84abcd
G250	0,21 ±0,42c	0,21 ±0,42c	274,33±140,11a	60,00±40,84cd
G300	2,07 ±2,98bc	0,62 ±0,72bc	334,67±66,95a	319,33±98,97abc
F	1,19	1,38	0,90	2,48
p	0,033	0,00	0,57	0,021

Promedio de tres repeticiones ± error estándar. Comparación de medias mediante la prueba de Tukey al 95% de confianza. T= testigo; U= urea; SA= sulfato de amonio; L= lombricompost; G= gallinaza. * Prueba de Dunnett al 95%. Anova de medidas repetidas ver anexo 10 y 13.

A los 90 días, las concentraciones de NL disminuyeron para todos los tratamientos. Los tratamientos SA200 y NC obtuvieron significativamente la mayor concentración de NL en comparación con los demás (p= 0.001). A pesar de que las concentraciones halladas en todos los tratamientos no superaron la máxima concentración recomendada por la OMS de 50 mg·L⁻¹ de nitratos (Arauzo y Valladolid, 2013), la presencia de NL implica bajas eficiencias en la FN y aumento en los costos de producción, puesto que este N no es aprovechado por las plantas y se requerirán mayores dosis de fertilizante para la obtención de altos rendimientos.

Con excepción de SA200 y G200, la mayor pérdida de nitratos se presentó a los 45 ddt. Los tratamientos NC y SA presentaron la mayor pérdida de nitratos debida a su rápida solubilidad del nutriente en comparación con los demás. A medida que aumentó la DN del SA aumentó la LN. La pérdida de nitratos de los tratamientos U

estuvieron por debajo del 50% de lo perdido por los fertilizantes convencionales; con excepción de G250, todos los tratamientos estuvieron por encima del T.

El volumen de lixiviados recolectados oscilaron entre 100 y 400 mL, donde la mayor pérdida ocurrió a los 45 ddt (Tabla 23, anexo 10). No se encontraron diferencias estadísticas entre tiempo de muestreo, ni en la interacción tiempo por tratamiento. Con excepción de SA200, a los 90 ddt la lixiviación fue menor que a los 45 días, donde los abonos orgánicos presentaron más bajos valores que los fertilizantes de liberación rápida, pero sin diferencias significativas entre ellos. Es de notar la alta variabilidad de los datos registrados, debido a principalmente a la mineralogía del suelo, cuya presencia de minerales de arcillas expandibles generan fenómenos de expansión y contracción ante la variación de humedad, que induce al reordenamiento de partículas y a cambios en la dinámica del agua dentro del suelo. A medida que el cultivo creció, el volumen del agua lixiviada disminuyó, debido a la mayor demanda hídrica y al aumento de la densidad de raíces que incrementaron la absorción.

La mayor pérdida de NL fue para SA200 ($12 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) mientras que la menor fue para G250 ($<1 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) (Figura 40). Los FLL tanto orgánicos como de síntesis química en sus distintas DN obtuvieron pérdidas por debajo de $4 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ en correspondencia con los volúmenes de lixiviados recolectados. Sin embargo, a pesar de utilizar láminas de riego calculadas a partir de un Kc promedio de 1,2, se presentaron pérdidas por lixiviación en los abonos convencionales como NC y SA, por encima de $2 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$.

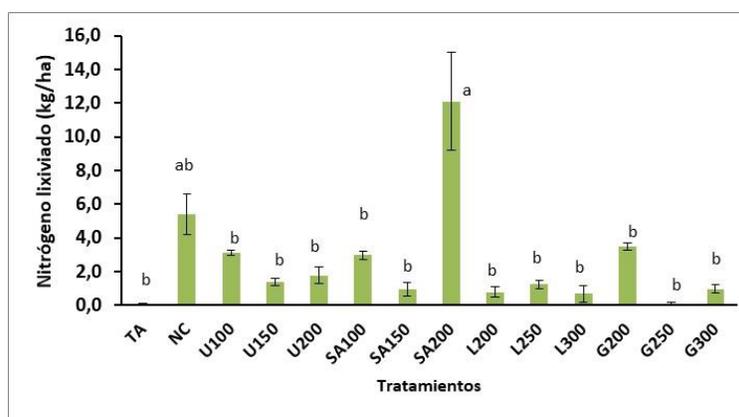


Figura 40. NL total en estevia usando FLL.

Letras iguales indican que no hay diferencias significativas entre tratamientos con un nivel de confianza del 95% (Prueba de Dunnett). ($F=1,60$; $p=0,14$) Las barras indican el error estándar.

3.4.4.2. Efecto de los Fertilizantes de Liberación Lenta (FLL) en propiedades agronómicas de estevia

Las AP estuvieron entre 30,0 y 38,7 cm sin diferencias estadísticas entre ellas ($p>0,05$) (Tabla 22). La mayor AP encontrada correspondió al NC mientras que la menor fue para U100. Los valores encontrados para los tratamientos U fueron similares a los obtenidos con los tratamientos SA. Las AP de NC estuvieron entre 5,4 y 8,7 cm por encima de U, lo que les permitió ser mejores competidoras por luz. Igualmente, los abonos orgánicos y T obtuvieron mayores AP que las fertilizadas con U, cuyos valores estuvieron entre 2,0 y 7,7 cm por debajo, lo cual correlaciona con los resultados encontrados de N en el suelo.

Los diámetros de tallo estuvieron entre 3,8 y 6,0 cm sin diferencias significativas entre tratamientos (Tabla 22). La aplicación de la lámina de agua con el Kc hallado posiblemente no fue suficiente, puesto que las plantas en días de altas temperaturas alcanzaron a presentar estrés hídrico. No se presentaron diferencias entre DN de U ni de éstas con NC y L. Los tratamientos con G obtuvieron diámetros mayores que los obtenidos por U y NC. Los resultados de los abonos orgánicos pueden estar relacionados con el mejoramiento de las condiciones de las propiedades físicas del suelo, que permitieron mayor retención de humedad.

Tabla 22. Efecto de la aplicación de abonos nitrogenados de liberación lenta en propiedades agronómicas de estevia.

Tratamiento	AP (cm)	Diámetro de tallo (mm)	MS (g·planta ⁻¹)	Rendimiento (Mg·ha ⁻¹)	NF (%)
T	36,3 ± 0,67a	4,2 ± 0,17a	14,7 ± 2,19a	4,6 ± 0,32a	0,70 ± 0,84a
NC	38,7 ± 3,71a	3,8 ± 0,14a	18,9 ± 4,76a	5,9 ± 2,01a	1,35 ± 0,81a
U100	30,0 ± 1,15a	3,9 ± 0,61a	11,1 ± 0,92a	3,7 ± 0,14a	0,85 ± 0,61a
U150	33,3 ± 5,81a	3,9 ± 0,14a	17,0 ± 3,95a	5,2 ± 1,19a	1,00 ± 1,04a
U200	33,0 ± 6,11a	3,9 ± 0,53a	10,8 ± 4,19a	3,5 ± 2,06a	0,85 ± 0,79a
SA100	34,7 ± 2,91a	4,6 ± 0,46a	17,5 ± 4,53a	5,2 ± 0,74a	0,75 ± 0,81a
SA150	32,3 ± 2,40a	3,9 ± 0,29a	15,2 ± 6,88a	4,8 ± 2,29a	1,67 ± 0,90a
SA200	32,7 ± 10,97a	4,2 ± 1,15a	16,7 ± 17,63a	4,8 ± 4,53a	2,12 ± 1,66a
L200	37,7 ± 4,05a	3,8 ± 0,75a	20,5 ± 4,62a	6,9 ± 1,63a	1,30 ± 1,17a
L250	35,3 ± 4,66a	3,8 ± 0,33a	18,4 ± 2,79a	6,4 ± 0,80a	1,17 ± 0,50a
L300	37,3 ± 2,91a	4,1 ± 0,14a	13,7 ± 5,55a	4,8 ± 1,67a	1,16 ± 0,45a
G200	34,7 ± 6,36a	4,3 ± 0,14a	13,6 ± 1,87a	4,7 ± 0,89a	1,23 ± 1,18a
G250	30,3 ± 3,34a	4,3 ± 0,29a	12,0 ± 4,85a	3,9 ± 1,49a	1,48 ± 1,51a
G300	37,3 ± 4,38a	4,0 ± 0,54a	24,7 ± 3,57a	7,7 ± 1,24a	1,23 ± 1,06a

Promedio de tres repeticiones ± error estándar. No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos. La comparación de promedios se realizó mediante la prueba de Tukey al 95% de confianza. ANOVA de medidas repetidas ver anexo 11 y 14.

La MS estuvo entre 10,8 y 24,7 g·planta⁻¹ para los tratamientos U200 y G300 respectivamente, sin diferencias significativas entre tratamientos. Cabe resaltar que los abonos orgánicos, en comparación con los abonos de síntesis química, obtuvieron mayores MS, lo que muestra su capacidad de mejorar condiciones físicas que promueven la conservación de la humedad. Pese a que no se encontraron diferencias significativas, las MS de los tratamientos con U resultaron más bajas que las halladas con NC, SA y los abonos orgánicos y parecidas a las obtenidas en T, lo que puede indicar que la época de aplicación y las condiciones del suelo no fueron las ideales, lo que implica que estos factores son muy importantes para garantizar el suministro del nutriente a la planta. Al analizar los tratamientos con abonos orgánicos de manera independiente se encontraron diferencias estadísticas entre G300 y T, G200, G250 y L300 (anexo 11)

Los rendimientos en producción de hoja seca también presentaron diferencias estadísticas entre tratamientos. Los valores encontrados estuvieron entre 3,5 y 7,7 Mg·ha⁻¹. Los valores hallados fueron similares a los reportados por Yang *et al.* (2013) quienes evaluaron la producción de MS aplicando diferentes planes de fertilización, alcanzando rendimientos máximos de 4,5 Mg·ha⁻¹. Los abonos orgánicos fueron los tratamientos que alcanzaron los rendimientos más altos por encima de NC y SA, donde se destaca el rendimiento alcanzado por G300. A los 90 ddt el contenido de NF fue similar para todos los tratamientos sin encontrarse diferencias significativas. Los porcentajes hallados estuvieron entre 0,70% (T) y 2,12% (SA200). De acuerdo con Osorio (2014) los contenidos de NF en la mayoría de las plantas están entre 2% y 6%. Borda-Molina *et al.* (2009) han reportado contenidos de NF para estevia entre 1,92% y 2,20%. Es de resaltar que los tratamientos T, U100, U200 y SA100, obtuvieron porcentajes por debajo de 1%, mostrando sus plantas deficiencia de N que pudo incidir en la cosecha obtenida. Los abonos orgánicos obtuvieron valores de NF por encima de 1% pero estuvieron entre 30% y 45% por debajo de SA200. Similar a lo hallado por Das *et al.* (2008), la deficiencia en N se vio reflejada en las características agronómicas de la planta como MS y AP. Es posible que el tiempo de aplicación y la DN aplicada de la U hayan afectado la absorción de N por la planta, al favorecer la inmovilización, reduciendo su disponibilidad. A mayor DN de U aplicada se presentó mayor concentración de NF. A pesar de no encontrarse diferencias significativas entre tratamientos, U200 superó en 29% el NF alcanzado por NC, pero estuvo 51% por debajo de SA200. En comparación con los abonos orgánicos, el L alcanzó 20% más de NF que U200 mientras que la G obtuvo valores similares.

3.4.4.3. Efecto de los Fertilizantes de Liberación Lenta (FLL) en propiedades del suelo:

Los registros de pH estuvieron entre 5,74 y 6,85 clasificados como moderados a ligeramente ácidos, por debajo del valor inicial de 7,89 (Tabla 23). La presencia de la planta y la absorción de nutrientes, así como los procesos de descomposición de los abonos, contribuyeron a la acidificación del suelo. Los valores de pH alcanzados se

consideran adecuados, ya que se incrementa la disponibilidad de nutrientes para la planta. Así mismo, fomenta la actividad microbiana participante en la descomposición de la MOS y, por tanto, la disponibilidad de N inorgánico se vio aumentada. Los tratamientos con L fueron los que alcanzaron los mayores valores de pH, seguidos de los de G, resultados relacionados con los altos valores de pH encontrados en estos abonos. Al analizar los tratamientos con abonos orgánicos de forma independiente se encontraron diferencias estadísticas entre L250 y L300, G300 y T. De igual manera, al comparar los abonos de síntesis industrial (U y SA) se encontraron diferencias estadísticas entre SA200, U100 y U150 con SA100 (anexo 12). Similares hallazgos fueron encontrados por Jácome *et al.* (2013) quienes, al aplicar lombricompost a suelos cultivados con frijol, redujeron su pH al cabo de 90 días, debido a la extracción de bases intercambiables como Ca^{+2} , Mg^{+2} y K^{+} , a la lámina de riego y presencia de flujos preferenciales que promueven el lavado de las mismas y al mismo proceso de descomposición de MOS, al generar grupos activos como los carboxilos que al liberar los iones H^{+} , aportan grados de acidez al suelo (Osorio, 2014).

Tabla 23. Efecto de los abonos nitrogenados de liberación lenta en las propiedades del suelo cultivado con estevia a los de 100 días después del trasplante.

Tratamiento	pH ¹	CE (dS·m ⁻¹)	MOS (%)	NTS suelo (%)
TA	6,06 ± 0,21cd	1,22 ± 1,21a	4,13 ± 0,44a	0,29 ± 0,25a
NC	6,18 ± 0,07bcd	1,13 ± 0,80a	4,53 ± 1,20a	0,40 ± 0,10a
U100	6,16 ± 0,12bcd	0,97 ± 0,22a	6,97 ± 0,36a	0,41 ± 0,12a
U150	6,17 ± 0,05bcd	0,78 ± 0,52a	5,86 ± 4,90a	0,22 ± 0,08a
U200	6,01 ± 0,09cd	1,12 ± 1,20a	3,95 ± 0,40a	0,26 ± 0,15a
SA100	5,74 ± 0,15d	1,41 ± 1,28a	5,53 ± 4,42a	0,36 ± 0,15a
SA150	6,36 ± 0,09abc	1,33 ± 0,50a	3,77 ± 0,12a	0,35 ± 0,17a
SA200	5,99 ± 0,29cd	1,68 ± 0,06a	7,01 ± 0,08a	0,28 ± 0,21a
L200	6,78 ± 0,06a	1,02 ± 0,94a	4,89 ± 0,92a	0,34 ± 0,23a
L250	6,85 ± 0,54a	1,00 ± 0,33a	7,82 ± 0,28a	0,41 ± 0,12a
L300	6,22 ± 0,16bcd	1,13 ± 0,62a	7,17 ± 1,13a	0,42 ± 0,70a
G200	6,39 ± 0,08abc	1,14 ± 0,16a	7,17 ± 0,65a	0,29 ± 0,21a
G250	6,56 ± 0,07ab	1,47 ± 0,83a	7,31 ± 0,44a	0,39 ± 0,24a
G300	6,25 ± 0,03bc	1,48 ± 0,30a	7,73 ± 1,45a	0,36 ± 0,14a

¹Promedio de tres repeticiones de la concentración de hidrógeno ± error estándar. Letras iguales indican que no existen diferencias significativas entre tratamientos. Comparación de medias por la prueba de Tukey al 95 % de confianza. Anova de medidas repetidas anexo 12 y 15

La CE del suelo al final del experimento, fue menor que la inicial para todos los tratamientos. Valores entre 0,78 y 1,68 dS·m⁻¹ fueron encontrados, donde el menor valor correspondió a U150 y el mayor a SA200. La aplicación de láminas de riego por encima de los requerimientos hídricos del cultivo, fomenta el lavado de bases y la acidificación del suelo tal como lo muestran los resultados. A pesar de no encontrarse diferencias significativas entre tratamientos, los resultados arrojaron resultados de CE directamente proporcionales con la DN del abono, independiente de su tipo. Los tratamientos que presentaron mayor lixiviación, fueron los que reportaron menores valores de CE, con excepción de SA200, el cual dada la alta DN, presentó mayor LN, pero también mayor cantidad acumulada en el suelo. Jácome *et al.* (2013) también encontraron que la CE disminuyó después de la aplicación de abonos orgánicos e inorgánicos en un cultivo de frijol y afirmaron que la principal razón de esta situación obedece a la absorción por las plantas, de aniones y cationes formadores de sales.

Los porcentajes de MOS estuvieron entre 3,77% y 7,73%, sin diferencias estadísticas entre tratamientos. Los abonos orgánicos registraron valores de MOS por encima de 7% incrementando en más de 50% el contenido inicial de 3,50%. Sin embargo, dada la baja C/N de estos abonos, es de esperarse que estos valores desciendan a medida que se vaya dando el proceso de mineralización. Los incrementos en los porcentajes de MOS con respecto al valor inicial, también obedecen a la presencia de las raíces de las plantas y la rizósfera generada, rica en compuestos orgánicos y microorganismos que incrementa la biomasa del suelo.

No se encontraron diferencias significativas en NTS. Los valores estuvieron entre 0,22% y 0,42%, considerados como altos (González *et al.*, 2015). A pesar de esto, al contrastar con el NF a los 90 días, los tratamientos U presentaron los menores valores. Esto podría deberse a que el contenido de NTS esta principalmente en formas orgánicas que no permitieron la rápida asimilación por la planta. La velocidad de suministro del nutriente

brindado por los tratamientos U no lograron abastecer a la planta, lo que sugiere que la aplicación de este tipo de abono de liberación lenta debe hacerse con mayor tiempo de anterioridad a la siembra o trasplante, para garantizar el suministro apropiado del N, en el momento de mayor demanda por la planta. El alto valor de pH del suelo, así como las altas temperaturas registradas en el periodo de la experimentación, pudieron incidir en la actividad microbiana, que limitó la solubilización de la urea y la descomposición de los abonos orgánicos, reduciendo la disponibilidad de N para la planta.

La ER de N estuvo por debajo del 50% para todos los tratamientos siendo acorde por lo reportado por Hirel *et al.* (2011) (Figura 41A). El tratamiento NC obtuvo la mayor eficiencia, 30% más que SA y 40% más que los FLL. Los tratamientos con SA presentaron baja eficiencia a pesar de que obtuvieron los más altos contenidos de NF. Es posible que estos fertilizantes en el proceso de mineralización hayan presentado pérdidas por volatilización al igual que U. Los abonos orgánicos obtuvieron bajas eficiencias, aunque fueron los tratamientos que menos NL presentaron, obtuvieron concentraciones de NF baja, lo que puede deberse a bajas tasas de mineralización, y por tanto, a la baja disponibilidad de N inorgánico en el momento de la medición. Lo anterior indica que las mediciones de eficiencia de FLL debe contemplar el efecto residual, puesto que es probable que en la siguiente cosecha su eficiencia aumente al ser reservorios del nutriente en el suelo.

Los valores de EI estuvieron por debajo de $50 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Figura 41B) para todos los tratamientos, no alcanzando el rango óptimo reportado por Dobermann (2007), el cual está entre 55 y $65 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, que son los valores encontrados en cultivos de cereales con nutrición balanceada para alto rendimiento. Estos resultados correlacionan con los resultados encontrados en las características agronómicas de las plantas.

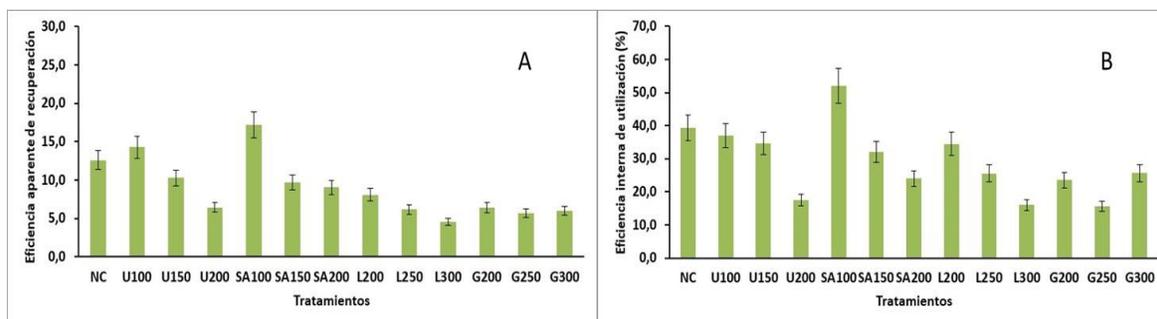


Figura 41. A Eficiencia aparente de recuperación. B. Eficiencia interna de utilización del N aplicado en plantas de estevia. NC = Nitrato de calcio; U= Urea de liberación lenta; SA= sulfato de amonio; L= lombricompost; G= Gallinaza. Los números indican las DN empleadas en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de N. Las barras indican el error estándar.

Más del 50% del N aplicados en los tratamientos NC, SA150 y SA200 fueron encontrados en las hojas de las plantas situándose por encima de los demás tratamientos. La relación (N foliar) / (N aplicado) fue mayor para los fertilizantes de síntesis química como el SA y NC en comparación con los abonos orgánicos. La rápida disponibilidad del nutriente que brinda los fertilizantes convencionales, hace que las plantas puedan absorberlo en el momento justo, pero con mayor riesgo de lavado en el perfil del suelo. Los abonos orgánicos, por el contrario, deben pasar por el proceso de mineralización, lo que disminuye la disponibilidad inmediata del nutriente. Salvo para el NC y SA, los porcentajes de NF con respecto al aplicado estuvieron por debajo del 30% coincidiendo con lo reportado por Hirel *et al.* (2011). El tratamiento U150 obtuvo la mayor relación NF/N aplicado con respecto a las otras dos DN, pero estuvo 35,7% y 36,1% por debajo de lo conseguido por el NC y SA150. Para el caso de los abonos orgánicos, dicha relación estuvo por debajo del 40%, con un comportamiento inversamente proporcional a la DN aplicada.

3.4.4.4. Efecto de Fertilizantes de Liberación Lenta (FLL) en la eficiencia de uso del agua

No se encontraron diferencias significativas en la eficiencia, cuyos valores estuvieron entre 1,1 y 2,7 kg de MS m⁻³ de agua aplicada, valores similares a los reportados para cereales (1,1 – 3,0 kg·m⁻³) (Steduto *et al.*, 2012) y hortalizas como tomate y papa (1,3 – 3,5 kg·m⁻³) (Quiroz & Chijoy, 2012; Battilani *et al.*, 2012) (Figura 42).

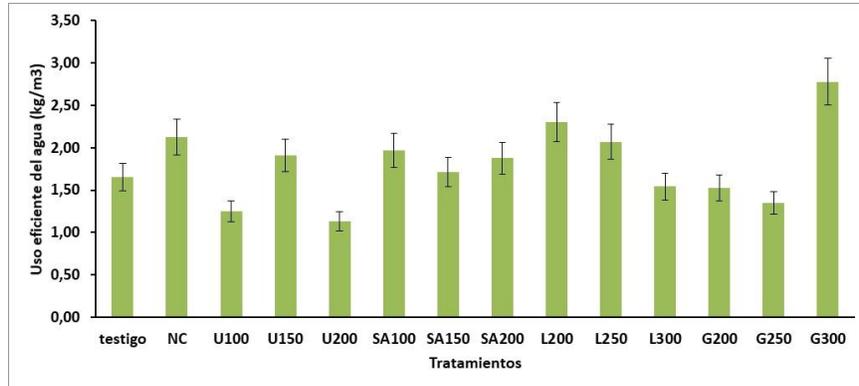


Figura 42. Efecto de los abonos de liberación lenta en el uso eficiente de de agua.

TA= testigo absoluto; NC = Nitrato de calcio; U= Urea de liberación lenta; SA= sulfato de amonio; L= lombricompost; G= Gallinaza. Las barras indican el error estándar.

3.4.5. Uso de Fertilizantes de Liberación Lenta (FLL) en la Fertilización Nitrogenada (FN) de albahaca

A continuación, se muestran los resultados del uso de ls FLL en los cultivos de estevia y albahaca. En primer lugar, se muestra el efecto de la aplicación de FLL en NL, seguidamente su evaluación en las propiedades agronómicas y en las propiedades del suelo. Por último, se evalúa su eficiencia agronómica y en el uso del agua.

3.4.5.1. Efecto de los Fertilizantes de Liberación Lenta (FLL) en el Nitrógeno Lixiviado (NL)

En las primeras dos semanas del experimento, la lámina de riego aplicada a los tratamientos fue calculada con base a la humedad de CC del suelo, permitiendo un coeficiente de agotamiento del 10%. En estas dos primeras semanas, se presentó lixiviación en los tratamientos con abonos orgánicos (L200, L250, L300, G200, G250 y G300), debido a que la MOS favorece la estructuración del suelo y las relaciones de porosidad, aumentando la circulación del agua y del aire y, por lo tanto, la lixiviación es mayor. A partir de la tercera semana, la lámina de riego fue calculada a partir del Kc previamente determinado y la ET medida en el tanque evaporímetro tipo A instalado en el invernadero. Con estas láminas de riego, no se presentaron lixivaciones en ningún tratamiento.

Las concentraciones de amonio (NH₄⁺) hallados en los lixiviados estuvieron entre 1,47 y 3,09 mg·L⁻¹ para los tratamientos sin diferencias estadísticas entre ellos (Tabla 26). No se encontraron diferencias entre las DN empleadas para un mismo abono, ni entre abonos. Las concentraciones de nitratos estuvieron entre 10,38 y 21,01 mg·L⁻¹ correspondientes a L300 y L200 respectivamente. Se presentó alta variabilidad de datos, debido a las grietas presentadas durante los periodos de secado y humedecimiento durante el día, que altera la retención de humedad y la permeabilidad del suelo. Los valores hallados se encuentran por debajo de la concentración de nitratos permitida para agua de consumo humano de 50 mg·L⁻¹ propuesto por la OMS.

Los volúmenes de lixiviados estuvieron entre 50 y 270 mL para los tratamientos que presentaron lixiviación (Tabla 24). El tratamiento G300 presentó la mayor cantidad de lixiviados, siendo estadísticamente diferente de las otras DN y del L. A pesar de que todos los tratamientos recibieron, la misma cantidad de agua conforme al cálculo realizado para llevar a CC, solamente los abonos orgánicos presentaron pérdida de agua por lixiviación. Lo anterior se explica por la capacidad de los abonos orgánicos de dar soltura al suelo, disminuyendo su

densidad aparente e incrementando su porosidad. Estas condiciones mejoran la infiltración y favorecen el movimiento del agua dentro del suelo, incluso más allá del sistema de raíces, reduciendo la eficiencia del uso del agua por la planta y alimentando los depósitos de agua subterránea. Cuando se empleó el Kc para la determinación de la lámina de riego, la pérdida de agua por lixiviación se redujo sustancialmente.

Tabla 24. Efecto de abonos orgánicos en la lixiviación de amonio, nitrato, total amoniacal y volumen lixiviado total durante el periodo experimental de 80 (DDT) en albahaca.

Tratamiento	NH ₄ ⁺ ·mg·L ⁻¹ (1)	NO ₃ ⁻ ·mg·L ⁻¹ (2)	N-amoniacal mg·L ⁻¹ (2)	Voúmenes lixiviados mL (2)	N Total lixiviado (kg·ha ⁻¹) (1)
L200	3,09±0,70a	21,01±0,9a	24,1±0,90a	100,3±46,51b	0,43±0,16ab
L250	2,81±0,43a	12,07±1,11a	14,88±1,30a	108,33±10,00b	0,37±0,03ab
L300	1,91±0,05a	10,38±1,72a	12,29±1,76a	60,00±9,81b	0,16±0,01b
G200	1,47±0,61a	8,93±0,09a	10,39±0,64a	142,67±22,23ab	0,33±0,03ab
G250	2,92±0,16a	15,10±3,46a	14,88±3,52a	108,33±33,93b	0,49±0,25ab
G300	2,38±0,44a	10,72±0,35a	13,09±0,68a	272,00±29,96a	0,82±0,13a
F	1,89	1,03	1,26	6,76	2,72
P	0,17	0,44	0,34	<0,001	0,01

Promedio de tres repeticiones ± error estándar. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas entre tratamientos ¹ comparación de promedios mediante la prueba de Duncan 95% ² comparación de promedios mediante la prueba de Dunnett (95%). TA= testigo absoluto; NC = Nitrato de calcio; U= Urea de liberación lenta; SA= sulfato de amonio; L= lombricompost; G= Gallinaza.

El NL estuvo por debajo de 1 kg·ha⁻¹ para los tratamientos con abonos orgánicos (Tabla 26). A medida que se aumentó la DN de gallinaza, la pérdida de N también aumentó, mientras que, en el L ocurrió al revés, la mayor DN presentó la menor pérdida de N. La DN más alta de G consiguió el valor más alto de NL, mientras que la más alta de L, fue la que obtuvo el valor más bajo. Los tratamientos con FLL convencionales como los de rápida liberación no presentaron lixiviación, indicando que el manejo del agua es más determinante a la hora de mejorar la retención de N en el suelo, que incluso la DN y el tipo de fertilizante tal como lo sugirió Cavero *et al.* (2012).

3.4.5.2. Efecto de los Fertilizantes de Liberación Lenta (FLL) en propiedades agronómicas de albahaca.

Las AP alcanzadas estuvieron entre 44,4 y 57,8 cm correspondientes a SA100 y G250 respectivamente, pero sin diferencias estadísticas entre tratamientos (Tabla 25). Las AP fueron independientes de la DN aplicada y de la fuente utilizada. Los valores hallados fueron similares a los reportados por Gonzalez *et al.* (2009), pero más altos a los hallados por González (2013). Los diámetros de tallo estuvieron entre 5,3 y 6,6 mm correspondientes a U150 y G300 respectivamente sin diferencias entre tratamientos. Los valores de diámetro de tallo estuvieron por encima de los reportados por Guerrero (2008). Los diámetros alcanzados por la G estuvieron entre 2% y 10,6% por encima del T, mientras que el L lo estuvo solamente en un 2%. Los diámetros alcanzados estuvieron por encima de los obtenidos en el experimento anterior, donde se evaluaron varias DN usando urea como fuente. Estos resultados indican que, para el desarrollo del diámetro de tallo, no sólo es importante considerar la DN, sino también la fuente y la lámina de agua aplicada. En el primer experimento, la lámina aplicada fue calculada para llevar el suelo a valores cercanos a la CC, mientras que las láminas de agua aplicadas en este experimento, fueron calculadas utilizando el Kc; dichas láminas aplicadas mantuvieron el suelo en niveles de humedad por debajo de CC. Es posible que la reducción en la lixiviación, mantuviera elementos importantes como el N y las bases intercambiables en el suelo, lo que permitió mayor absorción de nutrientes por parte de la planta y se vió reflejado en el diámetro del tallo. También es de resaltar que los abonos empleados en este experimento, no sólo estaban compuestos por N, sino que tenía contenidos de azufre (S), fósforo (P) y calcio (Ca) entre otros, brindando otros nutrientes a la planta.

Las MF y MS estuvieron entre 27,7 y 54 g·planta⁻¹ y entre 8,1 y 13,1 g·planta⁻¹ respectivamente. Los tratamientos con G obtuvieron valores de MF por encima de los demás tratamientos, sin diferencias significativas entre DN aplicadas. La G incrementó la MF de la albahaca en un 17% con respecto a L250, en 30% con respecto SA200, 33% con respecto a U200, 37% con respecto al NC y 26% con respecto al T. Al analizar los tratamientos con

abonos orgánicos de manera independiente se encontraron diferencias estadísticas entre G250 y L300 (anexo 13). Estos resultados pueden deberse en primer lugar, al mayor contenido de N que tenía este abono con respecto al L, y a su mayor contenido de N potencialmente mineralizable. En segundo lugar, los abonos orgánicos mejoran la estructura y las relaciones de porosidad; este suelo presenta baja macroporosidad en sus condiciones naturales, limitando su aireación; la aplicación de abonos orgánicos pudo mejorar las condiciones de porosidad y el ingreso de oxígeno al suelo, estimulando la actividad microbiana y mineralizando el N. En tercer lugar, el aumento del área superficial de adsorción del suelo, que incrementa la capacidad de retención de agua y cationes. Los abonos de moderada y rápida liberación, al suministrar N fácilmente disponible, este pudo haber sido traslocado a capas más profundas, mayores de 10 cm, más allá de la zona de raíces, por esta razón, las respuestas en planta no fueron las mismas. Similar comportamiento presentó la MS, donde los tratamientos con G obtuvieron los mayores valores que los tratamientos con L y similares a la DN más alta con SA. Los abonos orgánicos no sólo suministran nutrientes, sino que modifican favorablemente las propiedades físicas del suelo, que permite una mejor absorción por parte de las plantas.

Tabla 25. Efecto del uso de abonos nitrogenados de liberación lenta en propiedades agronómicas de albahaca.

Tratamiento	AP (cm) ¹	Diámetro de tallo (mm) ²	MF aérea (g) ³	MS aérea (g) ²	Porcentaje de MS ¹	Rendimiento MF (Mg·ha ⁻¹) ²	Rendimiento de MS (Mg·ha ⁻¹) ¹	% NF ⁴
TA	53,5±0,5a	5,9±0,3a	40,3±4,2abcd	10,0±0,8cd	25,1±1,2c	9,2±1,0abcd	2,3±0,2cd	0,1±0,0c
NC	47,3±1,7a	5,9±0,5a	33,6±1,0cd	11,0±0,6bcd	32,5±0,6abc	7,6±0,2cd	2,5±0,1bcd	0,7±0,2c
U100	52,9±2,4a	5,7±0,1a	35,6±3,2bcd	13,1±1,4abc	36,6±1,3abc	8,1±0,7bcd	3,0±0,3abc	2,7±0,6ab
U150	50,8±3,6a	5,3±0,2a	32,5±1,9cd	10,1±0,8cd	31,1±1,1abc	7,4±0,4cd	2,3±0,2cd	2,8±0,4a
U200	51,0±3,5a	6,2±0,3a	36,3±7,8bcd	10,8±2,4bcd	29,4±1,7abc	8,3±1,8bcd	2,4±0,6bcd	0,4±0,0c
SA100	44,4±2,5a	5,9±0,2a	31,0±4,3cd	9,6±1,3cd	30,8±1,0abc	7,1±1,0cd	2,2±0,3cd	2,7±0,0ab
SA150	52,4±6,5a	5,9±0,0a	29,9±3,1d	11,4±0,4bcd	38,7±3,5ab	6,8±0,7d	2,6±0,1bcd	3,5±0,4a
SA200	55,9±2,2a	5,8±0,3a	37,6±1,8bcd	15,9±2,2a	43,0±7,9a	8,5±0,4bcd	3,6±0,5a	3,0±0,2a
L200	53,4±1,2a	5,7±0,4a	40,1±3,5abcd	10,3±0,4bcd	26,0±1,2bc	9,1±0,8abcd	2,3±0,1bcd	0,6±0,1c
L250	47,7±1,4a	6,0±0,3a	45,0±7,3abc	11,4±1,2bcd	26,0±2,5bc	10,2±1,7abc	2,6±0,3bcd	0,3±0,0c
L300	51,0±7,4a	5,6±0,3a	27,7±2,2d	8,1±0,6d	29,3±1,2bc	6,3±0,5d	1,8±0,1d	0,6±0,2c
G200	56,2±5,5a	6,0±0,5a	49,1±6,1ab	12,0±1,0abcd	24,6±0,9c	11,2±1,4ab	2,7±0,2abcd	0,5±0,1c
G250	57,8±2,0a	6,1±0,3a	54,0±5,8a	14,3±1,3ab	26,6±0,5bc	12,3±1,3a	3,3±0,3ab	1,4±0,4bc
G300	48,0±7,1a	6,6±0,4a	41,0±3,0abcd	12,2±0,2abcd	30,0±2,0abc	9,3±0,7abcd	2,8±0,0abcd	0,9±0,0c
F	1,10	0,83	2,85	2,65	4,31	2,85	2,64	9,68
p	0,37	0,63	0,01	0,02	0,00	0,01	0,02	0,00

Promedio de tres repeticiones ± error estándar. Letras iguales indican que no existen diferencias significativas entre las medias. ¹Comparación de promedios por el Test de Dunnett (95%); ²Comparación de promedios por el Test de Duncan (95%); ³Comparación de promedios por el Test de Tukey (95%). ⁴NF= nitrógeno foliar. TA= testigo absoluto; NC = Nitrato de calcio; U= Urea de liberación lenta; SA= sulfato de amonio; L= lombricompost; G= Gallinaza. Anova de medidas repetidas en anexo 16 y 18.

A medida que aumentó la DN aplicada, el porcentaje de MS se incrementó, tanto en los tratamientos con abonos orgánicos como en los de síntesis industrial. Los tratamientos con U y los de SA presentaron los mayores valores, entre 31% y 43% aproximadamente, sin diferencias estadísticas entre ellos (anexo 16). La U permitió el suministro adecuado de N para el crecimiento y la formación de tejidos y órganos vegetales. Comparando las DN evaluadas, la aplicación de 100 y 150 kg·ha⁻¹ fueron las que mayor porcentaje obtuvieron, sin diferencias significativas entre ellas, pero si con el resto evaluado (Figura 43A). A su vez, fueron los abonos de liberación rápida los que mejores porcentajes consiguieron, siendo significativamente diferentes de los FLL (Figura 43B); los abonos convencionales proporcionaron mayor porcentaje de MS que los abonos orgánicos (Figura 43C). Los abonos orgánicos favorecieron la absorción de agua y nutrientes pero su concentración de minerales fue menor, mientras que los abonos de liberación más rápida, permitieron mayor concentración de minerales, y por tanto mayor porcentaje de MF. Estos resultados sugieren que, dependiendo del destino final de la albahaca, se deben aplicar diferentes tipos de fertilizantes, de tal manera que, para comercialización en fresco, el uso de

abonos orgánicos resulta ser más apropiado y para forma deshidratada o extracción de aceites, la fertilización con abonos como el sulfato de amonio o la urea recubierta resulta mejor.

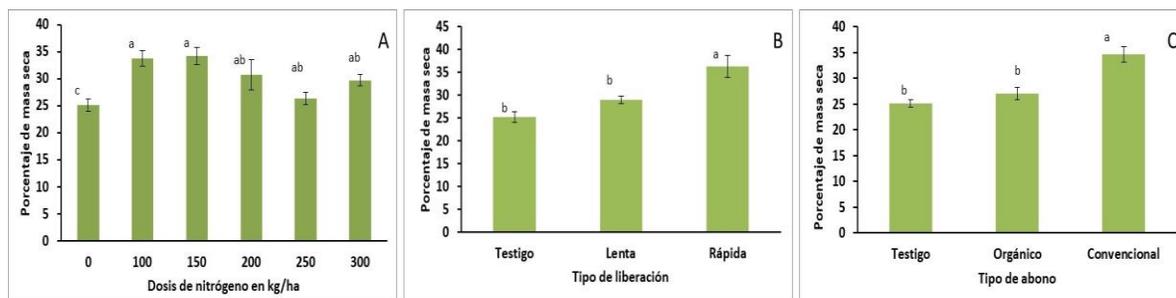


Figura 43. A. Efecto de la DN ($F=1,98$; $p=0,11$), B. el tipo de abono ($F=11,56$; $p<0,001$) y C. el tipo de liberación ($F=9,16$; $p<0,001$) en el porcentaje de MS de albahaca.

Comparación de medias por la prueba de Tukey (95%). TA= testigo absoluto; NC = Nitrato de calcio; U= Urea de liberación lenta; SA= sulfato de amonio; L= lombricompost; G= Gallinaza. Las barras indican el error estándar.

Los rendimientos de hoja fresca y seca fueron mayores para los tratamientos con G, en especial en la DN de $250 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Este tratamiento obtuvo 25% más de MF y 30% más de MS que el T. Los valores de MF de la G no fueron estadísticamente diferentes de las halladas con las DN más bajas de L, ni con los tratamientos con U. Al analizar los tratamientos con abonos orgánicos por separado solamente se encontraron diferencias entre G250 y L300 para hoja fresca y entre G250 y L300 y T para masa seca (anexo 16).

El NF estuvo entre 3,5% y 0,1% para SA150 y T respectivamente. Los tratamientos con SA fueron los que presentaron los mayores valores, estadísticamente diferentes de los abonos orgánicos, del T y del NC. Los valores fueron muy similares a los de la U. Esto podría indicar que el S, elemento secundario indispensable para el crecimiento de las plantas y en el proceso de fotosíntesis, jugó un papel importante en los resultados hallados. Tanto el SA como la U contienen una cantidad representativa de S que pudo haber favorecido la absorción de N. Al analizar los tratamientos con abonos orgánicos por separado solamente se encontraron diferencias entre G250 y T, L250, L300 y G200 (anexo 17). Así mismo, al analizar de forma independiente la U y el SA no se encontraron diferencias estadísticas entre ellos, pero sí entre SA200 y T (anexo 17). Las DN de 100, 150 y $200 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de N obtuvieron los mayores porcentajes de NF sin diferencias significativas entre ellos, pero sí fueron diferentes del T y de las DN más altas de N aplicadas (Figura 44). Nuevamente los fertilizantes convencionales de rápida liberación fueron los que obtuvieron los valores más altos sin diferencias significativas con los FLL.

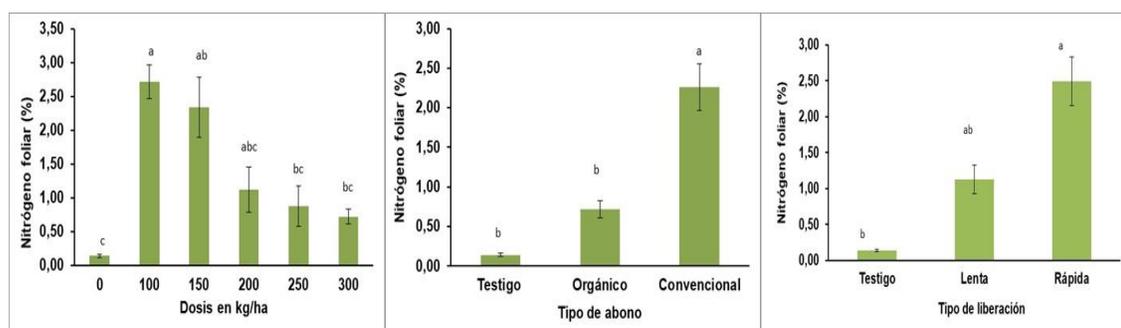


Figura 44. Efecto de la DN ($F=5,99$; $p=0,00$), el tipo de abono ($F=16,2$; $p<0,001$) y el tipo de liberación ($F=9,68$; $p<0,001$) en el porcentaje de NF en albahaca.

Comparación de medias mediante la prueba de Tukey al 95%. TA= testigo absoluto; NC = Nitrato de calcio; U= Urea de liberación lenta; SA= sulfato de amonio; L= lombricompost; G= Gallinaza. Las barras indican el error estándar.

3.4.5.3. Efecto de los Fertilizantes de Liberación Lenta (FLL) en las propiedades del suelo:

Los valores del pH del suelo, después de la cosecha de albahaca, estuvieron por encima de 7,0 para todos los tratamientos (Tabla 26). No se encontraron diferencias estadísticas entre abonos orgánicos, ni de estos con la

U y los fertilizantes de rápida liberación. Los valores encontrados estuvieron entre 7,11 y 7,48 correspondientes a los tratamientos SA150 y G200 respectivamente, los cuales no variaron con el valor inicial determinado en la caracterización.

Tabla 26. Efecto del uso de abonos nitrogenados de liberación lenta en propiedades del suelo cultivado con albahaca.

Tratamiento	pH ¹	C.E. (dS·m ⁻¹) ²	M.O. (%) ¹	NTS (%) ³
TA	7,37±0,10ab	0,51±0,06fg	4,08±0,39abc	0,22±0,04
NC	7,44±0,05ab	0,96±0,07cd	3,73±0,16bc	0,11±0,05
U100	7,42±0,19ab	0,64±0,05defg	3,76±0,12bc	0,17±0,01
U150	7,17±0,63ab	0,87±0,05cde	3,87±0,20abc	0,10±0,02
U200	7,23±0,02ab	0,96±0,09cd	3,68±0,23c	0,13±0,06
SA100	7,36±0,48ab	1,08±0,10bc	3,73±0,24bc	0,14±0,05
SA150	7,11±0,38b	1,35±0,07ab	3,84±0,29bc	0,06±0,01
SA200	7,21±0,35ab	1,44±0,06a	3,76±0,12bc	0,21±0,01
L200	7,37±0,16ab	0,69±0,09defg	4,62±0,21abc	0,14±0,03
L250	7,44±0,11ab	0,49±0,03g	5,18±0,31ab	0,16±0,04
L300	7,41±0,19ab	0,60±0,04efg	4,08±0,05abc	0,09±0,01
G200	7,48±0,21a	0,63±0,06efg	3,97±0,42abc	0,15±0,04
G250	7,40±0,60ab	0,82±0,08cdef	4,99±0,33abc	0,12±0,00
G300	7,47±0,19a	0,78±0,05cdefg	5,31±0,49a	0,19±0,03
F	2,95	21,19	4,27	1,96
p	0,01	0,00	0,00	0,07

¹Promedio de tres repeticiones de la concentración de hidrógeno ± error estándar. ¹Comparación de promedios mediante el Test de Tukey (95%); ² Comparación de promedios mediante el Test de Duncan (95%); ³ Comparación de promedios mediante el Test de Dunnett (95%). Letras iguales indican que no existen diferencias significativas entre las medias. Promedio de tres repeticiones ± error estándar. NT= nitrógeno total del suelo. TA= testigo absoluto; NC = Nitrato de calcio; U= Urea de liberación lenta; SA= sulfato de amonio; L= lombricompost; G= Gallinaza. Anova de medidas repetidas anexo 17 y 19.

El SA modificó significativamente la CE del suelo, donde la DN de 200 kg·ha⁻¹ la incrementó en un 65% con respecto al testigo. Al igual, que en el experimento con estevia, a mayor DN de sulfato de amonio, mayor fue la CE. La CE aumentó con la DN aplicada, independiente de la fuente aplicada. La urea de liberación lenta en DN de 200 kg·ha⁻¹ aumentó la CE en 47% con respecto al testigo. Los valores más bajos de CE hallados con los abonos orgánicos están relacionados con la presencia de lixiviados en las primeras etapas del cultivo, ocasionando el lavado de nutrientes. Al analizar los tratamientos con abonos orgánicos por separado solamente se encontraron diferencias entre G250, G300 y L250 y T (anexo 17). Las DN tuvieron un efecto significativo en la CE (p= 0,01), donde las DN de 150 kg·ha⁻¹ obtuvieron los valores más altos de CE, estadísticamente diferente del T y de las DN más altas empleadas con los abonos orgánicos. Así mismo, los abonos orgánicos obtuvieron los menores valores de CE que los convencionales o de síntesis química, con diferencias significativas (p<0.01). Los abonos orgánicos no cambiaron el valor de esta variable en comparación con el T. Los FLL, tanto orgánicos como de síntesis, obtuvieron los menores valores de CE diferente a los abonos de rápida liberación (p<0,01) (anexo 19).

La MOS estuvo entre 3,68% y 5,31% correspondientes a los tratamientos U200 y G300 respectivamente, encontrando diferencias significativas entre tratamientos. Todos los tratamientos incrementaron el contenido de MOS con respecto a su valor inicial (2,32%), debido a la presencia de la planta que aporta masa orgánica y al desarrollo de actividad microbiana en la zona cercana a las raíces. Como era de esperarse, los tratamientos con abonos orgánicos incrementaron significativamente la MOS con respecto a los fertilizantes de síntesis química, siendo las DN de 250 y 300 kg·ha⁻¹ las que contribuyeron a aumentar el contenido de forma significativa (p< 0.01). El tipo de liberación no tuvo incidencia significativa en la MOS (p= 0,032).

El porcentaje de NTS estuvo entre 0,06% y 0,22% con una alta variabilidad en los datos obtenidos, estando en los rangos comunes para suelos cultivados (Navarro y Navarro, 2003). No se encontraron diferencias entre tratamientos, ni se incrementaron los valores sustancialmente con respecto a los iniciales, contrario a lo esperado. Probablemente los abonos orgánicos perdieron parte del N por lixiviación ocurrida en las primeras semanas del experimento o también pudo haberse perdido por volatilización en el proceso de amonificación de los compuestos orgánicos nitrogenados constituyentes de dichos abonos. En el caso de la U, es muy probable

que el N liberado haya sido absorbido por la planta, como se pudo apreciar con los mayores valores de NF. Al analizar los tratamientos con U y SA de forma independiente se encontró diferencias estadísticas entre SA200 y T (anexo 19)

Las ER obtenidas con los abonos orgánicos fueron las más bajas, por debajo del 10%, similares a la del testigo, mientras que los tratamientos con SA obtuvieron las mayores eficiencias, por encima del 30% (Figura 45A). La U obtuvo la ER mayor al 10% para las DN más altas (100 y 150 kg·ha⁻¹), mientras que la DN de 200 kg·ha⁻¹ fue la más baja, sin diferencias significativas con las de los abonos orgánicos. Estos resultados pueden obedecer a que los FLL, sean orgánicos o de síntesis industrial, necesitan aplicarse con mayor anterioridad a la siembra. De acuerdo a la dinámica de mineralización explicada anteriormente, el L y la G deben aplicarse con dos semanas de anterioridad, para brindar más del 25% del N total; en este experimento, sólo fue aplicada con una semana no más, lo que puede significar que no liberó todo el N, y no se hizo disponible para la planta en el momento oportuno. Además, dentro de esta eficiencia se tuvo en cuenta todo el N contenido en el abono, el cual solo un pequeño porcentaje estará disponible para la planta, el resto está en formas orgánicas, cuya mineralización puede tardar un tiempo prudencial de meses e incluso de años. En el caso de la U, es posible que haya ocurrido la misma situación, y que sea necesario aplicarla con mayor anterioridad. El NC, obtuvo una eficiencia menor, debido a la alta movilidad del nitrato y a la baja densidad de raíces en edades tempranas de la planta para absorberlo, lo que pudo haber generado su movimiento a capas más profundas. De acuerdo con Roberts (2008), las ER para cereales generalmente están entre 20% y 30% en cultivos de secano y pueden alcanzar hasta un 40% en cultivos bajo irrigación; estos bajos valores no significan un aspecto negativo, porque no necesariamente alta eficiencia significa buenas cosechas y viabilidad para el agricultor o para el ambiente. En efecto, se ha demostrado que las bajas cosechas vienen acompañadas de altas eficiencias de uso de nutrientes y viceversa, como se encontró en este experimento, pero los aspectos ambientales como por ejemplo la protección contra la erosión del suelo se vería comprometida por la reducción en la producción de residuos de cosecha.

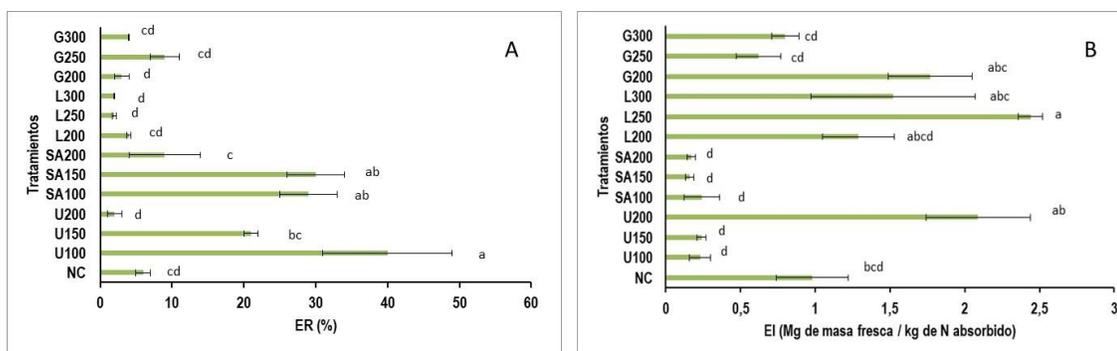


Figura 45. Eficiencias de la FN en albahaca usando diferentes FLL. (A) Eficiencia aparente de recuperación ($F=14,85$; $p<0,001$) (B) Eficiencia interna de utilización ($F=12,27$; $p<0,001$) del N para diferentes tipos de fertilizantes utilizados. NC = Nitrato de calcio; U= Urea de liberación lenta; SA= sulfato de amonio; L= lombricompost; G= Gallinaza. Las barras indican el error estándar.

A pesar de que los abonos orgánicos presentaron bajas ER, las EI si estuvo dentro de las más altas, puesto que el N suministrado por los abonos se manifestó en mayor producción de MF (Figura 45B). Además, la adición de abonos orgánicos trae beneficios adicionales como, por ejemplo, mejor acondicionamiento físico del suelo, aporte de otros nutrientes y mayor actividad microbiana entre otras. En el caso de la G, la DN de 200 kg·ha⁻¹ produjo más de 1,5 Mg de MF por cada kg de N absorbido por la planta, mientras que para el L fue la DN de 250 kg·ha⁻¹, la que obtuvo valores cercanos a los 2,5 Mg·kg⁻¹ de N absorbido. Para la U, la mayor DN fue la que obtuvo mayor EI, cercano a los 2 Mg·kg⁻¹ de N absorbido. Los fertilizantes de rápida liberación obtuvieron EI por debajo de 1 Mg·kg⁻¹ de N absorbido, lo cual puede deberse probablemente a la volatilización del N en el proceso de aminificación y amonificación que se ve favorecida por el pH básico del suelo o por inmovilización del N ocasionado por la actividad microbiana del mismo.

Vale la pena aclarar que estos valores de eficiencia fueron calculados sólo para permitir la comparación entre tratamientos durante el tiempo experimental. Los valores no pueden ser aplicados como valores de referencia, puesto que para conocer la eficiencia del N es necesario entender la dinámica a largo plazo del ciclo del N (Roberts, 2008).

3.4.5.4. Efecto de la Fertilizantes de Liberación Lenta (FLL) en la eficiencia del uso del agua (EUA)

Todos los tratamientos obtuvieron similares valores de eficiencia, con valores entre 3 y 6 y entre 1 y 1,5 kg·m⁻³ de MF y MS por m³ de agua respectivamente (Figura 46). Estos valores resultaron más bajos de los obtenidos en el experimento con DN de urea con 46% de N. Estas diferencias pudieron deberse a las diferentes condiciones climáticas presentadas en cada experimento, donde a mayor temperatura, hubo mayor demanda de agua, limitando la producción de masa. Los valores hallados son similares a los reportados a cereales como el maíz, que están entre 1,3 y 1,5 kg·m⁻³ (Reta *et al.*, 2010) y arroz que están 0,6 y 1,6 kg·m⁻³ (Sander & Win, 2004).

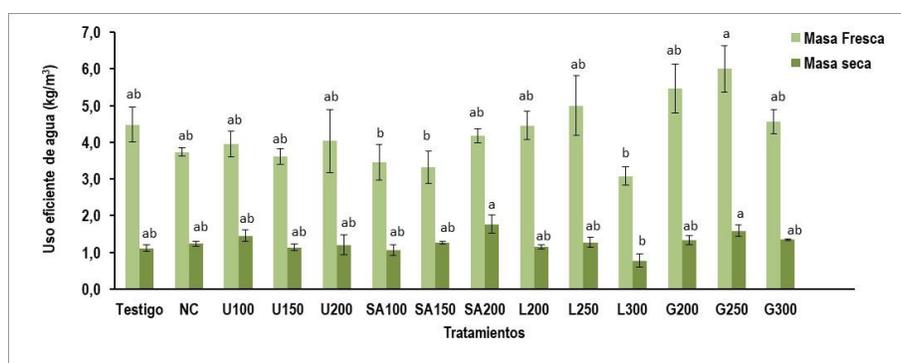


Figura 46. Uso eficiente de consumo de agua en kg·m⁻³ de MF y MS en función del tipo de FLL en albahaca. Comparación de medias realizada con la prueba de Tukey al 95% (F=4,33; p<0,001) para MF y (F=2,83; p=0,01) para MS. TA= testigo absoluto; NC = Nitrato de calcio; U= Urea de liberación lenta; SA= sulfato de amonio; L= lombricompost; G= Gallinaza.

3.4.6. Plan de Fertilización Nitrogenada (FN) para estevia.

El aprovechamiento del N por parte de la planta inicia con un buen manejo del riego. El uso de los coeficientes del cultivo determinados en el capítulo 1, cuyos valores están entre 0,85 y 1,24 fueron adecuados para calcular las láminas de riego, aunque en días muy calurosos, las plantas pueden sufrir estrés hídrico, por lo que se recomienda entonces, aplicar una lámina de riego que permita alcanzar la humedad de CC. Es conveniente manejar el riego con frecuencias cortas (riego localizado de alta frecuencia) para evitar la deshidratación excesiva del suelo, puesto que estos procesos de secado y humedecimiento en suelos con presencia de arcillas expansivas, pueden ocasionar la aparición de grietas y permitir flujos preferenciales, generando lixiviación de agua y nutrientes, incluido el N a capas profundas donde no son aprovechados por la planta.

La fertilización se debe realizar antes del trasplante y debe ser renovada con cada corte, es decir, aproximadamente cada 100 días. Las DN apropiadas para la estevia en suelos con contenido medio de N total, están en 50 y 150 kg·ha⁻¹. De acuerdo con Tavarini *et al.* (2016) la dosis de 150 kg·ha⁻¹ es adecuada para optimizar la concentración de rebaudiósido A y la relación rebaudiósido A/esteviósido. Las fuentes recomendadas en su orden para fertilizar las plantas son: urea, abonos orgánicos (L y G), SA y U.

En el caso de la urea, se recomienda aplicarla disuelta tres días antes en el agua de riego, asegurando las condiciones para facilitar su infiltración en el suelo y así reducir las pérdidas por volatilización. Los abonos orgánicos deben ser aplicados con 10 a 20 días de anterioridad al trasplante, en DN entre 250 a 300 kg·ha⁻¹, para garantizar su mayor disponibilidad en el momento del trasplante; estos deben ser aplicados en la superficie y deben ser incorporados mezclando con los primeros centímetros (10 – 20 cm) del suelo. El SA se debe aplicar entre uno y dos días antes del trasplante, con la lámina de riego adecuada, garantizando su infiltración y evitando excesos de agua que permita la lixiviación de N. El uso de U permite disponer del N por un tiempo

prolongado, incluso con efecto residual para las siguientes etapas de corte; este fertilizante debe ser aplicado con mínimo 5 días de anterioridad al trasplante para asegurar su disolución, por lo que se recomienda, una vez sea aplicada, mantener el suelo a CC.

3.4.7. Plan de Fertilización Nitrogenada (FN) para albahaca.

Al igual que con el cultivo de estevia, el manejo del agua es importante para evitar pérdidas de N, ya sea por volatilización o por lixiviación. Los coeficientes de cultivo empleados entre 0,42 y 0,59 resultaron convenientes, y en la realización de los anteriores experimentos, las plantas de albahaca son más resistentes al estrés hídrico que las plantas de estevia.

La fertilización se debe realizar antes del trasplante y debe ser renovada con cada corte, es decir, aproximadamente cada 80 días. La DN apropiada para la albahaca en suelos con contenido medio de NTS, es de $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Dependiendo del destino final de la albahaca, se deben aplicar diferentes tipos de fertilizantes; para su comercialización en fresco se recomienda el uso de abonos orgánicos, los cuales deben ser aplicados entre dos y tres semanas de anterioridad al trasplante, incorporando los abonos en los primeros centímetros del suelo (10 – 20 cm); para su comercialización en forma deshidratada o extracción de aceites, la fertilización con abonos como el SA, urea o la U resultan mejor. El SA y la urea deben ser aplicados con días de antelación al trasplante (3 - 5 días), ya sea disuelta en el agua de riego, o en forma sólida incorporándola al suelo para evitar pérdidas por volatilización. La U debe ser aplicada con 5 días de antelación al trasplante, incorporándola al suelo y garantizando buen contenido de humedad (alrededor de la humedad de CC) para permitir su disolución.

3.5. CONCLUSIONES

La recomendación de DN para estevia para las condiciones climatológicas y con las características físico-químicas del suelo procedente de Juanchito Candelaria, estuvieron entre 50 y $150 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, puesto que estas DN presentaron el mejor comportamiento de variables agronómicas, la mayor concentración de N en las hojas y las mayores eficiencias calculadas.

La DN recomendada para el cultivo de albahaca en las mismas condiciones biofísicas anteriores es de $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Esta DN brindó la menor pérdida de nitrato por lixiviación, obtuvo las mayores respuestas agronómicas de la planta y no alteró significativamente las propiedades del suelo, dejando incluso niveles medios de N en el mismo. Además, presentó la mejor eficiencia aparente de recuperación y eficiencia interna de utilización.

Los abonos orgánicos evaluados presentaron la mayor mineralización del N en las cuatro primeras semanas, y al cabo de las 16 semanas ya se había mineralizado más del 50% del N potencialmente mineralizable. El modelo de Stanford y Smith (1972) fue el que mejor describió la mineralización del N de los suelos enmendados con lombricompost y gallinaza, mostrando tasas entre 0,12 y 0,23 mg de N mineralizado por semana.

La respuesta agronómica de estevia no fue afectada por las fuentes nitrogenadas, ya sea de liberación rápida o lenta. La respuesta de cada fuente nitrogenada utilizada está en función de su forma y época de aplicación, las cual debe ser entre 2 a 5 días de antelación al trasplante para los fertilizantes de síntesis y entre dos y tres semanas para los abonos orgánicos, que fueron los que presentaron menor lixiviación de nitratos y dejaron mejores condiciones en el suelo al cabo del tiempo experimental.

La respuesta agronómica de albahaca a las fuentes nitrogenadas no fue uniforme para todas las variables evaluadas. Los abonos orgánicos obtuvieron mayor contenido de MF mientras que la urea de liberación lenta y el sulfato de amonio brindaron mejores resultados en la obtención de MS. Estos resultados son importantes considerarlos ya que, dependiendo del destino final de la albahaca o su forma de comercialización, el uso de una determinada fuente puede favorecer la producción de MF o MS.

4. USO DE ENMIENDAS ORGANO – MINERALES PARA EL MANEJO AGRONÓMICO Y AMBIENTAL DE LA FN DE ESTEVIA (*Stevia rebaudiana* B.) Y ALBAHACA (*Ocimum basilicum* L.)

En este capítulo se muestra la experiencia lograda con el uso de enmiendas órgano-minerales, compuestas por bentonita cálcica, silicato perteneciente a la familia de las esmectitas y abonos orgánicos como el lombricompost y la gallinaza. Esta investigación se realizó en dos fases. En la primera fase se investigó sobre las proporciones entre bentonita y abono orgánico y su efecto en NL y en las condiciones finales del suelo, sin considerar la presencia de la planta. En la segunda fase, se evaluaron diferentes proporciones de la enmienda órgano mineral y el fertilizante nitrogenado (convencional y FLL) para ambos cultivos. Se hace una descripción de los materiales y métodos, resultados en NL, propiedades agronómicas y del suelo, así como en la eficiencia de fertilización y uso de agua.

4.1. INTRODUCCIÓN

Las enmiendas órgano - minerales hacen referencia a mezclas entre un componente mineral como los filosilicatos (caolinitas, montmorillonitas) y tectosilicatos (zeolita) y un componente orgánico (abonos orgánicos). Estas enmiendas órgano minerales se basan en el principio de conservación de la MOS, realizada por la mineralogía del suelo, dando inicio a la formación de los complejos órgano minerales (Zheng *et al.*, 2013).

Dentro de los minerales más empleados para la elaboración de este tipo de enmiendas figuran las zeolitas, las bentonitas y en menor cantidad, las caolinitas. Las zeolitas han sido usadas como adsorbente de urea y han sido catalogadas como FLL, gracias a la disolución gradual del N a la solución del suelo (Xiaoyu *et al.*, 2013; Soca y Daza, 2015; Yao *et al.*, 2015; Obregón *et al.*, 2016). Las zeolitas reducen la movilidad del amonio y nitrato y aumentan la retención de iones en el suelo (Moradzadeh *et al.*, 2014); también han sido utilizadas como enmienda para reducir el estrés hídrico en plantas y mejorar el desarrollo y la producción de cultivos (Hazrati *et al.*, 2017).

Las bentonitas han sido usadas como recubrimientos de rellenos sanitarios gracias a su baja conductividad hidráulica y a su alta CIC (Coelho y Do lago 2015), como adsorbente en formulaciones de herbicidas para la liberación lenta del ingrediente activo en suelos (Flores *et al.*, 2013), como enmiendas de suelos para la retención de micronutrientes como Zn y Mn (Iskander *et al.*, 2011), como enmienda para la inmovilización y remediación de suelos contaminados por cadmio y plomo (Sun *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2017), como enmienda para la remediación en suelos contaminados con petróleo y diésel (Wyszkowski y Ziolkowska, 2009) y como enmienda en el proceso de compostaje de estiércoles de cerdo (Li *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2016) y de residuos verdes (Zhang y Sun, 2017).

En cuanto a materiales orgánicos los más usados en estas enmiendas órgano minerales, están los composts (Pronk *et al.*, 2012), el biochar (Nielsen *et al.*, 2014; Yao *et al.*, 2015) y los biosólidos (Camps Arbestain *et al.*, 2009). En el manejo del N, el más utilizado ha sido el biochar, el cual es un compuesto orgánico pirolizado aromático resistente al ataque microbiológico, pero termodinámicamente inestable en condiciones oxidativas (Calvelo *et al.*, 2011); este material orgánico ha dado buenos resultados en la retención de N y reducción del NL, en especial cuando los suelos fueron fertilizados con fuentes nítricas, gracias a su alta capacidad de retención de humedad, la capacidad de retención de amonio e incremento en la inmovilización del N (Zheng *et al.*, 2013).

Dentro de los principales usos de las enmiendas órgano minerales se han reportado: la retención de metales pesados (Leggo *et al.*, 2006; Hizal y Apak, 2006), retención de elementos radioactivos (Campos *et al.*, 2013) y de sustancias orgánicas contaminantes (benceno, tolueno) (Koh y Dixon, 2001). También se han usado como sumidero de carbono, puesto que cuando los abonos orgánicos son mezclados con minerales de arcilla, son

protegidos de la rápida descomposición, al ser las moléculas orgánicas adsorbidas en su superficie (Pronk *et al.*, 2012) simulando la manera como los suelos naturalmente han conservado los niveles de carbono en ellos a través del tiempo geológico (Schmidt *et al.*, 2011). En la agricultura, se han utilizado para el aumento de cosechas (Gholamhoseini *et al.*, 2013; Nielsen *et al.*, 2014), aumento en la calidad nutricional de frutos (Yao *et al.*, 2015), aumento de la actividad microbiana del suelo y disponibilidad de N sin afectar la eficiencia de uso (Xiauyu *et al.*, 2013; Nielsen *et al.*, 2014), reducir la lixiviación y volatilización del N (Xiauyu *et al.*, 2013). También mejora las propiedades del suelo como la CIC (Gholamhoseini *et al.*, 2013). En suelos contaminados con derivados del petróleo, el uso de bentonita - abono orgánico contribuyó a reducir sus efectos negativos en plantas de colza y avena y favoreció la concentración de NF (Wyszkowski y Ziolkowska, 2009).

La Patente Europea N° 1208922 B1 (Leggo, 2004) muestra detalles de la preparación de biofertilizantes órgano-minerales a partir de zeolita y abono elaborado con estiércol de corral. Estos complejos fueron evaluados por Leggo *et al.* (2006) como sustrato potencial de bacterias nitrificantes, obteniendo resultados positivos en procesos de fitoremediación de suelos contaminados con metales pesados.

Se han realizado estudios a nivel de laboratorio relacionados con los mecanismos que tienen las enmiendas órgano minerales en la retención del N. Klucaková (2010) estudió la interacción entre los ácidos húmicos y nitratos a través de colorimetría de flujo continuo y encontró por medio de isoterma de Langmuir y Freundlich que los nitratos pueden ser adsorbidos en sustancias húmicas sólidas hasta en un 80%. Zhang *et al.* (2013) encontraron que los complejos órgano-minerales incrementaron significativamente la retención de NH_4^+ y K^+ cuando se usaban minerales de arcilla de baja CIC como la caolinita, lo que tiene gran influencia en la disponibilidad de N para las plantas. Son pocos los estudios de uso de bentonita como enmienda para mejorar la FN; la mayoría están relacionados con su incorporación al proceso de compostaje, pero ninguno con la aplicación directa al suelo y su efecto en la eficiencia de la FN. Así mismo, son pocas las investigaciones relacionadas con la evaluación de estas enmiendas en el uso eficiente del agua. Trabajos realizados con sólo zeolita, han demostrado que su uso es efectivo en sistemas de riego por goteo, porque mantiene la humedad del suelo, retiene el agua por más tiempo y la suministra a la planta gradualmente, detiene el lavado de los fertilizantes y acumula y regula nutrientes, aumentando su eficiencia de uso (Colombani *et al.*, 2014; Eprikashvili *et al.*, 2016; Moradi *et al.*, 2017).

4.2. OBJETIVO

Elaborar una enmienda edáfica órgano-mineral a partir de abonos orgánicos y minerales de arcilla, con el fin de aumentar la retención de N amoniacal y disminuir la lixiviación de nitratos.

4.3. MATERIALES Y MÉTODOS

4.3.1. Localización

Los experimentos se realizaron en la misma localidad descrita en el capítulo 3. Los valores de temperatura y precipitación promedio mensual durante el periodo experimental fueron de 23,7 °C y 154,0 mm respectivamente.

4.3.2. Descripción del suelo y de abonos orgánicos

El suelo utilizado provino del mismo sitio especificado en el capítulo 3. Las principales características físico-químicas se encuentran en la Tabla 27.

4.3.3. Descripción de la enmienda órgano mineral

La enmienda órgano mineral se elaboró a partir de la mezcla de abono orgánico y mineral de arcilla, que en este caso fue la bentonita. La caracterización de los abonos orgánicos (lombricompost y gallinaza) se muestran en el capítulo 3 (Tabla 11).

Tabla 27. Caracterización inicial del suelo usado en la experimentación, proveniente de Juanchito, Candelaria (Valle del Cauca).

Propiedad	Unidades	Valor	Propiedad	Unidades	Valor
Textura	-	arcillosa	Potasio	cmol(+) kg-1	0,17
pH	-	6,85	Sodio	cmol(+) kg-1	0,004
CE	dS m-1	0,10	Fósforo Intercambiable	mg kg-1	17,76
MOS	%	2,69	Densidad Aparente	Mg m-3	1,38
NTS	%	0,18	Densidad Real	Mg m-3	2,72
CICE*	cmol(+) kg-1	10,39	Porosidad Total	%	49,26
Calcio	cmol(+) kg-1	0,93	Microporosidad	%	34,70
Magnesio	cmol(+) kg-1	9,29	Macroporosidad	%	14,56

*CICE = Capacidad de Intercambio Catiónico efectiva

La bentonita utilizada correspondió a un mineral de arcilla compuesta esencialmente por montmorillonita cálcica, cuya composición se muestra en la Tabla 28. Este tipo de bentonita se caracteriza porque su superficie específica es elevada ($150-800 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$), además son capaces de intercambiar fácilmente los iones fijados en la superficie exterior de los cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en la solución del suelo. La CIC es de aproximadamente $31 \text{ cmol (+)}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Tabla 28. Principales características de la bentonita utilizada en la elaboración de enmiendas órgano minerales.

Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
Silicio como SiO_2 (%)	52,0	Hierro como Fe_2O_3 (%)	9,5
Aluminio como Al_2O_3 (%)	25,0	Humedad a 105°C (%)	10,0
Calcio como CaO (%)	1,4	Hinchamiento (mL)	5,0
Sodio como Na_2O (%)	0,9	pH (al 2% p/v)	7,0
Magnesio como MgO (%)	0,8	Granulometría (% pasa malla 100)	50,0
Potasio como K_2O (%)	1,2	CIC (cmol(+) $\cdot\text{kg}^{-1}$)	31,0

4.3.4. Medición de la evapotranspiración

Se instaló un tanque evaporímetro clase A de 1.20 m de diámetro y 0.25 m de altura, el cual se ubicó a 0.14 m de la superficie del suelo siguiendo las especificaciones de Allen *et al.* (2006). La calibración del tanque evaporímetro se realizó registrando el valor diario de evaporación, y comparándolo con las estaciones de CENICAÑA más cercanas (Jamundí, Melendez). Con el registro de los datos de ambos tanques, se realizó una regresión lineal con la cual se obtuvo una confiabilidad en la correlación de los datos registrados; con ello se garantizó que la lectura de evaporación registrada en el tanque evaporímetro del prototipo, se ajustara a la lectura real de evaporación registrada en las estaciones. El coeficiente de tanque utilizado fue de 0,75. El coeficiente de regresión alcanzado fue de 0,993 ($p < 0,01$).

4.3.5. Fase 1. Proporciones para la elaboración de la enmienda órgano mineral

Se construyeron LD que consistieron en tubos de PVC de 35 cm de longitud y 15,2 cm de diámetro unidos a embudos plásticos para la recolección de los lixiviados. En la parte superior e inferior de la columna se acopló una placa plástica, a las que se les realizaron múltiples perforaciones para garantizar la uniformidad en la aplicación del agua y la recolección completa del lixiviado. Entre el suelo y la placa perforada inferior se incluyó una capa de 2 cm de grava gruesa y malla de 1 mm, para evitar la salida del suelo. Al embudo inferior se le acopló una manguera de polietileno para riego de 2,5 cm de diámetro conectada a botellas plásticas de 200 cm^3 , que a su vez, se dispusieron dentro de recipientes plásticos con el fin de evitar el contacto con la luz, reducir las pérdidas por volatilización y recolectar el lixiviado en caso de derrame. También se construyeron

bases con ángulos de acero recubiertas con anticorrosivo para soportar las columnas de PVC, las cuales fueron dispuestas a 80 cm del suelo (Figura 47).



Figura 47. LD utilizados en la fase 1 del experimento para el estudio de proporciones de enmiendas. Cortesía: Ing Cindy Elejalde.

Se instaló un diseño completamente al azar con 10 tratamientos y tres repeticiones para un total de 30 unidades experimentales. Cada unidad experimental consistió en un lisímetro de PVC descrita anteriormente. Los tratamientos y las proporciones utilizadas se muestran en la Tabla 29. Las columnas de suelo contenían 4 kg de suelo tamizado por 2 mm.

Se emplearon dosis de lombricompost y gallinaza de 10 y 8 Mg·ha⁻¹ respectivamente, que son comúnmente empleadas para suministrar alrededor de 120 kg·ha⁻¹ de N total. Se determinaron tres proporciones para la elaboración de las enmiendas órgano-minerales, tomando como referencia las investigaciones reportadas por Gholamhoseini *et al.* (2013), quienes emplearon dosis de abonos orgánicos entre 3,0 y 4,0 Mg·ha⁻¹ cuando se mezcló con zeolita. Las dosis de bentonita utilizadas equivalen a 3,0, 3,5 y 4,0 Mg·ha⁻¹ siguiendo dosis recomendadas por Malekian *et al.* (2011) y Coelho y Do Lago (2015). La Tabla 31 muestra los tratamientos utilizados.

Tabla 29. Descripción de los tratamientos evaluados en la fase 1: determinación de proporciones para la elaboración de una enmienda órgano mineral.

Tratamiento	Descripción	Peso por unidad experimental (g)			g enmienda órgano mineral /kg de suelo
		L	G	B	
T	Testigo sin enmienda	0	0	0	-
L	Lombricompost sin bentonita	17,2	0	0	-
G	Gallinaza sin bentonita	0	12,2	0	-
M	bentonita sin abono	0	0	14,1	-
LM1	Mezcla 1: lombricompost y bentonita	6,2	0	5,1	3,0
LM2	Mezcla 2: lombricompost y bentonita	7,4	0	6,1	3,5
LM3	Mezcla 3: lombricompost y bentonita	8,6	0	7,1	4,0
GM1	Mezcla 1: gallinaza y bentonita		4,2	5,1	2,5
GM2	Mezcla 2: gallinaza y bentonita		5,3	6,1	3,0
GM3	Mezcla 3: gallinaza y bentonita		6,9	7,1	3,5

L= lombricompost; G= gallinaza; B= bentonita

Una vez mezclado el suelo con la enmienda órgano mineral, se saturó y se dejó drenar por 48 horas hasta alcanzar la humedad de CC (35% v/v), medida con TDR. A partir de entonces, se aplicaron volúmenes de agua calculados a partir del registro de la evaporación del tanque evaporímetro y se utilizó un Kc de 1,2 y un coeficiente de tanque de 0,75. Los volúmenes de riego estuvieron entre 11,2 y 267,0 mL. Todos los tratamientos recibieron una aplicación de 150 kg·ha⁻¹ de urea con 46% de N, disuelta en el agua de riego al inicio del experimento.

Se evaluó el amonio y nitrato total de los lixiviados recogidos por un periodo de cuatro meses. Al cabo de los cuatro meses se midieron las siguientes variables al suelo: pH, CE, MOS siguiendo las metodologías descritas en el capítulo 3; también se determinaron las bases intercambiables por extracción con acetato de amonio a

pH 7,0 y lectura en espectrofotómetro de absorción atómica y finalmente CICE calculada como la suma de bases.

4.3.6. Fase 2. Evaluación de enmiendas órgano minerales para aumentar la eficiencia de la FN en cultivos de aromáticas

A continuación, se describe los materiales y métodos empleados en la fase 2. En primer lugar, se realiza la descripción de los LD empleados. Seguidamente se muestra el diseño experimental empleado y los tratamientos evaluados. Luego, se muestra la preparación de la enmienda órgano mineral y las variables de respuesta a evaluar. Por último, se describe las labores culturales realizadas.

4.3.6.1. Construcción de Lisímetros de Drenaje (LD)

Los LD consistieron en recipientes plásticos de 0,28 m de altura por 0,24 m de diámetro, recubiertos con malla y grava donde se dispuso el suelo previamente tamizado por 2 mm. El recipiente se perforó en la parte inferior lateral y se instaló una manguera conectada a un segundo recipiente debidamente tapado, dentro del cual se ubicó un vaso graduado para la recolección del lixiviado. Se estableció una diferencia de altura entre el lisímetro y el recipiente recolector para favorecer el flujo. Cada lisímetro fue inclinado con un ángulo de 10° con el fin de garantizar el flujo del total del lixiviado. Puesto que se utilizaron los Kc para cada etapa fenológica, la lixiviación de las unidades experimentales fue mínima. Sin embargo, las muestras que lixiviaron, fueron guardadas en condiciones refrigeradas hasta cuando se contó con suficiente cantidad de lixiviado (30 mL) para ser analizado en el laboratorio.

4.3.6.2. Diseño experimental:

Se planteó un diseño completo al azar por cultivo y se establecieron 7 tratamientos con tres repeticiones, para un total de 21 unidades experimentales (UE) por cultivo. Cada UE consistió en un lisímetro de 5 y 4 kilogramos de capacidad para estevia y albahaca respectivamente (Figura 48). Los tratamientos evaluados fueron: T= testigo; U= urea (100% de la DN de 150 kg·ha⁻¹); UR= Urea recubierta de liberación lenta (100% de la DN de 150 kg·ha⁻¹); U75= urea (75% de la DN + 25% de enmienda órgano mineral); U50= urea (50% de la DN + 50% de enmienda órgano mineral); UR75= urea recubierta de liberación lenta (75% de la DN + 25% de enmienda órgano mineral); UR50= urea recubierta de liberación lenta (50% de la DN + 50% de enmienda órgano mineral). La urea contiene 46% de N mientras la urea de liberación lenta tiene 40% de N. Las UE fueron dispuestas a una distancia de 40 cm entre LD. La estevia fue cosechada a los 96 después del trasplante (ddt) mientras que la albahaca fue cosechada a los 81 días ddt cuando todos los tratamientos iniciaron floración.



Figura 48. Diseño experimental para la evaluación de enmiendas órgano minerales. A. Estevia. B. Albahaca. Cortesía: Ings. Víctor Manuel Torres y Miguel Ángel Díaz.

4.3.6.3. Preparación de la enmienda órgano mineral

En cada lisímetro se dispuso suelo y la enmienda previamente mezclada, tamizados por malla de 2 mm. La Tabla 30 muestra las proporciones de suelo, abono orgánico y bentonita usado en cada tratamiento para cada

cultivo. Las dosis de enmienda se determinaron para suplir el porcentaje faltante de la DN.

Tabla 30. Proporciones de suelo y enmienda órgano mineral utilizadas en los tratamientos para estevia y albahaca

Tratamiento	suelo		Lombricompost	Bentonita	Enmienda (Mg·ha ⁻¹)	
	kg					g·kg ⁻¹
	Estevia	Albahaca				
T	5	4	0	0	0	
U	5	4	0	0	0	
UR	5	4	0	0	0	
U75	5	4	0.60	0.40	1,34	
U50	5	4	1.10	0,90	2,68	
UR75	5	4	0.60	0.40	1,34	
UR50	5	4	1.10	0,90	2,68	

4.3.6.4. Variables de respuesta

Como variables agronómicas se determinaron AP, porcentaje de MS y rendimiento de hoja fresca y hoja seca. También se determinó la concentración de NF. Al tiempo de la cosecha, se tomaron muestras de suelo, realizando cuarteo por triplicado de cada unidad experimental y se determinaron pH, CE, MOS y NTS con las metodologías descritas en el capítulo 3. La CIC fue hallada mediante extracción con acetato de amonio a pH 7,0 y titulación.

Se calcularon diferentes índices de eficiencia siguiendo los lineamientos de Dobermann (2007). En la estevia se calculó la eficiencia aparente de recuperación y la eficiencia interna de utilización. Para la albahaca se calculó la eficiencia agronómica del cultivo. Finalmente, se determinó el uso eficiente del agua por parte de cada cultivo para cada tratamiento, el cual fue calculado como la relación entre la cosecha obtenida en kg de MF y MS por planta y el agua de riego aplicada por planta en m³.

4.3.6.5. Prácticas culturales:

La estevia variedad “morita I” fue sembrada por esquejes, los cuales fueron traídos del municipio de Ricaurte (Cundinamarca). La siembra se realizó en un sustrato compuesto por abono orgánico y turba donde se dispuso cada esqueje. Luego de 35 días de germinación, cada planta fue trasplantada a una UE con suelo. Por su lado, la albahaca variedad “genovesa” fue sembrada en un sustrato de turba y fue trasplantada a cada UE, cuando alcanzó 12 cm de AP (40 días).

Para el riego se utilizó una lámina de riego basada en la evaporación medida en el tanque evaporímetro, tomando como referencia los Kc hallados y mostrados en el capítulo 2. La aplicación de la lámina de riego para cada UE se realizó diariamente utilizando una probeta graduada. Los volúmenes de riego estuvieron entre 22,4 y 235,2 mL·planta⁻¹·día⁻¹ para estevia y entre 16 y 96 mL·planta⁻¹·día⁻¹ para la albahaca.

Para el control de plagas y arvenses: se realizaron controles a base de sustancias naturales como infusiones de ajo y jabón a las plagas presentadas, especialmente de *Spodoptera sp.* En el caso de la estevia fue necesario realizar fumigaciones cada 15 días con fungicida y bactericida de origen biológico, cuyo ingrediente activo fue la kasugamicina para el control de *Alternaria steviae*. Las arvenses fueron controladas manualmente para evitar la competencia con la planta por agua y nutrientes.

Para las podas: en el caso de la estevia se realizaron podas de formación a los 26 ddt, realizando el corte en la parte apical de la planta para la estimulación de brotes laterales. Para la albahaca las podas se realizaron a los 26 ddt y luego periódicamente cada 15 días hasta el inicio de floración.

Fertilización: a todos los tratamientos de los dos cultivos se les aplicó 100 kg·ha⁻¹ de P₂O₅ (0,26 mL por unidad experimental), usando como fuente ácido fosfórico y 150 kg·ha⁻¹ de K₂O (0,33 g por UE) usando como fuente

sulfato de potasio. Estos fertilizantes fueron aplicados disueltos en el volumen de riego, dos días antes del trasplante.

4.3.7. Análisis estadístico

Se verificó la distribución normal de los datos obtenidos mediante el test de Shapiro- Wilk y la homogeneidad de varianzas por el test de Levene. Posteriormente se realizaron análisis de varianza unifactorial para determinar la existencia de diferencias significativas. Se utilizaron el test de Tukey y el test de Dunnett para la comparación de medias con un nivel de confianza del 95%. Se utilizó el paquete estadístico SPSS versión 2.0.

4.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.4.1. Fase 1: Proporciones para la elaboración de la enmienda órgano mineral

Las lixiviaciones de amonio y nitrato totales conseguidas después de cuatro meses de experimentación se muestran en la Figura 49. La presencia de amonio y nitrato en los lixiviados se debió a que la aplicación de urea incrementó la disponibilidad de estas formas químicas en el suelo, quedando susceptibles a ser lixiviasdas (Ferretti *et al.*, 2017).

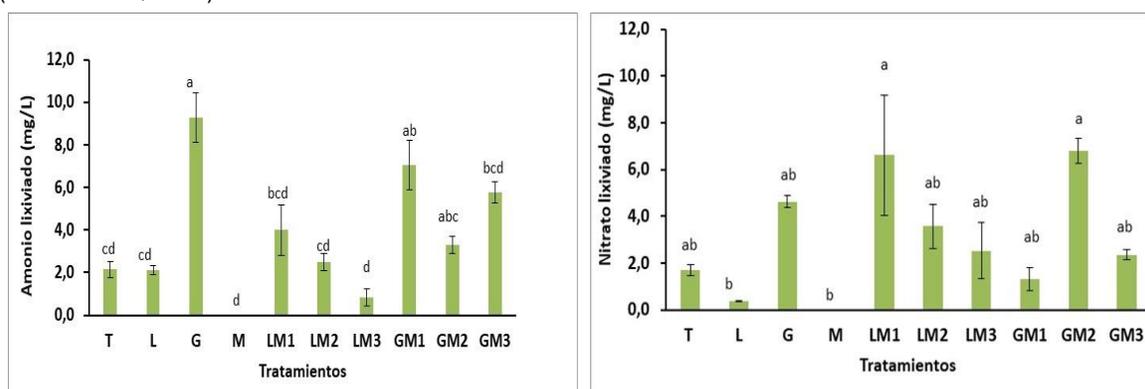


Figura 49. Efecto de la aplicación de la enmienda órgano mineral en la concentración de amonio (A) ($F=11,73$; $p < 0,01$) y nitrato (B) ($F=3,95$; $p < 0,01$) en el agua de lixiviación.

T= testigo; L= lombricompost; G= gallinaza; M= Bentonita; LM1= 3,0 g de enmienda organomineral por kg^{-1} de suelo; LM2= 3,5 g de enmienda organomineral por kg^{-1} de suelo; LM3= 4,0 g de enmienda organomineral por kg^{-1} de suelo; GM1= 2,5 g de enmienda organomineral por kg^{-1} de suelo; GM2= 3,0 g de enmienda organomineral por kg^{-1} de suelo; GM3= 3,5 g de enmienda organomineral por kg^{-1} de suelo; Comparación por Test de Tukey (95%). Letras iguales indican que no hay diferencias entre tratamientos. Las barras indican el error estándar.

La concentración de amonio en los lixiviados estuvo por debajo de $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ para todos los tratamientos. Las mayores pérdidas de amonio fueron encontradas en los tratamientos con gallinaza, debidas posiblemente al alto contenido de MOS, y a su poder de aglutinación que favorece la formación de macroagregados favoreciendo el drenaje. La aplicación de gallinaza aumentó la lixiviación de amonio en 77% con respecto al lombricompost y al testigo, mientras que la bentonita logro retener el amonio, debido a su alta CIC y su capacidad de hinchamiento, que permitieron la retención de agua y el N en el suelo. Este comportamiento ha sido también reportado para otros minerales como las zeolitas potásicas, demostrando que a mayor DN empleada, mayor es la retención, alcanzando niveles de reducción en los lixiviados del 42,9% en nitrato y del 97% en amonio en suelos limo arenosos, en proporción de 8 g de zeolita por kg de suelo (Moradzadeh *et al.*, 2014). Los autores demostraron la alta capacidad de adsorción de amonio por parte de la zeolita a partir de isotermas de Freundlich.

Las enmiendas elaboradas a partir de las mezclas entre lombricompost y bentonita no produjeron mayor retención de amonio que el abono solo, puesto que no se encontraron diferencias estadísticas entre tratamientos, debido posiblemente a la alta dispersión de los datos. A mayor DN de aplicación con enmienda elaborada con lombricompost, menor fue la concentración de nitratos encontrados en los lixiviados, sin

diferencias estadísticas con el testigo y el lombricompost solo. A medida que las concentraciones de amonio y nitrato lixiviados fueron más pequeñas, la variabilidad de los datos también decreció. Esto se debe a que el nitrato lixiviado de los tratamientos con enmienda, pueden provenir no solamente del fertilizante adicionado o del producto de la mineralización de la MOS, sino también de la mineralización de pequeñas cantidades de amonio retenido en la bentonita, al realizarse intercambios iónicos con la solución del suelo (Colombani *et al.*, 2015). Sin embargo, pese a esta variabilidad, fue posible apreciar una tendencia en la reducción de amonio lixiviado, a medida que la cantidad de enmienda se aumenta. La mayor aplicación de enmienda, logró reducir en un 61%, la lixiviación de amonio con respecto al lombricompost solo.

Para las enmiendas elaboradas con gallinaza, tampoco se encontró una reducción significativa en las proporciones, con excepción del tratamiento GM3, que redujo la concentración de amonio en un 58% con respecto a la aplicación del abono solo. Vale la pena resaltar que, con excepción de los tratamientos G y GM1, los demás tratamientos no mostraron diferencias significativas en la capacidad de retención de amonio con el testigo. La presencia de amonio en los lixiviados de los tratamientos con abonos orgánicos pudo obedecer a un incremento en las tasas de mineralización del N, incrementando la concentración de amonio y nitratos en la solución del suelo, los cuales no alcanzaron a ser retenidos ni por la fracción mineral del suelo, ni por la bentonita adicionada.

La concentración de nitratos en los lixiviados estuvo por debajo de $7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para todos los tratamientos, valores por debajo de los límites permisibles en agua de consumo establecidos por la OMS de $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Se encontraron gran dispersión de los datos (C.V. = 69,7%), debido a las características propias del suelo como son la presencia de arcillas expansivas y la alta plasticidad que, frente a los fenómenos de expansión y reducción de volumen, lograron favorecer la aparición de grietas, creando flujos preferenciales por donde ocurrió lixiviación. Las mayores concentraciones de nitratos se presentaron en los tratamientos con enmiendas, independiente del tipo de abono orgánico utilizado en su elaboración, pero sin diferencias estadísticas con el testigo. Similares resultados fueron encontrados por Civeira y Rodríguez (2011), quienes reportaron aumentos con la aplicación de zeolita y fertilizante nitrogenado hasta del 50% en la concentración de amonio y nitrato en lixiviados, en comparación con la aplicación del fertilizante solo, debido a la reducción del volumen de lixiviación. El efecto de la aplicación de abonos orgánicos en la lixiviación de N ha sido estudiado por muchos autores, con resultados contradictorios. Por ejemplo, Gholamhosein *et al.* (2013) encontraron reducción en N lixiviado con el uso de abono de vaca, mientras que Bazzo y Ritchie (2005) reportaron aumento de N lixiviado con la aplicación de compost y estiércol.

En el caso de los tratamientos con gallinaza, las concentraciones de nitrato se debieron más a la generación de macroporosidad por parte de este abono orgánico que por la CIC alcanzada. Al comparar la aplicación de gallinaza sola, con las aplicaciones de bentonita, a pesar de que se aumenta la CIC, la lixiviación ocurre, debido a que el flujo del agua se ve favorecido por la generación de porosidad drenable. Además, la alta fertilidad del suelo, especialmente la presencia de cationes Mg^{+2} y Ca^{+2} , redujo la capacidad de la bentonita de adsorber el amonio, dado que de acuerdo a las series liotrópicas, a valores de pH cercanos a la neutralidad, la preferencia de adsorción por los alcalinotérreos es mayor que por el amonio (Jaramillo, 2014). El amonio en la solución del suelo es mineralizado a nitrato, el cual no es retenido por el suelo y se lixivia, como se presentó en el presente trabajo. Este comportamiento es diferente a lo registrado para zeolitas, donde la preferencia por el amonio es mayor en condiciones de neutralidad (Ferretti *et al.*, 2017).

A pesar de que la aplicación de enmiendas órgano minerales se realizó con el fin de aumentar la retención de amonio y reducir la velocidad de generación de nitratos en el suelo, la aplicación de abonos orgánicos tiene una influencia en la porosidad, especialmente en la drenable, que aumenta la conductividad hidráulica y por lo tanto la lixiviación, por lo que sugiere que la aplicación de agua y fertilizantes debe hacerse gradualmente. Según Aristizabal (2009), cuando se eleva la concentración electrolítica en la solución del suelo, la conductividad hidráulica se aumenta debido a la agregación de arcillas, evitando que se taponen los suelos. Es posible que la aplicación de abonos orgánicos tuviera un efecto en dicha concentración.

La Figura 50 muestra el volumen de lixiviados obtenidos para todos los tratamientos. La aplicación de gallinaza en los diferentes tratamientos favoreció la lixiviación, obteniendo diferencias estadísticas con el lombricompost. Los resultados hallados muestran el efecto que tiene la aplicación de gallinaza en la estructura del suelo e indican la necesidad del manejo adecuado del agua de riego cuando se utiliza este tipo de abonos. La aplicación de la bentonita contribuyó a reducir los volúmenes de lixiviados con respecto a la aplicación de la gallinaza sola, con diferencias estadísticas de alrededor de un 50%, aumentando así la eficiencia en el uso del agua. Coelho y Do Logo (2015) afirman que la bentonita al ser aplicada al suelo, puede reducir sustancialmente la conductividad hidráulica, hasta el punto de poder ser utilizada como recubrimiento de rellenos sanitarios. Debido a esta particularidad de este mineral de arcilla, es importante que su aplicación vaya acompañada de buenas prácticas agrícolas, ya que excesiva mecanización o un mal manejo del riego, puede compactar el suelo. Civeira y Rodríguez (2011) encontraron que la incorporación de zeolita redujo el volumen lixiviado hasta en 190 mL con respecto al tratamiento testigo. A su vez, Colombani *et al.* (2014) observaron un incremento del 11% en la capacidad de almacenamiento de agua cuando se usan enmiendas minerales como la zeolita.

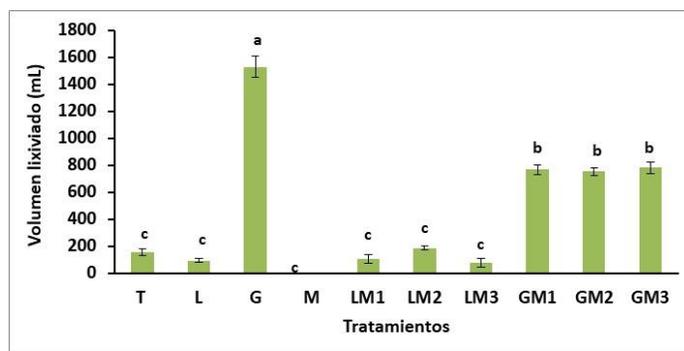


Figura 50. Efecto de la aplicación de enmiendas órgano minerales en el volumen de lixiviados. (F=140,2; p< 0,001). T= testigo; L= lombricompost; G= gallinaza; M= Bentonita; LM1= 3,0 g de enmienda organomineral por kg⁻¹ de suelo; LM2= 3,5 g de enmienda organomineral por kg⁻¹ de suelo; LM3= 4,0 g de enmienda organomineral por kg⁻¹ de suelo; GM1= 2,5 g de enmienda organomineral por kg⁻¹ de suelo; GM2= 3,0 g de enmienda organomineral por kg⁻¹ de suelo; GM3= 3,5 g de enmienda organomineral por kg⁻¹ de suelo; Comparación por Test de Tukey (95%). Letras iguales indican que no hay diferencias entre tratamientos. Las barras indican el error estándar.

Los tratamientos T, L, M, LM1, LM2 y LM3 obtuvieron volúmenes de lixiviados similares, sin diferencias estadísticas entre ellos. Estos volúmenes estuvieron alrededor de 88% menores que los generados con la gallinaza sola. La gallinaza pudo afectar la proporción de poros por encima de 500 micras, aumentando el número de fisuras. Este tamaño de poros está más relacionado con el movimiento del agua y el crecimiento radical que con la capacidad de retención de humedad (Glab *et al.*, 2016). El comportamiento de las propiedades hidrodinámicas frente a la aplicación de abonos orgánicos aún no es claro. Por ejemplo, Novak *et al.* (2012) encontraron que la aplicación de biochar incrementó la conductividad hidráulica en suelos de textura fina, mientras que Glab *et al.* (2016) no encontraron cambios significativos con su aplicación. Al parecer, el comportamiento de estas variables puede estar en función de las propiedades del suelo, las DN empleadas y las características de los abonos orgánicos (Barnes *et al.*, 2014).

Las mayores pérdidas de amonio y nitrato por unidad de área ocurrieron para los tratamientos que tuvieron aplicaciones de gallinaza, ya sea sola o como parte de la enmienda órgano mineral (Figura 51). La bentonita contribuyó a reducir las pérdidas de N hasta en un 81% cuando se adicionó con la gallinaza, encontrándose diferencias estadísticas con la aplicación de gallinaza sola. Tanto los cambios estructurales ocasionados, como el aumento en la concentración de N en el suelo, hicieron que las pérdidas de N fueran mayores en los tratamientos con gallinaza, puesto que se superó la capacidad de retención del suelo y de la enmienda, y se favoreció el flujo de agua y la lixiviación.

La aplicación de bentonita sola no generó lixiviación, mostrando su capacidad de retención, al ser comparada con el testigo y con los tratamientos que incluyeron lombricompost, pero sin encontrarse diferencias estadísticas entre ellos. La bentonita, contrario al efecto ocasionado por la gallinaza, densificó el suelo, reduciendo la

porosidad y por tanto la lixiviación, debido a su capacidad de hinchamiento y además, no suministra N extra al suelo, por lo que las pérdidas fueron menores. Otro factor que pudo tener incidencia en este comportamiento fue la alta concentración de Mg^{2+} en el suelo, que fue aumentada por la aplicación de la bentonita, lo que pudo afectar sus propiedades físicas. Aristizabal (2009) encontró que a altas saturaciones de Mg^{2+} , la conductividad hidráulica del suelo se reduce sustancialmente y se debe principalmente a la mayor energía y radio de hidratación del Mg^{2+} , produciendo más hinchamiento de los minerales de arcillas, lo que ocasiona dispersión de partículas y taponamiento de poros.

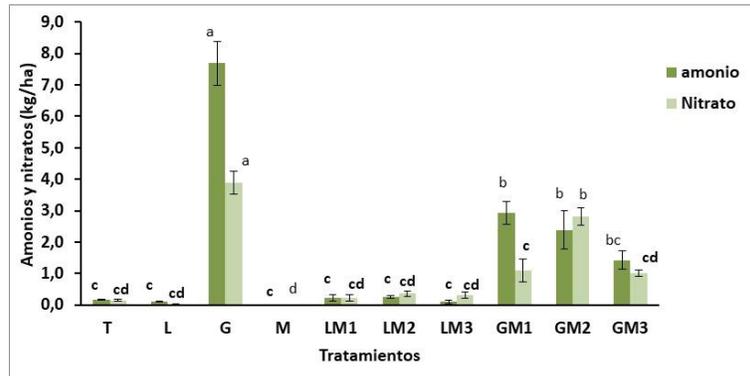


Figura 51. Efecto de la aplicación de enmiendas órgano minerales en la pérdida de amonio ($F= 53,68$; $p<0,001$) y nitrato ($F= 38,21$; $p< 0,001$) por hectárea.

T= testigo; L= lombricompost; G= gallinaza; M= Bentonita; LM1= 3,0 g de enmienda organomineral por kg^{-1} de suelo; LM2= 3,5 g de enmienda organomineral por kg^{-1} de suelo; LM3= 4,0 g de enmienda organomineral por kg^{-1} de suelo; GM1= 2,5 g de enmienda organomineral por kg^{-1} de suelo; GM2= 3,0 g de enmienda organomineral por kg^{-1} de suelo; GM3= 3,5 g de enmienda organomineral por kg^{-1} de suelo; Comparación por Test de Tukey (95%). Letras iguales indican que no hay diferencias entre tratamientos. Las barras indican el error estándar.

El lombricompost, a pesar de ser uno de los abonos orgánicos con menor relación C/N y con alto contenido de ácidos húmicos y fúlvicos, no alteró en gran medida la estructura ni la porosidad del suelo, ni aportó N significativamente, por lo que la cantidad de N perdido fue menor. La enmienda órgano mineral hecha con lombricompost, tuvo un comportamiento similar a la aplicación de lombricompost solo, debido a que no se alteró la estructura del suelo ni modificó las relaciones de porosidad. Resultados similares han sido reportados para otros materiales orgánicos como la investigación de Rahman *et al.* (2017) quienes estudiaron el efecto de la aplicación de biochar en la estructuración del suelo y encontraron que contrario a lo esperado, no aumentó la actividad microbiana, ni tuvo incidencia significativa en la formación de los agregados del suelo.

Algunas propiedades químicas del suelo después de 4 meses con la aplicación de los diferentes tratamientos se muestran en la Tabla 31. Se encontraron diferencias estadísticas entre tratamientos para los valores de pH, donde aquellos con gallinaza fueron los que presentaron valores más altos con respecto al testigo y a los tratamientos con lombricompost. Todos los tratamientos, con excepción del lombricompost solo, incrementaron el pH significativamente, debido probablemente al suministro de cationes como Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ , proporcionados por la descomposición de las enmiendas orgánicas que, en solución, son disponibles para las plantas. Los tratamientos con gallinaza fueron los que presentaron mayor valor de pH debido probablemente a la ocurrencia del proceso de amonificación con la respectiva liberación de amoníaco. Sin embargo, dada la dinámica del N en el suelo, es posible que estos valores de pH disminuyan con el tiempo al predominar la nitrificación.

Contrario a lo encontrado por Civeira y Rodriguez (2011) para las zeolitas, la aplicación de bentonita-abono orgánico aumentó el pH de la solución del suelo, lo que disminuyó la concentración de amonios, por lo tanto, su presencia en el volumen de lixiviados también fue menor. Coelho y Do lego (2015) encontraron un comportamiento lineal entre el pH del suelo y la aplicación de bentonita, donde a mayor DN aplicada, mayor es el pH encontrado en el suelo. Este aumento de pH es debido a que la bentonita es un mineral de arcilla 2:1 del tipo montmorillonita cálcica que, al irse meteorizando, la destrucción de sus estructuras internas facilita la salida de elementos alcalinotérreos como el Ca^{2+} .

La aplicación de enmienda órgano mineral incrementó la CE significativamente. El mayor valor alcanzado fue con la aplicación de la bentonita sin abono orgánico, incrementando su valor en 86%, con respecto al testigo. Los abonos orgánicos sin la bentonita también incrementaron los valores de CE con respecto al testigo, aunque en menor proporción (77%) sin diferencias estadísticas entre ellos. Estos incrementos ocurrieron por el aporte de cationes y aniones formadores de sales como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y en menor proporción Na^+ , así como SO_4 , CO_3^{2-} y HCO_3^- .

Tabla 31. Efecto de la aplicación de enmiendas órgano minerales en propiedades químicas del suelo al cabo de 4 meses.

Trat.	pH ¹	CE ² (dS/m)	MO ¹	CICE ²	Ca ³	Mg ²	K ²	Na ³
			(%)	(cmol(+) kg ⁻¹)				
T	6,08±0,12c	0,79±0,04d	3,11±0,1 d	22,35±2,08 c	12,25±1,44 bc	9,58±0,64 c	0,05±0,03 c	0,47±0,01 b
L	6,59±0,03c	3,34±0,12 b	7,64±0,95 ab	36,44±4,07 a	20,75±1,07 a	14,87±5,15 bc	0,16±0,01 b	0,68±0,03 a
G	8,43±0,05 a	3,45±0,08 b	8,37±0,71 a	23,36±1,89 c	7,25±0,33 c	15,69±1,60 b	0,27±0,02 a	0,15±0,02 de
M	7,71±0,02b	5,58±0,12 a	3,71±0,03 d	35,89±3,16 a	12,13±2,38 bc	23,47±0,67 a	0,02±0,00 c	0,27±0,01 c
LM1	7,16±0,02b	1,84±0,24 cd	6,10±0,36 bc	32,79±1,70 abc	15,13±0,66 b	17,50±1,05 b	0,04±0,00 c	0,12±0,00 de
LM2	6,99±0,04b	2,70±0,41 b	5,77±0,27 bc	33,00±0,93 abc	14,75±0,45 b	18,05±0,50 ab	0,04±0,00 c	0,16±0,02 d
LM3	7,13±0,06b	3,09±0,59 bc	6,30±0,52 bc	34,47±0,95 ab	14,63±0,43 b	19,72±0,50 ab	0,03±0,01 c	0,09±0,02 de
GM1	7,80±0,02b	2,55±0,16 bc	5,68±0,03 c	23,80±2,54 bc	8,50±1,25 c	15,00±1,27 bc	0,24±0,02 a	0,06±0,00 e
GM2	7,87±0,06ab	3,01±0,18 bc	6,35±0,67 bc	23,14±1,27 c	7,33±0,67 c	15,42±0,64 bc	0,27±0,01 a	0,12±0,02 de
GM3	8,01±0,04 a	2,73±0,09 bc	7,09±1,00 abc	23,25±1,06 c	6,88±0,5 c	15,97±0,70 b	0,31±0,01 a	0,10±0,02 de
F	9,98	22,00	15,04	7,68	16,93	3,81	52,78	135,64
p	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00

¹Prueba de Tukey (95%); ²Prueba de Dunnett (95%); ³Prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (p=0,004 para Ca y p= 0,02 para Na). T= testigo; L= lombricompost; G= gallinaza; M= Bentonita; LM1= 3,0 g de enmienda organomineral por kg⁻¹ de suelo; LM2= 3,5 g de enmienda organomineral por kg⁻¹ de suelo; LM3= 4,0 g de enmienda organomineral por kg⁻¹ de suelo; GM1= 2,5 g de enmienda organomineral por kg⁻¹ de suelo; GM2= 3,0 g de enmienda organomineral por kg⁻¹ de suelo; GM3= 3,5 g de enmienda organomineral por kg⁻¹ de suelo; Letras iguales indican que no hay diferencias entre tratamientos.

Las enmiendas órgano minerales a base de lombricompost y bentonita (LM) obtuvieron valores de CE por debajo de los alcanzados por la bentonita y el lombricompost solos. A mayor DN de enmienda utilizada, la CE fue mayor y estadísticamente diferente de la bentonita sola, obteniendo valores 45%, 19% y 7% por debajo de los alcanzados por el lombricompost solo, correspondientes a LM1, LM2 y LM3. Estos valores más bajos de CE pudieron deberse al aumento de la capacidad de retención, lo que reduce la disponibilidad de cationes en la solución del suelo y por tanto disminuyen la concentración de sales. López *et al.* (2001) evaluaron diferentes tipos de compost y encontraron que sus aplicaciones aumentaron la CE entre 7% y 12% con respecto al suelo inicial.

En cuanto a las enmiendas con gallinaza, se encontraron valores de CE más bajos que la gallinaza sola, pero sin diferencias estadísticas. Los valores hallados para GM1, GM2 y GM3 estuvieron 26%, 13% y 21% por debajo de los hallados en la gallinaza respectivamente, donde el efecto de la bentonita no fue tan claro como lo mostrado con el lombricompost.

La MOS al cabo de cuatro meses fue mayor en los suelos con la aplicación de los abonos orgánicos y menor con el aporte de la bentonita, debido esta última a su composición mayormente mineral. A mayor cantidad de enmienda empleada, mayor fue el valor de MOS alcanzado al final del tiempo de experimentación. El valor bajo encontrado en el tratamiento con sólo bentonita obedece a que no hubo suministro orgánico. La aplicación de lombricompost y gallinaza aumentó la MOS en 59% y 63% respecto al testigo respectivamente, mientras que las enmiendas con lombricompost lo hicieron entre 46% y 51% y con gallinaza entre 45% y 56%. A pesar de la menor DN de abonos aplicados, la bentonita retrasó la mineralización de la MOS. En los tratamientos con bentonita se aplicaron menos del 50% de la DN empleada con el solo abono, pero al cabo del cuarto mes, la mineralización de la MOS, no se redujo en esa misma proporción, conservándose por más tiempo su contenido. Es posible que la bentonita y los radicales de carboxilos e hidróxidos de los abonos orgánicos, hayan hecho enlaces de alta energía que permitieron la conservación de la MOS y limitaron la acción de los microorganismos en el proceso de mineralización. Estos enlaces pueden ser similares a los realizados naturalmente en el suelo entre los minerales de arcilla y la MOS, formando complejos órgano minerales (Jaramillo, 2014).

El tratamiento LM3 logró incrementar la CICE significativamente con respecto al testigo y a los tratamientos con gallinaza G, GM2 y GM3. Este incremento se debió principalmente a la CICE de los compuestos orgánicos constituyentes del abono, con un mayor grado de mineralización y humificación, generando más radicales carboxilos e hidroxilos principalmente. La aplicación del lombricompost incrementó la CICE en 39% con respecto al testigo y en 36% con respecto a la gallinaza. La bentonita aumentó la CICE en 37% con respecto al testigo y alcanzó valores similares al lombricompost, pero sin diferencias estadísticas.

La aplicación de la enmienda órgano mineral elaborada a partir del lombricompost (LM3) aumentó la CICE, logrando valores similares a los alcanzados con la sola aplicación del lombricompost y la bentonita, sin diferencias estadísticas significativas entre ellos (C.V. = 13,2%). Los valores mostraron que aumentos en 0,5 kg en la aplicación de enmienda, la CICE no se incrementó proporcionalmente; cuando se bajó la cantidad de enmienda de 3,5 a 3,0 g·kg⁻¹ de suelo, la CICE aumentó 0,21 cmol(+)·kg⁻¹, mientras que al pasar de 3,0 a 2,5 g·kg⁻¹ de suelo, la CICE aumentó en 1,47 cmol(+)·kg⁻¹. Coelho y Do logo (2015) encontraron similar comportamiento en suelos tropicales lateríticos que, al ser mezclados con diferentes porcentajes de bentonita, aumentaron proporcionalmente su CIC. Así mismo, Zhang y Sun (2017) encontraron aumentos en la CIC y en la concentración de nutrientes en el compost de residuos verdes cuando fueron mezclados con bentonita.

La aplicación de la enmienda órgano mineral elaborada con gallinaza (GM1, GM2 y GM3), mantuvo la CICE constante, similares a las halladas con la gallinaza y la bentonita aplicadas de manera individual y al testigo. Estos resultados pueden deberse probablemente a la mayor afinidad para la realización de enlaces entre los compuestos orgánicos de la gallinaza y la bentonita, debido a tasas de mineralización más lentas, haciendo que la MOS se conserve por más tiempo al ocupar lugares de adsorción, donde podrían estar las bases intercambiables, por lo tanto, la CICE es más baja.

El suelo testigo después de los 4 meses, presentó valores altos de Ca²⁺, Mg²⁺ y bajos en K⁺ y Na⁺. La saturación de Mg²⁺ fue del 42,9%, lo que lo cataloga como un suelo magnésico, con consecuencias en la estructura del suelo. Aristizabal (2009) indica que altas concentraciones de Mg²⁺ en los suelos hacen que el movimiento del agua dentro del perfil sea más lento, debido a la desfloculación de arcilla, lo que reduce su estabilidad estructural y reducción en la conductividad hidráulica, además de facilitar la acumulación de Na⁺ en el suelo. Sin embargo, si los niveles de Ca²⁺ son altos, la dispersión se limita, se conserva la estructura y contrarresta la acción del Na⁺, al no permitir la apertura de las láminas de arcilla 2:1 y separarlas. Este efecto aumenta la conductividad hidráulica en saturado y favorece los flujos.

El tratamiento con lombricompost aumentó los niveles de Ca²⁺, Mg²⁺ y Na⁺ en 41%, 36% y 93% con respecto al testigo, debido a los aportes propios del abono después de la mineralización. En cuanto a la gallinaza, los incrementos sucedieron en el Mg²⁺, K⁺ y Na⁺, mientras que el Ca²⁺ disminuyó. Es posible que este elemento participara en enlaces con la mineralogía del suelo y los iones humatos para la creación de complejos órgano minerales, mejorando la estructura y la porosidad del suelo. La bentonita incrementó significativamente el Mg²⁺ en 59% con respecto al testigo y redujo el Na⁺ intercambiable, debido posiblemente a su fijación interlamina, ocasionado por la apertura de estas láminas debido al Mg²⁺, que son de difícil extracción.

Las enmiendas órgano minerales con lombricompost, incrementaron el Mg²⁺ y Na⁺ intercambiable con respecto al testigo, debido a los aportes de la bentonita. Sin embargo, el Ca²⁺ contenido en el lombricompost fue utilizado para flocular y mantener la estructura, formando enlaces entre el mineral y los radicales orgánicos, reduciendo el Ca²⁺ intercambiable. La saturación de Ca²⁺ estuvo entre 42% y 46%, mientras que la de Mg²⁺ se mantuvo entre 53% y 57%, manteniendo una relación aproximada de 1:1, razón por la cual la dispersión no ocurrió, aunque el flujo de agua a través del suelo pudo verse afectado.

Las enmiendas órgano minerales con gallinaza presentaron alta saturación de Mg²⁺ entre 63% y 69% mientras que la de Ca²⁺ estuvo entre 30% y 36% manteniendo una relación Ca/Mg de 1/2, que puede ser perjudicial para las condiciones estructurales del suelo. Es importante resaltar que al aumentar la DN de la enmienda, el Ca²⁺ intercambiable disminuyó mientras que el Mg²⁺ y el K⁺ intercambiables aumentaron. Especialmente estos incrementos de Mg²⁺ pudieron ocasionar la aparición de grietas en el suelo, que permitieron la aparición de

flujos preferentes, aumentando el flujo de agua. El aumento de K^+ pudo ocasionar el desplazamiento de Na^+ a la solución del suelo, reduciendo su valor intercambiable y por tanto la dispersión del suelo. De acuerdo con Zhang y Sun (2017), la presencia de bentonita en los abonos verdes aumenta significativamente la concentración de nutrientes, pero a su vez, pueden ocasionar desbalances que pueden reducir la utilidad y efectividad de la enmienda órgano mineral.

Los porcentajes de NTS al cabo de los cuatro meses estuvieron entre 0,04% y 0,13% para todos los tratamientos, sin diferencias estadísticas entre ellos (Figura 52). La alta variabilidad de los datos no permitió la visualización de diferencias entre tratamientos. Los tratamientos con presencia de bentonita, presentaron valores más bajos de NTS con respecto al testigo, con excepción de LM1 y GM3. La aplicación de enmienda órgano mineral a base de gallinaza, aumentó el porcentaje de NTS, entre 28,6% y 61,5% con respecto a la aplicación de la gallinaza sola y entre 14,3% y 53,8%, con respecto a la bentonita sola. Por el contrario, la aplicación de solo lombricompost obtuvo mayores porcentajes de NTS que los tratamientos con lombricompost-bentonita, con aumento entre 45,5% y 63,6%. Contrario a lo esperado, no se aumentaron las reservas de NT en el suelo, con respecto al testigo. Esto pudo deberse a la alta fertilidad de los suelos en estudio, a su alta CIC que protege la MOS y reduce su velocidad de mineralización, manteniendo las reservas de NTS. Al respecto Civeira y Rodríguez (2011) encontraron que la aplicación de zeolita junto a fertilizantes nitrogenados disminuía la concentración de nitrato y amonio residual en el suelo, mientras que los fertilizantes solos aumentaron dichas concentraciones debido a la protección que realiza la fracción mineral con el amonio en sus estructuras internas y externas, reduciendo el efecto de bacterias nitrificadoras sobre estas fuentes nitrogenadas.

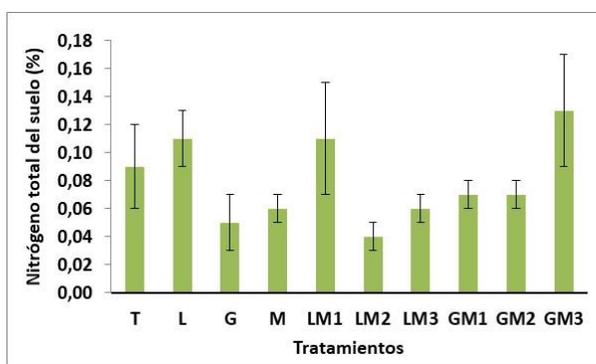


Figura 52. Efecto de enmiendas órgano minerales en el NTS a los cuatro meses después de su aplicación. Sin diferencias significativas entre tratamientos mediante la prueba de Dunnett al 95%. T= testigo; L= lombricompost; G= gallinaza; M= Bentonita; LM1= 3,0 g de enmienda organomineral por kg^{-1} de suelo; LM2= 3,5 g de enmienda organomineral por kg^{-1} de suelo; LM3= 4,0 g de enmienda organomineral por kg^{-1} de suelo; GM1= 2,5 g de enmienda organomineral por kg^{-1} de suelo; GM2= 3,0 g de enmienda organomineral por kg^{-1} de suelo; GM3= 3,5 g de enmienda organomineral por kg^{-1} de suelo. (F=1,56; p=0,20). Barras indican el error estándar.

4.4.2. Efecto de uso de enmiendas órgano minerales en LN en aromáticas

Tanto para el experimento con estevia como con albahaca no se produjo lixiviación, y por ende, no se registró pérdida de N. La principal explicación está relacionada con el manejo del agua de riego. Para el caso de la estevia, la lámina total aplicada fue de 7802,4 mL por unidad experimental, lo que representa $1724,7 m^3 \cdot ha^{-1}$. Este volumen estuvo por debajo de lo empleado por Aladakatti *et al.* (2012) ($2548 m^3 \cdot ha^{-1}$) y Niño *et al.* (2013) ($5488 m^3 \cdot ha^{-1}$), aunque sin consecuencias en la producción de biomasa, como se verá más adelante. Sumado a esto, la escarificación del suelo, así como la forma homogénea de aplicación, fueron determinantes para evitar la aparición de flujos preferenciales y evitar las pérdidas por lixiviación.

De igual manera, el agua empleada en albahaca fue el equivalente a $672,10 m^3 \cdot ha^{-1}$, mucho menor que la registrada para otros cultivos de la región como caña de azúcar ($10300 m^3 \cdot ha^{-1}$), maíz ($3600 m^3 \cdot ha^{-1}$) y soya ($3400 m^3 \cdot ha^{-1}$) (Pérez *et al.*, 2011) e inclusive de cultivos de albahaca púrpura en Turquía ($12120 m^3 \cdot ha^{-1}$) (Ekren *et al.*, 2012) y azafrán en Iran ($6700 m^3 \cdot ha^{-1}$) (Azizi-Zohan, *et al.*, 2008).

4.4.3. Efecto de uso de enmiendas órgano minerales en propiedades agronómicas de estevia.

El efecto de la aplicación de enmiendas órgano - minerales y tipo de fertilizantes en las propiedades agronómicas de la estevia se presentan en la Tabla 32. Las AP estuvieron entre 60,9 y 69,3 cm, sin diferencias estadísticas entre tratamientos. El crecimiento de las plantas no depende solamente de la aplicación de N, dado que existen otros factores determinantes como la luminosidad y la temperatura, así como las podas realizadas, que inciden en la elongación de las plantas. Sin embargo, estos valores de AP indican que las plantas recibieron la cantidad de N adecuada para realizar sus reacciones bioquímicas y la elongación celular, lo que incidió en un crecimiento normal (Berti *et al.*, 2000).

Tabla 32. Efecto de la aplicación de diferentes proporciones de una enmienda órgano mineral y de fertilizantes nitrogenados en propiedades agronómicas de estevia.

Tratamiento	AP (cm) ¹	Porcentaje de MS ²	Rendimiento de hoja fresca (Mg·ha ⁻¹) ³	Rendimiento de hoja seca (Mg·ha ⁻¹) ³	NF (%)
T	64,5±5,6 a	40,7±3,4 ab	4,60±0,2 a	1,66±0,1 a	0,27±0,12 b
UR	65,3±1,2 a	42,3±5,0 ab	5,40±0,3 a	1,99±0,1 a	1,17±0,06 a
U	65,0±2,5 a	40,6±0,5 b	5,07±0,1 a	1,84±0,1 a	1,29±0,07 a
U75	63,7±1,8 a	43,6±1,1 ab	5,12±0,1 a	1,93±0,1 a	1,28±0,09 a
U50	60,9±6,9 a	43,7±2,7 ab	4,90±0,2 a	1,82±0,0 a	1,20±0,08 a
UR75	60,7±5,2 a	47,2±0,5 a	4,75±0,1 a	1,82±0,0 a	1,25±0,04 a
UR50	69,3±1,7 a	43,0±1,4 ab	5,12±0,1 a	1,91±0,0 a	1,09±0,08 a
F	0,56	0,74	2,10	2,34	20,75
p	0,76	0,008	0,12	0,09	<0,001

¹ Test de Tukey (95%) ² test de Dunnett (95%); ³ Test de Duncan (95%). T= testigo; U= urea (100% de la DN de 150 kg/ha); UR= Urea recubierta (100% de la DN de 150 kg/ha); U75= urea (75% de la DN y 25% de enmienda órgano mineral); U50= urea (50% de la DN; 50% de enmienda órgano mineral); UR75= urea recubierta (75% de la DN; 25% de enmienda órgano mineral); UR50= urea recubierta (50% de la DN; 50% de enmienda órgano mineral).

Los valores logrados son similares a los encontrados en diversos estudios realizados al aire libre, cuyas AP estuvieron entre 28 y 60 cm (Gusqui *et al.*, 2010; Salgado, 2013; Zetina *et al.*, 2014; Dushyant *et al.*, 2014). Sin embargo, Maniruzzaman *et al.* (2016) encontraron AP entre 60 y 90 cm al fertilizar con DN por encima de 200 kg·ha⁻¹ y de alrededor de 60 cm cuando se fertilizó con 150 kg·ha⁻¹. Zaman *et al.* (2015) cultivaron estevia con 108 kg·ha⁻¹ de N, en diferentes tipos de suelo y encontraron AP entre 75,33 y 91,33 cm, siendo esta última en suelos similares a los utilizados en la presente investigación. Estas diferencias pueden deberse a que los investigadores realizaron nivelaciones nutricionales de azufre, zinc y boro y el suelo empleado no presentaba desbalance de bases intercambiables. El suelo utilizado en la presente investigación presentó desbalance nutricional y sólo se hizo nivelaciones de P y K.

Los porcentajes de MS estuvieron entre 40,6% y 47,2% y se encontraron diferencias estadísticas entre los tratamientos U y UR75. Los porcentajes alcanzados fueron muy similares para los dos tipos de abono y las DN utilizadas, indicando que la aplicación de la enmienda contribuyó a la retención de N y al suministro gradual hacia la planta, evitando sus pérdidas por volatilización o por lixiviación. En el caso de la urea convencional, el mayor porcentaje fue alcanzado con la mitad de la DN y la aplicación de la enmienda órgano mineral y estuvo 8% por encima del porcentaje alcanzado con 100% de la DN y sin enmienda órgano mineral. Para la urea recubierta, el mayor porcentaje alcanzado fue con el 75% de la DN y la aplicación de la enmienda (1,34 Mg·ha⁻¹) (UR75), superando en 10,4% el valor alcanzado por el 100% de la DN del fertilizante y sin aplicación de enmienda. Es posible que una aplicación de mayor cantidad de enmienda con este tipo de fertilizante, no facilite la disponibilidad de N para la planta, afectándose la producción de masa, debido a la baja tasa de solubilidad de la urea recubierta y a la preferencia de adsorción por los iones amonio de la bentonita. Sin embargo, la combinación de la bentonita con el abono orgánico obtuvo mejores resultados. Eprikashvili *et al.* (2016) encontraron que los mejores resultados en cuanto a germinación y producción de biomasa de cebada fueron obtenidos con la mezcla de zeolita y lignito aplicados al suelo, debido principalmente al crecimiento de la actividad microbiana favorable para la planta, y a las condiciones microambientales que se forman en la zona de raíces, las cuales benefician la retención de agua y la aireación.

La aplicación de la enmienda órgano mineral permitió conseguir porcentajes de MS entre 43% y 47,2%, aunque no se pudieron establecer diferencias significativas entre la presencia o ausencia de la enmienda ($F= 3,03$; $p=0,10$). Igualmente, la proporción de la enmienda tampoco incidió significativamente en el porcentaje de MS. Diferentes resultados fueron encontrados por Civeira y Rodríguez (2011), que al aplicar la zeolita junto a fertilizantes nitrogenados lograron aumentar el porcentaje de MS en maíz.

Los rendimientos de hoja fresca estuvieron entre 4,60 y 5,40 $Mg \cdot ha^{-1}$ mientras que los de hoja seca estuvieron entre 1,66 y 1,99 $Mg \cdot ha^{-1}$ sin diferencias estadísticas entre tratamientos. La urea convencional y la de liberación lenta presentó 9,27% y 10,15% más rendimiento de hoja fresca con respecto al testigo, sin diferencias entre ambos fertilizantes ($F= 2,31$; $p=0,13$). Tampoco se encontraron diferencias entre las DN empleadas para los dos tipos de fertilizante. Sin embargo, la aplicación del 100% de la DN de urea recubierta obtuvo 14% y 12% más de rendimiento fresco que el testigo y el 75% de la DN de urea recubierta junto a la enmienda órgano mineral, respectivamente.

La aplicación de la enmienda no tuvo un efecto significativo en el rendimiento fresco ($F=0,11$; $p=0,74$). Los rendimientos de biomasa hallados estuvieron por debajo de los reportados por Das *et al.* (2008), quienes encontraron rendimientos de biomasa total entre 7,78 y 9,78 $Mg \cdot ha^{-1}$ utilizando abonos orgánicos y biofertilizantes. Los bajos valores hallados en el presente trabajo se deben a que solo se consideró el peso de hoja y no toda la biomasa. Dushyant *et al.* (2014) encontraron peso de hoja fresca entre 2,39 y 2,97 $Mg \cdot ha^{-1}$ utilizando abonos orgánicos como lombricompost y residuos de hueso, valores por debajo de los hallados en la presente investigación, mostrando que la fertilización inorgánica puede traer mayores rendimientos. Maniruzzaman *et al.* (2016) encontraron rendimientos de hoja fresca de alrededor de 1,79 $Mg \cdot ha^{-1}$, utilizando 150 $kg \cdot ha^{-1}$ de N, y de 3,92 $Mg \cdot ha^{-1}$, utilizando 250 $kg \cdot ha^{-1}$ de N, tanto en suelos ácidos como básicos en Bangladesh, valor por debajo de los hallados en diversas investigaciones, incluida la presente. Zaman *et al.* (2015) encontraron rendimientos de hoja fresca entre 1,82 y 3,48 $Mg \cdot ha^{-1}$ en diferentes suelos, siendo el último valor el registrado para suelos parecidos a los empleados en la presente investigación.

En cuanto al rendimiento seco, los tratamientos U75, UR y UR50 obtuvieron 14,0%, 16,6% y 13,1% por encima de los obtenidos por el tratamiento testigo, respectivamente, sin diferencias estadísticas (C.V. = 6,4%). Los tratamientos con aplicación del 100% de la DN obtuvieron similares rendimientos a los obtenidos con la aplicación de la enmienda, sin diferencias estadísticas. Los valores obtenidos estuvieron por debajo de los reportados por Yang *et al.* (2013) quienes obtuvieron rendimientos de hasta 4,5 $Mg \cdot ha^{-1}$, Gusqui *et al.* (2010) alcanzaron 2,9 $Mg \cdot ha^{-1}$ y Salgado (2013) encontró rendimientos entre 2,78 y 5,06 $Mg \cdot ha^{-1}$. Esta diferencia de resultados puede deberse a que en la presente investigación se consideró el peso de la hoja solamente, mientras que, en los trabajos citados, contemplaron el peso seco total aéreo de la planta. Dushyant *et al.* (2014) encontraron rendimiento de hoja de estevia seca entre 0,67 y 0,84 $Mg \cdot ha^{-1}$, y Bonilla *et al.* (2007) entre 0,33 y 0,43 $Mg \cdot ha^{-1}$ ambos utilizando solamente fertilizantes orgánicos, valores por debajo de los hallados en el presente trabajo. Así mismo, Maniruzzaman *et al.* (2016), al fertilizar con 150 $kg \cdot ha^{-1}$ de N en suelos básicos, obtuvieron rendimientos de 0,52 $Mg \cdot ha^{-1}$ de hoja seca de estevia, mientras que al utilizar DN de 300 $kg \cdot ha^{-1}$ de N, obtuvieron 0,96 $Mg \cdot ha^{-1}$ de hoja seca. En Paraguay se reportan valores más altos, como por ejemplo Velázquez *et al.* (2016) quienes encontraron rendimientos entre 0,96 y 2,76 $Mg \cdot ha^{-1}$ con la aplicación de estiércol vacuno, donde la DN de 60 $Mg \cdot ha^{-1}$ de estiércol es la que consiguió el mayor rendimiento. Zaman *et al.* (2015) obtuvieron 0,95 $Mg \cdot ha^{-1}$ en suelos no calcáreos con DN de 108 $kg \cdot ha^{-1}$.

El NF estuvo entre 0,27% y 1,29% encontrándose diferencias entre tratamientos. Todos los tratamientos estuvieron por encima del testigo, indicando que todos brindaron N y que las plantas pudieron aprovechar el N suministrado por el tratamiento. No se encontraron diferencias entre abonos orgánicos ni entre DN empleadas. La aplicación de enmiendas órgano minerales no tuvo influencia en la absorción de N por las plantas. Similares resultados fueron reportados por Civeira y Rodríguez (2011) quienes no encontraron diferencia en el N absorbido por la planta con la aplicación de zeolitas en comparación con la combinación zeolita - fertilizante nitrogenado. Gholamhosein *et al.* (2013) encontraron que la combinación de zeolita con estiércol de vaca aumentó la toma de N por plantas de girasol, con respecto al uso de la urea y el estiércol sólo y atribuyen este

resultado a la alta CIC de la enmienda y al suministro gradual de NH_4^+ al medio para su oxidación a NO_3^- por parte de bacterias nitrificantes, lo que incrementó la concentración de N en el suelo y la toma de N por la planta.

Los bajos valores de NF se vieron reflejados en la producción de MF y MS como se apreció anteriormente. Los valores de NF reportados por Borda-Molina *et al.* (2009) para estevia están entre 1,92% y 2,20%, por Salgado (2013) entre 1,8% y 2,8% y por Maniruzzaman *et al.* (2016) entre 1,15% y 1,62%. Estos bajos valores hallados pudieron deberse a la afectación de las hojas por la enfermedad alternariosis en la semana seis presentada durante el cultivo que, a pesar de controlarse oportunamente, logro afectar algunas hojas de las plantas. Das *et al.* (2007) reportaron valores de NF entre 0,23% y 0,39% en estevia cultivada en la India, utilizando biofertilizantes y Bonilla *et al.* (2007) entre 0,16% y 0,70% utilizando abonos orgánicos. Maniruzzaman *et al.* (2016) encontraron que, para alcanzar la máxima cosecha, la concentración de N en las hojas fue de 1,43% en suelos ácidos y 1,50% en suelos básicos y Jarma *et al.* (2010) reportan que la concentración promedio en estevia en Colombia es de 2,07%. Pese a estos resultados, la presente investigación alcanzó mayores producciones de hoja con menor concentración de NF, lo que no afectaría la concentración de edulcorantes (Barroso *et al.*, 2018). Milosevik *et al.* (2013) encontraron que el contenido de NF en albaricoque fue más alto cuando se aplicó urea que otros fertilizantes como nitrato de calcio y el estiércol de vacuno, alcanzando valores de 2,82%, debido al alto suministro de N que este fertilizante brinda al medio. Otra razón por los bajos valores de NF pudo ser el manejo del agua de riego. Durante el desarrollo del cultivo se presentaron altas temperaturas, que en ocasiones la lámina calculada con el Kc fue insuficiente, lo que fue necesario adicionar mayor cantidad de agua, sin llegar a ocasionar lixiviación. Es posible que estas láminas aplicadas pudieran tener un efecto en la absorción de nutrientes, especialmente del N.

4.4.4. Efecto de uso de enmiendas órgano minerales en propiedades del suelo sembrado con estevia.

El efecto de la aplicación de las enmiendas órgano-minerales en algunas propiedades químicas del suelo, después de la cosecha de las plantas de estevia se consignan en la Tabla 33. Los valores de pH no se vieron afectados por el tipo de abono, ni por la DN ni por la aplicación de la enmienda (C.V. = 34,1%). Sin embargo, los valores estuvieron por debajo del reportado al inicio del experimento. Estas diferencias pudieron deberse a la extracción de nutrientes por la planta, a la aplicación de láminas de riego que pudieron bajar en el perfil bases intercambiables y al tipo de muestreo realizado al inicio del experimento, el cual consistió en la recolección de una muestra representativa de suelos de toda la parcela cultivada, y la extracción de suelo para el experimento se realizó de una zona particular. La aplicación de enmiendas pudo retener bases intercambiables e iones H^+ que afectó la determinación de pH en solución. Los pHs alcanzados están catalogados como ligeramente ácidos, donde la mayoría de los nutrientes esenciales están disponibles. La mayoría de los estudios realizados con bentonita se han realizado en suelos ácidos, obteniendo respuestas positivas para la retención de cationes debido a su naturaleza alcalina (Xu *et al.*, 2017). A pesar de esta basicidad, su comportamiento en los suelos con pH ligeramente ácidos, no tuvieron mayor efecto en el pH final.

De igual manera, la CE estuvo entre 0,54 y 0,71 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ sin diferencias estadísticas entre tratamientos. Estos valores estuvieron por encima del valor hallado en la caracterización inicial del suelo, pero son valores deseables para la mayoría de los cultivos (González *et al.*, 2015). Los resultados indicaron mayor disponibilidad de nutrientes al momento de la cosecha, lo que conlleva a que la aplicación de abonos y de enmiendas órgano mineral se debe realizar con mayores días de anterioridad. La aplicación de abonos orgánicos y de enmiendas no salinizaron los suelos.

La MOS no cambió significativamente por la adición de abonos y enmiendas. Los valores hallados después de la cosecha estuvieron entre 1,98% y 2,70% correspondientes a los tratamientos UR y UR50, respectivamente. La dispersión de los datos no permitió evidenciar el efecto de los tratamientos, debido posiblemente al muestreo insuficiente y a la presencia de raicillas de estevia en la muestra para analizar.

Tabla 33. Efecto de la aplicación de enmiendas órgano minerales en propiedades químicas del suelo después de 96 después del trasplante de estevia.

Tratamiento	pH ¹	CE (dS·m ⁻¹) ¹	MO (%) ²	CIC (cmol(+)·kg ⁻¹) ²	NTS (%) ³
T	5,83±0,08 a	0,54±0,02 a	2,15±0,29 a	21,39±1,18 c	0,09±0,01 bc
U	5,81±0,04 a	0,71±0,05 a	2,53±0,26 a	22,55±0,84 bc	0,14±0,02 b
UR	5,69±0,10 a	0,71±0,03 a	1,98±0,48 a	29,45±0,47a	0,05±0,02 cd
U75	5,71±0,08 a	0,64±0,02 a	2,64±0,22 a	24,52±3,42 bc	0,04±0,00 cd
U50	5,84±0,09 a	0,61±0,08 a	2,08±0,11 a	26,56±0,57 ab	0,04±0,00 d
UR75	5,64±0,06 a	0,71±0,13 a	2,02±0,06 a	29,62±0,97a	0,02±0,00 d
UR50	5,75±0,07 a	0,62±0,05 a	2,70±0,11 a	30,22±0,58 a	0,23±0,02 a
F	0,82	0,95	1,48	5,76	23,72
p	0,57	0,49	0,26	0,00	0,00

¹Test de Tukey (95%) ²Test de Dunnett (95%) ³Test de Duncan (95%). T= testigo; U= urea (100% de la DN de 150 kg/ha); UR= Urea recubierta (100% de la DN de 150 kg/ha); U75= urea (75% de la DN y 25% de enmienda órgano mineral); U50= urea (50% de la DN; 50% de enmienda órgano mineral); UR75= urea recubierta (75% de la DN; 25% de enmienda órgano mineral); UR50= urea recubierta (50% de la DN 50% de enmienda órgano mineral).

Los valores de CIC estuvieron entre 21,39 y 30,22 cmol(+)·kg⁻¹ para los tratamientos testigo y UR50 respectivamente, encontrándose diferencias estadísticas entre tratamientos. Los tratamientos con urea U y U75 no presentaron diferencias estadísticas con el testigo, mientras que la urea recubierta (UR) estuvo significativamente por encima del testigo, aumentando la CIC entre 27,4% y 29,2%. Los tratamientos con UR obtuvieron mayores valores de CIC que U y U75. La aplicación de la enmienda órgano mineral incrementó la CIC para los dos tipos de abono, a mayor DN de aplicación, mayor CIC se obtuvo. Coelho y Do Logo (2015) encontraron relaciones lineales directamente proporcionales entre diferentes DN de bentonita aplicadas a suelos tropicales y la CIC. En el caso de la urea, la aplicación de la enmienda aumentó la CIC entre 8,0% y 15,1% con respecto a la aplicación de la enmienda sola, mientras que, en el caso de la UR, la enmienda aumentó la CIC entre 0,7% y 2,5%.

El NTS encontrado al final del periodo experimental estuvo entre 0,02% y 0,23%, con diferencias estadísticas entre tratamientos. La combinación de la urea recubierta con el 50% de la DN requerida y la enmienda órgano mineral obtuvo el mayor valor, diferente a los demás tratamientos, dejando un remanente de N que podría ser aprovechado en las siguientes cosechas. También es posible que la lenta disolución y la aplicación de la enmienda en gran proporción, hayan retrasado la disponibilidad del N y que, debido a la alta fertilidad inicial del suelo, el efecto se haya enmascarado mostrando respuesta positiva en la planta.

El tipo de fertilizante no tuvo ninguna influencia en el NTS (F=0,29; p=0,75), ni tampoco la aplicación de la enmienda (F=0,03, p=0,87), pero la combinación entre el fertilizante y la enmienda tuvo efecto en la cantidad de N encontrado después del periodo experimental. Algunos tratamientos como el U50 y el UR75 obtuvieron valores por debajo de los reportados para el testigo, además de los valores más bajos en rendimiento de la planta, indicando posiblemente pérdidas de N por volatilización o por traslocación a capas profundas, donde no pudo ser absorbido por la planta.

En el caso de la urea con el 100% de la DN empleada, el valor alcanzado después del tiempo experimental, parece indicar procesos de inmovilización en el suelo. La aplicación de N disponible pudo aumentar la actividad microbiana, inmovilizando el N. Este proceso sucede por ciclos, con la variación de la población microbiana y los procesos de descomposición, que dan paso a ciclos cortos de mineralización e inmovilización en el tiempo, hasta cuando el sustrato orgánico se agote. Los bajos valores obtenidos al aplicar la enmienda, pueden deberse a que una gran parte del N mineralizado fue retenida en el complejo de cambio y no fue disponible para la inmovilización por parte de la biomasa microbiana. Sepaskhah y Barzegar (2010) encontraron valores menores de NTS después de la cosecha de arroz, por debajo de los reportados inicialmente, a pesar de la adición de fertilizante y zeolita, debido a pérdidas por volatilización y a la alta retención de la zeolita, y argumentan que, para mantener un efecto residual en el suelo, la aplicación de altas DN de fertilizantes debe ir acompañada de bajas dosis de zeolita.

El tamaño de las partículas también pudo haber incidido en la concentración de N residual. Al respecto Civeira y Rodríguez (2011) aseguran que los minerales aplicados como la zeolita podrían tener mayor efecto al usarse con fertilizantes o con abonos orgánicos, si ambas partes tienen similar tamaño de partícula, para asegurar un mejor contacto. De acuerdo a lo anterior, los autores sugieren que los minerales de arcilla presentan mejor interacción con el N proveniente de un fertilizante aplicado que con el N proveniente de la mineralización del suelo.

La aplicación del abono orgánico también pudo incidir en el contenido final de NT en el suelo. De acuerdo con Das *et al.* (2008), la aplicación de abonos orgánicos junto a biofertilizantes, incrementó significativamente los contenidos de amonio y nitrato en el suelo durante los tres primeros meses, debido a la positiva interacción entre los compuestos orgánicos y los microorganismos. Después de tres meses, el contenido de N inorgánico en el suelo disminuyó por el efecto de disolución debido a una mayor producción de biomasa.

4.4.5. Efecto de la aplicación de enmiendas órgano minerales en la eficiencia de la Fertilización Nitrogenada (FN) en estevia.

La aplicación de enmiendas órgano minerales aumentó la cantidad de N absorbido por cada unidad de N aplicado (ER) (Figura 53A). A mayor cantidad de enmienda, mayor fue la eficiencia en el uso de N por parte de la planta. No se encontraron diferencias entre los abonos de rápida y lenta liberación en esta eficiencia de recuperación. En el caso de la urea, la aplicación de la enmienda aumentó la ER en 27,3% y 40,5% con la menor y mayor dosis aplicada respectivamente, mientras que, en la urea recubierta, lo hizo en 26,9% y 40,1% respectivamente, encontrando similares resultados entre ambos fertilizantes. Los valores hallados mostraron alta eficiencia, en comparación con otros cultivos como la hierba de San Juan donde Berti *et al.* (2000) reportaron valores de ER entre 0,10 y 0,18 kg de N absorbido por kg de aplicado, debido a las altas DN empleadas, que son más propensas a pérdidas por lixiviación y volatilización y a la incidencia de enfermedades que afectan la capacidad de absorción de N.

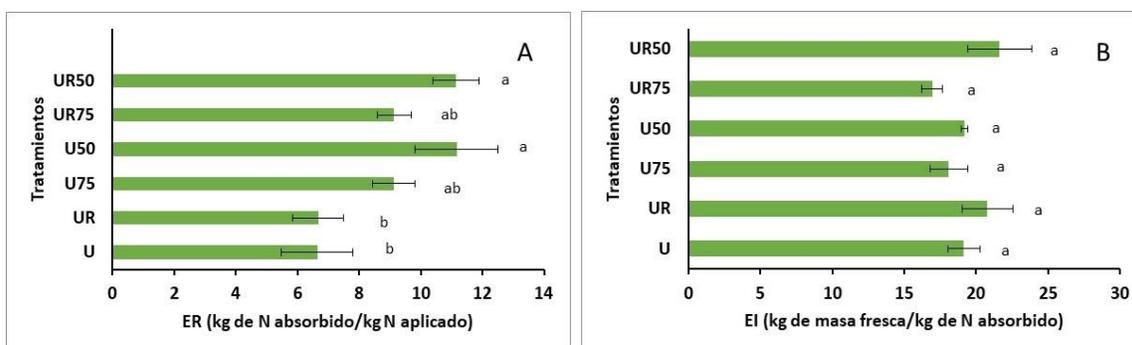


Figura 53. Efecto de la aplicación de enmiendas órgano minerales en la eficiencia de la fertilización, utilizando fertilizantes de rápida y lenta liberación en cultivo de estevia.

(A) ER= Eficiencia aparente de recuperación (F=4,98; p=0,01) Prueba de Tukey (95%). (B) EI= Eficiencia interna de utilización (F= 1,51; p=0,26) Prueba de Tukey (95%). Letras iguales indican que no hay diferencia significativa entre tratamientos. U= urea (100% de la DN de 150 kg/ha); UR= Urea recubierta (100% de la DN de 150 kg/ha); U75= urea (75% de la DN y 25 % de enmienda órgano mineral); U50= urea (50% de la DN; 50% de enmienda órgano mineral); UR75= urea recubierta (75% de la DN; 25% de enmienda órgano mineral); UR50= urea recubierta (50% de la DN 50% de enmienda órgano mineral). Las barras indican el error estándar.

La ER fue mayor a menor dosis de fertilizante nitrogenado empleado y a mayor cantidad de enmienda utilizada. Sepaskhah y Barzegar (2010) encontraron en arroz que la ER fue mayor con la aplicación de mayores dosis de fertilizante nitrogenado y zeolita, alcanzando valores de hasta 73% con DN de 80 kg·ha⁻¹ de N, valor por debajo de lo alcanzado por las plantas aromáticas del presente estudio.

La EI encontrada estuvo entre 17% y 21% para todos los tratamientos, sin diferencias estadísticas entre tratamientos (Figura 53B). La utilización de estrategias como abonos de liberación lenta y la enmienda órgano mineral mantuvieron los valores de EI por debajo de 50 kg·kg⁻¹. Éstas EI fueron bajas al compararlas con las

eficiencias fisiológicas halladas para otros cultivos como hierba de San Juan (50 kg de MF por kg de N absorbido) (Berti *et al.*, 2000), maíz (55 – 65 kg·kg⁻¹ de N absorbido) (Dobermann, 2007). Estos resultados pudieron deberse a los bajos rendimientos alcanzados, debido probablemente a las condiciones de altas temperaturas del invernadero y a bajas láminas de riego.

La Figura 54 muestra el efecto de la enmienda y el tipo de fertilizante en la ER, donde se puede apreciar que la presencia de enmienda incrementó en un 32% la cantidad de N absorbido con relación al aplicado, con respecto a la no aplicación de enmienda. Este resultado se debe principalmente a la capacidad que tiene la enmienda de adsorber el N disponible, especialmente en formas amoniacales, para retrasar la nitrificación y evitar la inmovilización, mejorando la disponibilidad del elemento para la planta. En cuanto el tipo de abono, no se encontró diferencias significativas en la ER, la urea sólo estuvo en un 4,7% por encima de la UR. No se encontraron diferencias en la EI ni para presencia de enmienda ni tipo de fertilizante (C.V. = 13,4% y 13,5%, respectivamente).

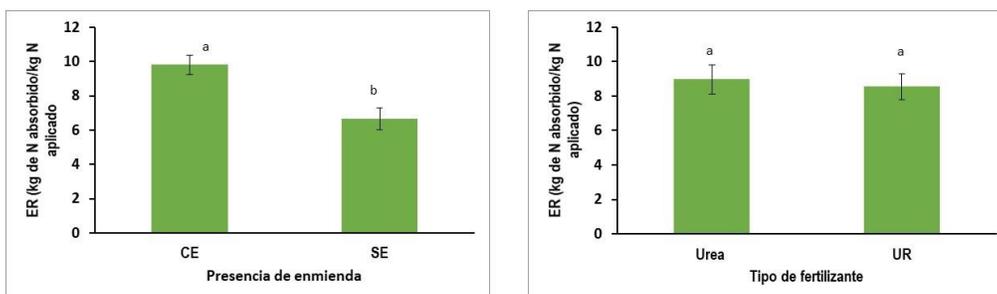


Figura 54. Efecto de la presencia de enmiendas órgano minerales y el tipo de fertilizante en la eficiencia aparente de recuperación en el cultivo de estevia.

A. CE= con enmienda; SE= sin enmienda; (F=11,69; p<0,001) B. UR= urea recubierta (F=0,14; p=0,71). Letras iguales indican que no hay diferencia significativa entre tratamientos. Las barras indican el error estándar.

4.4.6. Efecto de la aplicación de enmiendas órgano minerales en el uso eficiente del agua (EUA) en estevia.

En la Figura 55 se encuentra representado el efecto de los tratamientos en el uso eficiente del agua por parte de las plantas de estevia. Los valores hallados estuvieron entre 1,84 y 2,75 kg de MS por m³ de agua aplicada, correspondientes a los tratamientos testigo y UR, respectivamente. Para el caso de la urea convencional, la aplicación de la enmienda órgano mineral no tuvo efecto en la eficiencia del uso del agua, obteniendo valores alrededor de 2 kg·m⁻³. Caso contrario ocurrió para urea recubierta (UR), en donde no se encontraron diferencias en la eficiencia del uso del agua al comparar con los tratamientos con reducción de dosis y enmienda órgano-mineral. Este resultado está ligado más que a la retención de agua, a la capacidad que tuvo de la enmienda de retener el amonio y no dejarlo disponible para la planta. Es posible que la UR liberará el N lentamente y al aumentar la CIC del suelo, quedará adsorbido retrasando la disponibilidad para la planta. Este retraso hizo que la planta no absorbiera el nutriente en el momento justo, lo que repercutió en el rendimiento del cultivo. También es probable que la efectividad de la utilización de la enmienda junto a FLL dependa de los tiempos de aplicación para asegurar la disponibilidad oportuna para la planta. De acuerdo con Civeira y Rodríguez (2011), el tiempo gastado en la mineralización de la MOS hasta llegar a amonio y ser adsorbido por el mineral de arcilla, es menor que el gastado en la conversión de amonio a nitrato, motivo por el cual se retrasa la disponibilidad de N para las plantas.

La UR al solubilizar más lentamente el N, realiza una entrega gradual del nutriente a la planta, dando la oportunidad de ser aprovechado y no perderse a capas profundas o por volatilización. Así la UR aumentó en 13% y 33% la eficiencia del uso del agua con respecto a la urea convencional sola y al testigo.

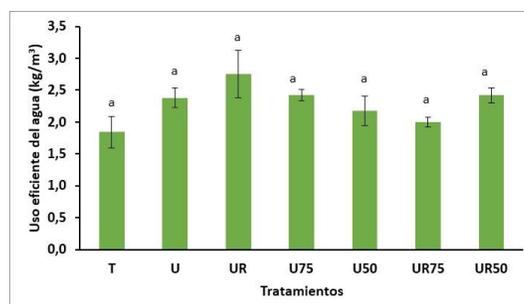


Figura 55. Efecto de la aplicación de enmiendas órgano minerales en la eficiencia del uso del agua, utilizando fertilizantes de rápida y lenta liberación en cultivo de estevia.

T= testigo; U= urea (100% de la DN de 150 kg/ha); UR= Urea recubierta (100% de la DN de 150 kg/ha); U75= urea (75% de la DN y 25% de enmienda órgano mineral); U50= urea (50% de la DN; 50% de enmienda órgano mineral); UR75= urea recubierta (75% de la DN; 25% de enmienda órgano mineral); UR50= urea recubierta (50% de la DN 50% de enmienda órgano mineral). Prueba de Tukey al 95% (F= 2,10; p=0,12). Letras iguales indican que no hay diferencia significativa entre tratamientos. Las barras indican el error estándar.

La eficiencia del uso del agua estuvo más influenciada por el tipo de abono que por la adición de la enmienda como se muestra en la Figura 56. Independientemente de la aplicación de la enmienda, los tratamientos con la aplicación de UR obtuvieron en promedio 2,5% la eficiencia del uso del agua que los tratamientos con urea y en 23,0% con respecto al testigo, pero sin diferencias significativas. Sin embargo, no se debe desconocer que la aplicación de MOS puede incrementar significativamente la retención de agua y este incremento es mayor para la retención a altos potenciales de tensión (Glab *et al.*, 2016)

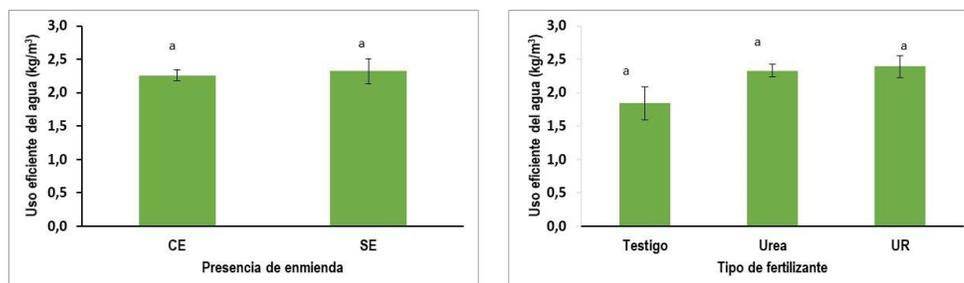


Figura 56. Efecto de la presencia de enmiendas órgano minerales y el tipo de fertilizante en el uso eficiente del agua en el cultivo de estevia.

A. CE= con enmienda; SE= sin enmienda (F=0,12; p=0,74) B. UR= urea recubierta; (F=2,30; p=0,13). Las barras indican el error estándar.

Varios estudios han demostrado los beneficios de aplicación de enmiendas minerales al suelo para mejorar la resistencia al estrés hídrico. Por ejemplo, Moradi *et al.* (2017), encontraron que la aplicación de $4,5 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de zeolita alivió el estrés hídrico moderado de plantas de girasol en un 32% con respecto al testigo. Sepaskhah y Barzegar (2010) demostraron que, a mayor dosis de zeolita aplicada, mayor fue la eficiencia del uso del agua en arroz, y que la DN de fertilizante nitrogenado empleado no tuvo incidencia en el uso del agua por parte de la planta. Los mismos autores reportaron productividades de agua máximos de $0,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ con aplicaciones de $80 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de N y $8 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de zeolita, valores por debajo de los hallados para las aromáticas. Hazrati *et al.* (2017) encontraron valores de eficiencia de uso de agua de $28,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ de hoja fresca en cultivos de aloe vera, manteniendo el suelo al 60% de la CC y aplicando 8 g de zeolita por kg de suelo, y aseguran que la eficiencia mejora a medida que se reduce la cantidad de agua aplicada y se aumenta la dosis de zeolita, pero se afectan variables agronómicas como la producción de hoja y gel.

4.4.7. Efecto de uso de enmiendas órgano minerales en propiedades agronómicas de albahaca.

El efecto de la aplicación de enmiendas órgano - minerales y tipos de abono en las propiedades agronómicas de la albahaca se encuentran en la Tabla 34. Los tratamientos no tuvieron efecto en la AP de albahaca indicando que es independiente del N aplicado (Yepes *et al.*, 2016). Las AP alcanzadas estuvieron entre 51,77 y 60,07

cm, medidas por encima de las alcanzadas por Ledesma *et al.* (2013) (14 – 37 cm) y González (2013) (36 cm) quienes utilizaron bioabonos, pero por debajo de las reportadas por Pandey *et al.* (2016) (65 -79 cm), quienes emplearon combinación de abono orgánico y fertilizante inorgánico. González *et al.* (2009) encontraron AP entre 50,0 y 58,3 cm, similares a las halladas en esta investigación, cuando utilizaron relaciones de amonio/nitrato igual a 20/80.

Tabla 34. Efecto de la aplicación de diferentes proporciones de una enmienda órgano mineral y de fertilizantes nitrogenados en propiedades agronómicas de albahaca.

Tratamiento	AP ¹ (cm)	Porcentaje de MS ¹	Rendimiento de hoja fresca (Mg ha ⁻¹) ²	Rendimiento de hoja seca (Mg ha ⁻¹) ¹	NF (%) ²
T	52,77±3,4 a	43,4±3,4 a	1,57±0,18b	0,67±0,0 b	1,44±0,15 b
U	60,07±1,1 a	40,81±2,7 a	2,27±0,16 ab	0,90±0,1 ab	1,44±0,10 b
UR	57,5±2,4 a	43,12±1,3 a	1,90±0,09 ab	0,83±0,0 ab	1,82±0,16 a
U75	57,40±3,2 a	40,48±3,1 a	2,56±0,15 a	1,03±0,0 a	1,46±0,04 b
U50	54,80±6,9 a	35,29±1,4 a	2,55±0,46 a	0,87±0,1 ab	1,72±0,10 ab
UR75	59,70±2,2 a	37,06±1,1 a	2,57±0,06 a	0,97±0,0 a	1,92±0,08 a
UR50	51,77±6,7 a	36,92±2,3 a	2,29±0,30 ab	0,83±0,1 ab	1,66±0,08 ab
F	0,60	1,79	2,65	3,54	3,31
p	0,73	0,17	0,02	0,02	0,03

¹ Test de Tukey (95%) ² Test de Duncan (95%). T= testigo; U= urea (100% de la DN de 150 kg/ha); UR= Urea recubierta (100% de la DN de 150 kg/ha); U75= urea (75% de la DN y 25% de enmienda órgano mineral); U50= urea (50% de la DN; 50% de enmienda órgano mineral); UR75= urea recubierta (75% de la DN; 25% de enmienda órgano mineral); UR50= urea recubierta (50% de la DN 50% de enmienda órgano mineral).

El porcentaje de MS no presentó diferencias estadísticas entre tratamientos (C.V.= 10,5%), indicando que la concentración de N brindada por el suelo y los tratamientos fue suficiente para la albahaca, que al parecer no es altamente demandante en este elemento. Los resultados pueden deberse a la menor disponibilidad de N para las plantas y a que las enmiendas podían adsorber el N, suministrándolo gradualmente en formas amoniacales. Como el proceso de nitrificación se pudo ver retardado, la concentración de nitratos en el medio pudo ser baja.

Los rendimientos de hoja fresca y seca estuvieron entre 1,57 y 2,57 Mg·ha⁻¹ para los primeros y entre 0,67 y 1,03 Mg·ha⁻¹ para los segundos, encontrándose diferencias estadísticas entre tratamientos. Los valores más bajos fueron hallados para el tratamiento testigo. La aplicación de la enmienda órgano mineral tuvo efecto significativo en la obtención de los rendimientos de hoja fresca (F= 10,23; p=0,01). El tipo de fertilizante empleado no tuvo repercusiones en los rendimientos de hoja fresca alcanzados, aunque si fueron diferentes del testigo (F=5,12; p=0,02). El rendimiento de hoja seca se vio influenciada por la aplicación de la enmienda (F=4,73; p=0,04) pero el tipo de fertilizante no afectó dicho rendimiento, aunque si fueron diferentes del testigo (F=5,97; p=0,01). Similares resultados fueron encontrados por Gholamhosein *et al.* (2013), al encontrar que la aplicación de abono de estiércol de vaca junto a la zeolita logró mayor cantidad de biomasa en un cultivo de girasol, debido principalmente a la protección del N actuando como un abono de liberación lenta, evitando su pérdida.

El NF estuvo entre 1,44% y 1,92% para el testigo (T) y UR75 respectivamente, encontrándose diferencias estadísticas entre los tratamientos evaluados. Los tratamientos con urea presentaron los valores más bajos de NF, similares al testigo. La presencia de la mayor dosis de enmienda logró aumentar la absorción de N por la planta, posiblemente debido a que permitió retener el ion amonio por más tiempo, aumentando su disponibilidad. Este aumento fue del orden del 16% con relación al testigo y a la aplicación de la urea convencional. Las adiciones de urea recubierta mejoraron la absorción del N por la planta, mostrando que los abonos de liberación lenta, al proporcionar gradualmente el nutriente, brinda mejores oportunidades de absorción. La menor dosis de enmienda, aumentó en 5% la absorción de N, aunque no fue significativo. La

mayor dosis de enmienda, por el contrario, redujo la concentración de NF en 8,8%, pero sin diferencia estadística con los otros tratamientos con UR.

Al analizar todos los tratamientos, los resultados estadísticos muestran que el tipo de fertilizante empleado tuvo mayor peso en la absorción de N por las plantas que la adición de la enmienda (Figura 57). Sin embargo, los resultados evidencian que la enmienda órgano mineral mejoró la absorción de N cuando se aplicó la urea convencional, al reducir el potencial de pérdidas de N. De acuerdo con Gholamhosein *et al.* (2013), la aplicación de la enmienda órgano mineral, no sólo protege el N, sino que además mejora las características físicas del suelo, lo que resulta en mayor distribución y penetración de raíces. Wyszowski y Ziolkowska, (2009), igualmente encontraron que la aplicación de bentonita – abono orgánico favoreció la toma de N por plantas de colza y avena en suelos contaminados con petróleo. Para la urea recubierta, la aplicación de la enmienda fue indiferente.

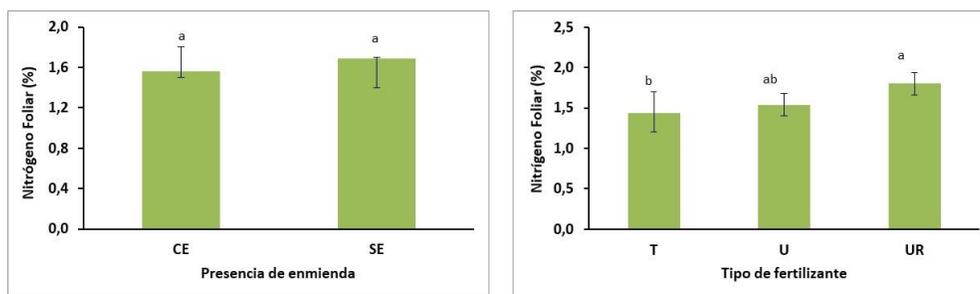


Figura 57. Efecto de la presencia de enmiendas órgano minerales y el tipo de fertilizante en el porcentaje de NF de albahaca. A. CE= con enmienda; SE= sin enmienda ($F=1,36$ $p=0,26$) B. T=testigo; U= urea; UR= urea recubierta; ($F=5,41$; $p=0,01$). Barras indican los intervalos de confianza para la media (95%). Letras iguales indican que no hay diferencias entre factores (Test de Tukey al 95%).

4.4.8. Efecto de uso de enmiendas órgano minerales en propiedades del suelo sembrado con albahaca

En la Tabla 35 se presenta la incidencia de la aplicación de la enmienda órgano mineral y el tipo de fertilizante en propiedades químicas del suelo después de la cosecha de las plantas. Las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados como la urea y la urea recubierta tienden a bajar el pH debido a la transformación del N en el suelo, especialmente el proceso de nitrificación libera H^+ al medio que contribuye a la acidificación del medio. También, la absorción de N estimula su desarrollo y crecimiento de las plantas demandando mayor cantidad de nutrientes como Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ , cuya extracción del suelo contribuyen a su acidificación. Milosevic *et al.* (2013) encontraron que la aplicación periódica de urea en árboles de albaricoque decreció el pH y crearon desbalances nutricionales en las plantas, además de incrementar la solubilidad de elementos tóxicos como el Mn y el Al.

La aplicación de la enmienda aumentó significativamente el pH del suelo. A mayor aplicación, mayor valor de pH se alcanzó. Este resultado puede deberse a que la bentonita, al tener alta CIC, es capaz de retener mayor cantidad de bases intercambiables e impiden su lixiviación, lo que implica la reducción de pérdida de iones OH^- y el incremento del pH. A pesar de la extracción de nutrientes y de la nitrificación, la retención de cationes mantuvo los pH cercanos a la neutralidad. La presencia del abono orgánico pudo contribuir al aumento del pH ya que es conocido que durante la mineralización de la MOS generalmente se libera amonio y amoniaco, lo cual puede llegar a reducir los niveles de acidez (Li *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2016).

La bentonita, al aumentar el pH del suelo, pudo estimular la hidrólisis de la urea y la nitrificación. Estos procesos pueden llegar a ser los dominantes en comparación con la absorción de N por las plantas (Zaman y Nguyen, 2010). Xu *et al.* (2017) aseguran que, a pesar del carácter alcalino de la bentonita, no es descartable su uso como remediador en suelos neutros y básicos, aunque su aplicación en suelos con pH cercanos a la neutralidad debe realizarse con precaución, puesto que podría elevarlo significativamente. De acuerdo a lo anterior, es

necesario determinar DN y de enmienda adecuadas de aplicación de acuerdo a las características del suelo y las condiciones climáticas.

Tabla 35. Efecto de la aplicación de enmiendas órgano minerales en las propiedades químicas del suelo después de la cosecha de albahaca.

Tratamiento	pH ¹	CE (dS/m) ²	MO (%) ²	CIC (cmol(+)/kg) ²	NTS (%) ³
T	6,15±0,01 b	0,61±0,07 b	2,74±0,22 b	22,07±0,19 c	0,36±0,01 a
U	6,00±0,02 ab	0,83±0,11 b	2,71±0,15 b	22,27±0,43 c	0,40±0,03 a
UR	5,83±0,02 a	0,88±0,12 b	2,64±0,08 b	22,87±0,22 bc	0,38±0,00 a
U75	7,00±0,05 c	0,88±0,08 b	3,27±0,23 ab	25,10±0,59 a	0,38±0,03 a
U50	7,36±0,03 cd	3,63±0,04 a	3,98±0,22 a	26,40±0,51 a	0,38±0,00 a
UR75	6,89±0,02 c	1,13±0,30 b	3,67±0,13 a	24,53±0,43 ab	0,38±0,02 a
UR50	7,23±0,04 d	3,58±0,35 a	4,09±0,19 a	25,17±0,15 a	0,40±0,02 a
F	26,05	30,00	12,01	17,86	0,53
p	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,78

T= testigo; U= urea (100% de la DN de 150 kg/ha); UR= Urea recubierta (100% de la DN de 150 kg/ha); U75= urea (75% de la DN y 25% de enmienda órgano mineral); U50= urea (50% de la DN; 50% de enmienda órgano mineral); UR75= urea recubierta (75% de la DN; 25% de enmienda órgano mineral); UR50= urea recubierta (50% de la DN 50 % de enmienda órgano mineral). Letras diferentes indican diferencias entre tratamientos realizadas por ¹ Test de Dunnett (95%), ² Test de Tukey (95%)

La CE encontrada para todos los tratamientos están catalogadas entre los rangos no salinos a ligeramente salinos de acuerdo a Fernández *et al.* (2006). El testigo obtuvo menor valor de CE debido a su baja cantidad de sales disueltas que posiblemente se vieron disminuidas por las aplicaciones del riego, y por la absorción de cationes y aniones por parte de la planta. Tanto la urea convencional como la urea recubierta obtuvieron 26,5% y 30,7% más de CE con respecto al testigo, pero sin encontrarse diferencias estadísticas con él. La aplicación de la enmienda órgano mineral, incrementó significativamente la CE, produciendo condiciones leves de salinidad. A medida que se aumentó la proporción de la DN, mayor fue el incremento de la salinidad. Las aplicaciones de enmienda junto al fertilizante de liberación lenta aumentaron más la salinidad que cuando se acompañó con urea convencional. Una de las posibles explicaciones es que la urea recubierta además de su aporte de N, aporta iones sulfato al medio que, junto a los componentes propios de la mineralogía de la bentonita, al momento de la meteorización va solubilizando cationes al medio y formando sales.

Es importante considerar el estado nutricional y el pH de los suelos a los que se planea aplicar esta enmienda. Dada la capacidad de aumentar la concentración de sales, se debe tener especial cuidado con su aplicación a suelos donde se tenga algún grado de salinidad o que se encuentre en regiones con déficit de agua, ya que su aplicación en dosis excesivas podría llevar a salinización y degradación de suelos. Similares resultados fueron reportados por Li *et al.* (2012), quienes, al adicionar bentonita a estiércoles de cerdo durante el proceso de compostaje, aumentaron la CE por encima de 4 dS·m⁻¹.

La MOS al cabo del periodo experimental para el tratamiento testigo fue similar al descrito en la caracterización inicial, mostrando la dificultad que se presenta para aumentar los niveles de MOS con el tiempo. La aplicación de los dos fertilizantes (U y UR) presentaron similares valores de MOS que el testigo, dado a que no se hizo ningún aporte de material orgánico. Los aumentos leves pueden deberse a los aportes realizados por las raíces de las plantas que pudieron aumentar momentáneamente dicho valor.

La aplicación de la enmienda órgano mineral aumentó significativamente la MOS en porcentajes entre 16,2% y 33,0%, al final del periodo experimental. Este aumento se debe al aporte de material orgánico que se realizó dentro de la enmienda órgano mineral y a la capacidad de la bentonita de protegerla para retardar el proceso de mineralización de la misma, pudiendo simular el mismo comportamiento de los suelos, al formar complejos órgano-minerales, permitiendo la conservación de la MOS por más tiempo (Turner *et al.*, 2017). Vogel *et al.* (2015) revelaron que el tipo de arcilla presente en el suelo afecta la velocidad de descomposición de la MOS y que la presencia de arcillas montmorillonitas retrasa significativamente la mineralización de la misma. Czaban *et al.* (2013) encontraron que la aplicación constante de bentonita en suelos aumentó la MOS en los primeros 30 cm del perfil, debido a la formación de complejos órgano minerales. Sin embargo, Feng *et al.* (2014) creen

que la estabilidad de la MOS disminuye con la aplicación continua de C al suelo y aseguran que los complejos órgano minerales son resistentes hasta alcanzar el umbral de saturación de C, a partir del cual no habrá aumento de los niveles de MOS. Al analizar el conjunto de los datos por la presencia de enmienda, es posible evidenciar que su aplicación tuvo incidencia significativa en el contenido final de MOS ($F=41,84$; $p < 0,001$), mientras que el tipo de fertilizante no influyó en el contenido de MOS ($F=1,51$; $p = 0,25$).

Los valores de CIC para los tratamientos con fertilizantes solos estuvieron alrededor de $22 \text{ cmol}(+) \cdot \text{kg}^{-1}$, sin diferencias estadísticas con el testigo, puesto que no se adicionó ningún mineral o material orgánico que aportara carga al suelo. La aplicación de la enmienda órgano mineral aumentó significativamente la CIC del suelo brindando mayor capacidad de retención de nutrientes y agua. A mayor dosis de enmienda empleada, mayor fue la CIC hallada al final del periodo experimental, aunque sin diferencias estadísticas entre dosis. En el caso de la urea, su aplicación junto a la enmienda aumentó entre 11,3% y 16,4% la CIC con respecto a la urea sola y el testigo, respectivamente. Igualmente, la aplicación de la enmienda aumentó entre 9,1% y 12,3% la CIC con respecto a la urea recubierta sola y al testigo, respectivamente.

La aplicación de la enmienda órgano mineral tuvo mayor incidencia en el aumento de la CIC ($F=62,64$ $p < 0,001$) que el tipo de fertilizante empleado ($F=3,14$; $p = 0,07$). Desde el punto de vista ambiental, este aumento significativo de CIC contribuye a la retención de humedad y de nutrientes, evitando su pérdida por lixiviación o por volatilización para el caso particular del N. Además, contribuye a la retención de sustancias nocivas, como por ejemplo producto de agroquímicos, evitando su desplazamiento hasta las aguas subterráneas. Como desventaja principal de la aplicación de estas enmiendas es que se debe cuidar el tamaño de partícula, especialmente del mineral de arcilla empleado. Partículas muy finas son contraproducentes para suelos de textura arcillosa, limitando la macroporosidad y por tanto la aireación y el drenaje del suelo. La lixiviación se ve limitada o nula, como ocurrió en la presente investigación, pero se pueden crear ambientes anóxicos, limitando la producción agrícola, lo que hace necesario realizar aflojamientos de la matriz del suelo para evitar el adensamiento y formación de costras en la superficie.

Los porcentajes de NTS estuvieron entre 0,36% y 0,40% catalogadas según Fernández *et al.* (2006) como altos, sin identificar diferencias estadísticas entre tratamientos. Es posible que las diferencias encontradas en los valores con respecto al experimento con estevia obedezcan al menor tiempo experimental, al tipo de planta y factores ambientales propios de cada momento de la experimentación. Czaban *et al.* (2013) encontraron que aumentos significativos en los contenidos de C y N en el suelo se lograron después de 10 años de aplicación constante de bentonita en dosis de $12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, después de la formación de complejos estables formados entre la montmorillonita adicionada y las sustancias húmicas, especialmente huminas presentes en el suelo.

Los valores hallados de NTS estuvieron más altos que los encontrados inicialmente en el suelo, lo cual puede obedecer a los fertilizantes y enmiendas adicionadas y a la presencia de las raíces de la planta que aporta exudados y estimula la actividad microbiana en el área inmediatamente cercana a las raíces. Sin embargo, se debe considerar que el tiempo de cosecha es corto en comparación con otros cultivos, lo que puede llevar a la reducción de la concentración de N, como lo han encontrado Sepaskhah y Barzegar (2010) después de varios experimentos de arroz donde la reducción estuvo por encima del 50%. Estos valores altos indican una residualidad para próximas cosechas y evita el empobrecimiento de los suelos, garantizando la facultad de desarrollar una cobertura en su superficie y así evitar procesos de degradación como la erosión.

El uso de las enmiendas órgano minerales con bentonita no tuvo efecto en el NTS, indicando que posiblemente las pérdidas por volatilización fueron similares para todos los tratamientos y que al final el N asociado a la carga superficial de las arcillas puede ser disponible en el tiempo para la biota del suelo (Turner *et al.*, 2017). Similares resultados fueron reportados por Martins *et al.* (2015), quienes no encontraron diferencias en el total de N perdido por volatilización al utilizar urea y urea + zeolita, y explican este comportamiento a las similares condiciones del suelo y del clima para ambos tratamientos que determinan en mayor grado las pérdidas de N. Estudios realizados por Sepaskhah y Barzegar (2010) en arroz mostraron que a mayor DN aplicado, mayor era

la concentración de N residual en el suelo, siempre y cuando la dosis de zeolita fuera baja y explican que la zeolita funciona como FLL. En el caso de la bentonita, como fue usada junto al lombricompost, más que considerarse un FLL, actuó mejor como protector de la MOS creando condiciones físico químicas adecuadas para mejorar la absorción de nutrientes.

4.4.9. Efecto de la aplicación de enmiendas órgano minerales en la eficiencia de la Fertilización Nitrogenada (FN) en albahaca.

El uso de enmiendas órgano minerales, aumentó la eficiencia agronómica del cultivo de albahaca con respecto a los tratamientos con fertilizantes, pero sin aplicación de enmienda (Figura 58). Es de resaltar, que los tratamientos con el 50% de la DN de fertilizante nitrogenado, fueron los que obtuvieron mayores eficiencias agronómicas, por encima de 20 kg de MF por kg de N aplicado. El tratamiento U50 aumentó en 77,5% y 42,1% los kilogramos de MF por kilogramo de N aplicado con respecto a la U y U75. El tratamiento UR50 incrementó en 72,2% y 39,9% dicha eficiencia en relación a UR y UR75. La eficiencia agronómica alcanzada con el tratamiento U75 estuvo 10,9% por encima de UR50, sin diferencias significativas entre ellos. Los valores hallados estuvieron por encima de los reportados por Berti *et al.* (2000), quienes encontraron eficiencias agronómicas entre 4,1 y 8,2 kg de MF por kg de N absorbido, pero por debajo de las de los cereales, las cuales son mayores a 25 kg de MF por kg de N absorbido en sistemas bien manejados (Dobermann, 2007). El uso de los fertilizantes solos (U y UR) obtuvieron las más bajas eficiencias, por debajo de 6 kg de MF por kg de N aplicado, similar a lo reportado por Milosevic *et al.* (2013), quienes encontraron una eficiencia de 0,67 kg·m⁻² con la aplicación de urea en árboles de albaricoque.

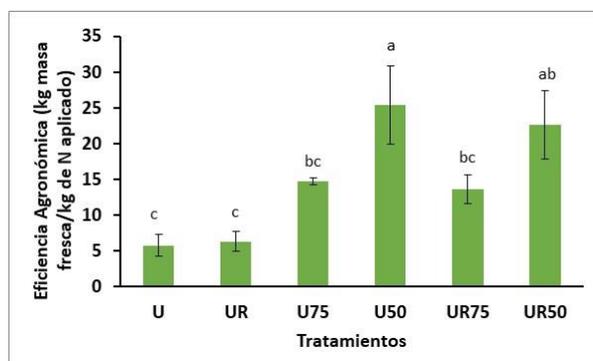


Figura 58. Efecto de uso de enmiendas órgano minerales en la eficiencia agronómica del cultivo de albahaca. U= urea (100% de la DN de 150 kg/ha); UR= Urea recubierta (100% de la DN de 150 kg/ha); U75= urea (75% de la DN y 25% de enmienda órgano mineral); U50= urea (50% de la DN; 50% de enmienda órgano mineral); UR75= urea recubierta (75% de la DN; 25% de enmienda órgano mineral); UR50= urea recubierta (50% de la DN 50% de enmienda órgano mineral). Letras diferentes indican diferencias entre tratamientos realizadas por el Test de Duncan ($p < 0.05$) ($F = 6,47$; $p = 0,004$).

La eficiencia agronómica estuvo mayormente influenciada por la aplicación de la enmienda que por el tipo de fertilizante utilizado (Figura 59A). La aplicación de la enmienda incrementó en 68,4% la eficiencia agronómica, encontrándose diferencias estadísticas entre la ausencia y presencia de la aplicación. El tipo de fertilizante mantuvo las eficiencias agronómicas alrededor de 14,5 kg de MF por kg de N aplicado, sin diferencias estadísticas entre ellos (Figura 59B).

Al igual que lo reportado por Milosevic *et al.* (2013) en árboles de albaricoque, no necesariamente altas concentraciones de N foliar y rendimientos, implica mayor eficiencia. Los autores encontraron que el estiércol de ganado, a pesar de no presentar los mayores rendimientos de biomasa y de frutos, presentó mayores eficiencias en el uso de los nutrientes. Similares resultados fueron reportados por Sepaskhah y Barzegar (2010), al aplicar zeolita y fertilizante nitrogenado en diferentes DN, mostrando que la más baja DN empleada es la que reporta mayor eficiencia agronómica y que el efecto de la zeolita en la eficiencia se presenta después de un largo tiempo de aplicación.

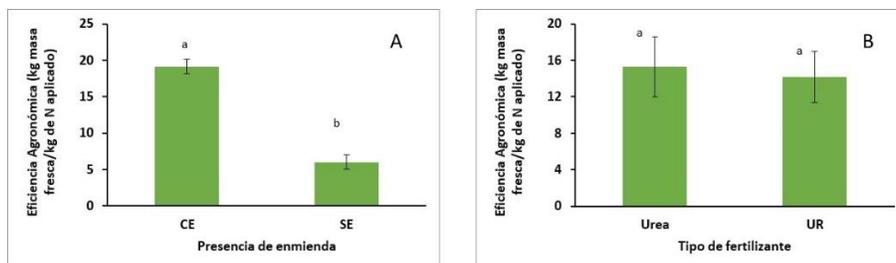


Figura 59. Efecto de la presencia de enmiendas orgánicas y el tipo de fertilizante en la eficiencia agronómica del cultivo de albahaca.

A. CE= con enmienda; SE= sin enmienda; (F=16,28; p=0,001) B. UR= urea recubierta (F=0,07; p=0,80); Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas. Las barras indican el error estándar.

4.4.10. Efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y minerales en el uso eficiente del agua (EUA) en albahaca.

Todos los tratamientos evaluados aumentaron el uso eficiente del agua con respecto al testigo, encontrándose diferencias estadísticas entre tratamientos (Figura 60). Para la producción de la MF, los valores de eficiencia estuvieron entre 2,5 y 4,0 kg·m⁻³ mientras que para la MS estuvieron entre 1,0 y 1,5 kg·m⁻³. La aplicación de fertilizantes sin la enmienda orgánica mineral obtuvo, para la MF valores de 2,92 y 3,5 kg·m⁻³ para UR y urea convencional respectivamente, sin encontrarse diferencias estadísticas con el testigo. Sin embargo, dicha eficiencia estuvo 17,8% y 31,4% por encima de la alcanzada por el suelo sin fertilizar respectivamente.

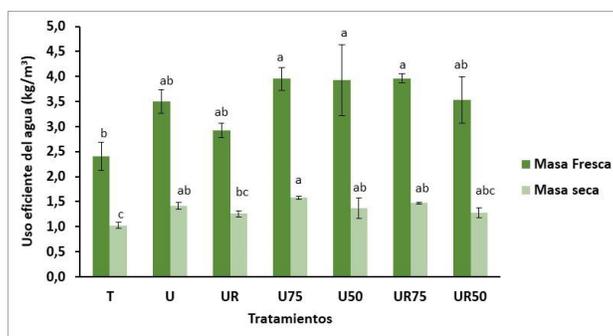


Figura 60. Efecto de uso de enmiendas orgánicas y minerales y el tipo de fertilizante en el uso eficiente del agua en el cultivo de albahaca.

T= testigo; U= urea (100% de la DN de 150 kg/ha); UR= Urea recubierta (100% de la DN de 150 kg/ha); U75= urea (75% de la DN y 25% de enmienda orgánica mineral); U50= urea (50% de la DN; 50% de enmienda orgánica mineral); UR75= urea recubierta (75% de la DN; 25% de enmienda orgánica mineral); UR50= urea recubierta (50% de la DN 50% de enmienda orgánica mineral). Letras diferentes indican diferencias entre tratamientos realizadas por el Test de Tukey. MF (F=2,67; p=0,02); MS (F=3,52; p=0,03). Las barras indican el error estándar.

La aplicación de la enmienda orgánica mineral aumentó significativamente el uso eficiente del agua con respecto al testigo y a los fertilizantes nitrogenados. Los valores hallados estuvieron entre 3,5 y 4,0 kg·m⁻³ aumentando entre 32% y 39% la eficiencia del uso de agua con respecto a T. La aplicación de las enmiendas orgánicas minerales reducen la densidad aparente y aumentan la capacidad de retención de humedad, haciendo más eficiente el uso del agua (Gholamhosein *et al.*, (2013). Hazrati *et al.*, (2017) en aloe vera, encontraron que a mayor dosis de zeolita (8 g por kg de suelo), mayor fue la eficiencia en el uso del agua la cual estuvo alrededor de 22 kg de MF por m³ regando al 60% de la CC. Estas eficiencias son mucho más altas que las encontradas para las aromáticas, debido a que aloe vera es una planta de tipo CAM que se caracteriza por ser eficiente en el uso del agua, mientras que la albahaca y la estevia son de tipo C3. Sepaskhah y Barzegar (2010) encontraron eficiencias de uso de agua en arroz del orden de 0,22 kg·m⁻³ aún con la aplicación de 8 kg·ha⁻¹ de zeolita y 80 kg·ha⁻¹ de N, muy por debajo de las halladas en el presente trabajo.

Para el caso de la urea convencional (U), la aplicación de la enmienda orgánica mineral aumentó la eficiencia en el uso del agua en aproximadamente 11%, con respecto a la aplicación del 100% de la DN del fertilizante. Vale

la pena resaltar que la enmienda contribuyó a la retención de amonio, lo que se vio reflejado en la producción de biomasa a pesar de que la DN fue reducida. Sin embargo, no se encontraron diferencias entre U75 y U50, lo que permite deducir que en la producción de biomasa fresca es posible reducir la DN en un 50% sin tener repercusiones en la producción.

El uso de enmiendas órgano minerales fue aún más significativo con el fertilizante de liberación lenta. La aplicación de la enmienda aumentó 17,3% y 26,3% la eficiencia del uso del agua con respecto al uso de fertilizante sólo. A pesar de que la liberación del N en estos fertilizantes se realiza de forma gradual, la enmienda pudo contribuir con la retención de amonio y agua para favorecer la absorción por parte de la planta y aumentar la producción de biomasa fresca. Además, el abono orgánico permite aumentar la retención de humedad al elevar la CIC.

La producción de biomasa seca se vio favorecida por la aplicación de abonos nitrogenados y enmiendas órgano-minerales. Los tratamientos con urea lograron mejores resultados que los alcanzados con UR. Sin embargo, los aumentos no fueron tan altos como los conseguidos para la MF. El tratamiento U75 obtuvo eficiencias en el uso de agua del orden de 35,4%, 10,8% y 13,3% más altos con respecto a T, U y U50, respectivamente. Para el caso de la urea recubierta, UR75 obtuvo un aumento de 30,6%, 14,3% y 6,8% comparado con T, UR y UR50 en su orden correspondiente.

La aplicación de la enmienda órgano mineral tuvo mayor incidencia que el tipo de fertilizante en el uso eficiente del agua, en MF y MS de albahaca (Figura 61A). Los tratamientos con la enmienda aumentaron en 23% y 14% la eficiencia del uso del agua para la obtención de MF y MS, respectivamente. La efectividad en el uso del agua por parte de las enmiendas órgano minerales se debe a dos factores principalmente: al papel del lombricompost en la retención de humedad y al papel de la bentonita en la retención de nutrientes necesario para el aumento de la biomasa (Gholamhosein *et al.*, 2013). Este aumento en la capacidad de retención realizada por la bentonita también puede estar relacionado con cambios texturales, debido a las dosis empleadas. Czaban *et al.* (2013) encontraron que la aplicación de bentonita en dosis de 12 kg·m⁻² aumentó tres veces el contenido de partículas de tamaño arcilla (< 0,002 mm), en los primeros 30 cm. Este aumento repercute tanto en la retención, puesto que el principal componente de la bentonita es la montmorillonita, mineral de arcilla 2:1 con alta CIC, como en el movimiento de agua y solutos en la matriz del suelo, al presentarse taponamiento de poros por parte de las partículas de este tamaño.

El uso de fertilizantes nitrogenados de rápida y lenta liberación aumentaron en 36,7% y 30,8% respectivamente los kilogramos de MF por m³ de agua aplicado, con respecto al suelo sin fertilizante (Figura 61B). También dichos fertilizantes aumentaron en 29,7% y 23,9% respectivamente, la MS por m³ de agua aplicado.

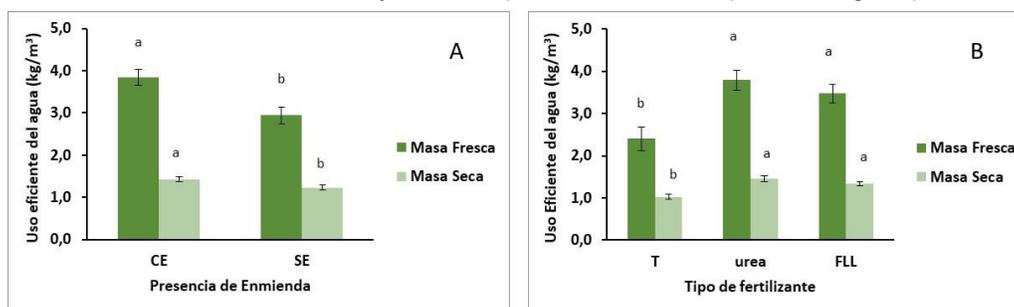


Figura 61. Efecto de la presencia de enmiendas órgano minerales y el tipo de fertilizante en el uso eficiente del agua del cultivo de albahaca.

A. CE= con enmienda; SE= sin enmienda; MF (F=10,33 p=0.01); Masa seca (F=4,76; p=0,04) B. T=testigo; FLL= urea de liberación lenta; MF (F=2,67; p=0.06); MS (F=3,52; p=0,03). Las barras indican el error estándar.

4.5. CONCLUSIONES

En el experimento sin planta, la aplicación de abonos orgánicos sea sola o junto a la enmienda órgano-mineral generó lixiviación debido a los cambios estructurales ocasionados por el componente orgánico, que aumentaron la porosidad de drenaje, donde la gallinaza generó más lixiviación que el lombricompost. A su vez, el uso de altas láminas de riego aplicadas, generó mayor movimiento de agua en el suelo, y por lo tanto se generó lixiviación.

En los experimentos con planta, tanto en estevia como en albahaca, no se presentaron lixivitaciones debido al empleo de volúmenes de riego más bajos, calculados a partir de los K_c , y a prácticas culturales como la escarificación y el método de aplicación que evitaron la formación de flujos preferentes. Además, la aplicación de enmiendas órgano minerales contribuyeron a la retención de agua.

La aplicación de enmiendas órgano minerales mejoró algunas propiedades del suelo al cabo de cuatro meses como el contenido de MOS, la CICE y la concentración de K^+ en el suelo. Las enmiendas con lombricompost resultaron mejor, al presentar menos lixiviación y mejor comportamiento en las propiedades del suelo. La cantidad de enmienda con mejores resultados conseguidos fue utilizando $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

La aplicación de enmiendas órgano minerales no tuvieron repercusión en la AP de estevia, pero si en las variables de producción como porcentaje de MS y rendimiento y en la absorción del N. Los resultados fueron independientes del tipo de abono empleado (urea convencional y urea recubierta), así como de la proporción de la enmienda empleada. En cuanto a las propiedades del suelo, la aplicación de enmiendas logró aumentar significativamente la CIC, aunque las demás propiedades permanecieron igual al suelo sin ninguna aplicación. Las eficiencias de la FN en estevia se vieron afectadas positivamente por la aplicación de las enmiendas órgano minerales, donde el empleo del 50% de la DN del fertilizante acompañada por una mayor proporción de enmienda, fueron las más altas. De igual manera, el tipo de abono y el empleo de las enmiendas órgano mineral mejoró la eficiencia del uso del agua, donde la urea recubierta resultó mejor en este indicador, aumentando la eficiencia en 2,5% en promedio.

Para el caso de la albahaca, la aplicación de las enmiendas órgano minerales tuvieron positivo efecto en los rendimientos de hoja, donde el empleo del 75% de la DN junto a la proporción de enmienda fue el que consiguió mayores valores, independiente del tipo de abono. La absorción de N por la planta se vio mejorada por la aplicación de la urea recubierta, ya sea sola o acompañada de la enmienda órgano mineral.

Las propiedades del suelo después de la cosecha de la albahaca se vieron afectadas tanto por el tipo de abono empleado como por la enmienda órgano mineral. Los valores de pH, CE, MOS y CIC se incrementaron a medida que se aumentó la dosis de enmienda órgano mineral, mientras que el contenido de NTS permaneció igual al suelo sin ninguna aplicación, con un efecto residual para las siguientes cosechas. La mayor eficiencia agronómica y el mejor uso del agua se obtuvieron con el uso del 50% de la DN junto a la enmienda órgano mineral, independiente del tipo de fertilizante utilizado.

5. USO DE CONSORCIOS DIAZÓTROFOS (CD) PROVENIENTES DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS MUNICIPALES (STARDM) EN LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA (FN) DE ESTEVIA (*Stevia rebaudiana* B.) Y ALBAHACA (*Ocimum basilicum* L.)

En el presente capítulo se muestra los resultados de la investigación relacionados con la aplicación de cd a los cultivos de estevia y albahaca como estrategia para reducir la fertilización nitrogenada. Se inicia con una presentación de contexto del uso de la FBN en la agricultura, seguidamente se muestra los materiales y métodos empleados, realizando la descripción de los tratamientos evaluados. Posteriormente se dan a conocer los resultados y su discusión para finalizar con las conclusiones obtenidas.

5.1. INTRODUCCIÓN

La disminución del uso de fertilizantes nitrogenados y agroquímicos es considerada como una alternativa directa a la mitigación del cambio climático (Stuart *et al.*, 2014). Recientemente se ha fortalecido un enfoque en el marco de sostenibilidad bajo el término de agroecología. La agroecología propone un cambio en los modelos de producción en los cuales se disminuya el impacto de aplicación de agroquímicos sintéticos y se favorecen los procesos biológicos. Mejorar la eficiencia del uso de nutrientes ha implicado el desarrollo de técnicas de agricultura de precisión, estudios de biodiversidad, gestión integral del suelo, selección de plantas más eficientes, y la investigación del ciclo de nutrientes asociado a los microorganismos. Las bacterias y los hongos pueden ser capaces de desempeñar un papel importante para mejorar el uso de nutrientes. La biotecnología se ha considerado un elemento clave para el desarrollo de procesos alternativos en países pobres (Sanabria, 2014)

La inoculación de las plantas con bacterias benéficas se remonta a finales del siglo XIX. Los agricultores sabían por experiencia que cuando se mezclaba suelo en donde se habían cultivado leguminosas con semillas de otra clase de cultivos, los rendimientos de este eran mayores de lo acostumbrado, de ahí han provenido las prácticas más comunes de aplicación de inoculantes a semillas o directamente al suelo. La producción y venta de los inoculantes microbiano inició en 1895, cuando Nobbe y Hiltner recibieron la primera patente para la aplicación de cultivos puros de *Rhizobium* en leguminosas, de lo cual se desprende el primer producto comercial "Nitragin" en Estados Unidos (Puepke 2005). Sin embargo, hasta comienzos de los 90 la tecnología fue incipiente. Los Estados Unidos y Brasil han aplicado estos productos para la producción de la soya (*Bradyrhizobium japonicum* y *B. elkanii*.) siendo los dos mayores productores en el mundo de esta leguminosa (FAO, 2018). Los inoculantes rizobiales están bien establecidos como producto agrícola para las leguminosas, con formulaciones conocidas como Novozyme's TAGTEAM® (*Rhizobium*, *Penicillium bilaii*). Es claro que los nuevos productos a partir microorganismos de vida libre serán un tema frecuente de investigación en los próximos años.

Existen diversas investigaciones en uso de bacterias fijadoras asimbióticas de N en diferentes cultivos (Tabla 36). Las bacterias diazótrofes *Azospirillum sp*, *Bacillus sp* y *Pseudomonas sp* son los géneros más mencionados en los reportes de investigación (Pérez Montaña *et al.*, 2014). La mayoría de los estudios realizados utilizando *Azospirillum sp* (86,7%) han sido en cereales, especialmente en maíz (Díaz-Zorita *et al.*, 2015). Algunas de ellas muestran buen comportamiento como complemento de la FN, pero aún se presenta limitaciones, ya que no siempre es consistente la respuesta a la inoculación. La respuesta en producción a la inoculación es exitosa en un 70% de los experimentos, siendo esto una limitante para su uso a nivel comercial (Díaz-Zorita *et al.*, 2015). De acuerdo con Ozturk *et al.* (2003), cuando existe alta disponibilidad en el suelo de N para las plantas, la acción de las bacterias fijadoras se ve limitada. Frente a estas limitaciones, las investigaciones más recientes muestran la posibilidad del uso de bacterias diazótrofes en combinación con fertilizantes en DN apropiadas brindando la posibilidad de obtener buenos rendimientos agrícolas (Kennedy *et al.*, 2004) a partir de estudios de mecanismos bacteriales de protección de la nitrógenasa de la acción del oxígeno molecular.

Son escasas las publicaciones que han reportado el estudio de FBN en los STARDM. La FBN en aguas residuales provenientes de la industria del papel es la más reportada, donde las clases alfa proteobacterias y betaprotobacterias son las dominantes (Bowers *et al.*, 2008) y los géneros representativos son *Aeromonas sp*, *Pseudomonas sp* y *Bacillus sp* (Addison y McDonald, 2010). Estos hallazgos concuerdan con los resultados reportados por Ferrera y Sanchez (2016) quienes además indicaron la presencia de *bacteroidetes sp*, *acidobacterias sp*, *Verrucomicrobia sp*, *Planctomycetes sp*, *Nitrospirae sp*, *Cyanobacteria sp*, *TM7*, *Gemmatimonadetes sp*. Chen *et al.* (2017) indican que la composición del afluente, los parámetros de operación de los sistemas y las condiciones ambientales como la temperatura, son factores determinantes en la estructura de la comunidad microbiana en los STARDM.

La composición microbiana no es uniforme en todos los componentes del sistema de tratamiento de aguas residuales. Bai *et al.* (2014) reportaron diferencias entre la composición de la comunidad microbiana encontrada entre el suelo de la rizosfera de las plantas acuáticas y el agua, donde los genes relacionados con la FBN fueron más abundantes en el primero, debido a que la FBN es frecuente encontrarla en asociaciones con plantas angiospermas. Pérez *et al.* (2011) encontraron CD asimbióticos en lodos de STARDM capaces de realizar la FBN en presencia de NH_4^+ , lo cual pueden resultar en una alternativa interesante para ser evaluada en los suelos agrícolas como complemento a la FN. Dicha capacidad es similar a la reportada para *Azotobacter diazotrophicus*, la cual puede fijar N aún con elevados niveles de nitrato, debido a la ausencia de la actividad asimilatoria de la nitrato-reductasa, la cual puede permitir combinar la FBN con la FN y la mitad del N fijado puede excretarlo al medio (Sánchez *et al.*, 2006).

Puesto que en la rizosfera es el sitio propicio para la búsqueda de microorganismos potenciales para su posterior escalamiento e introducción como inoculantes benéficos para los cultivos, se realizaron análisis microbiológicos previos a lodos rizosféricos de plantas acuáticas utilizadas en el tratamiento de aguas residuales domésticas de la planta de tratamiento de Ginebra (Valle del Cauca), y se encontraron bacterias de los géneros *cloroflexi*, *flavobacteroides*, *fermicutes*, así como también *Cyanobacterias* (información sin publicar). Martínez *et al.* (2014) encontraron que el uso de estos CD provenientes de lodos rizosféricos de STARDM dieron lugar a resultados agronómicos similares a los alcanzados con bacterias comerciales de *Azotobacter spp* con la misma DN utilizada, pero inferiores a los conseguidos con fertilizantes inorgánicos en un cultivo de cilantro. Bajo este contexto, es importante continuar con la investigación de estos CD provenientes de STARDM y explorar su potencial uso para el reemplazo o el complemento de la FN en cultivos agrícolas, y en especial, como alternativa a los sistemas productivos de plantas aromáticas.

5.2. OBJETIVO

Evaluar el uso potencial de bacterias fijadoras de N provenientes de STARDM, en la reducción de la FN de sistemas productivos de estevia (*Stevia rebaudiana B*) y albahaca (*Ocimum basilicum*).

5.3. MATERIALES Y MÉTODOS

5.3.1. Localización

Los experimentos se realizaron entre agosto de 2016 y febrero de 2017, en los invernaderos del Laboratorio de Aguas y Suelos Agrícolas LASA de la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR) de la Universidad del Valle. En el exterior, los valores de temperatura y precipitación promedio mensual durante el periodo experimental fueron de 25 °C y 2,1 mm respectivamente.

5.3.2. Descripción del suelo

El suelo utilizado provino del mismo sitio de los experimentos anteriores cuyas principales características físico químicas se encuentran en la Tabla 27.

Tabla 36. Experiencias en fijación asimbiótica de N en sistemas productivos.

Bacterias	Cultivo	Resultado relevante	observaciones	Fuente
<i>Azotobacter sp</i> y <i>Azospirillum sp</i>	Plátano, pastos, maíz y rastrojo	Producción de amonio entre 0,9 y 5,2 mg l ⁻¹	No fueron combinadas con fertilizante	Lara <i>et al.</i> (2007)
<i>Azotobacter vinelandii</i>	Manglar y patilla	Buen crecimiento de la planta y protección mayor a fitopatógenos	No midieron el N foliar ni en el suelo	Galindo <i>et al.</i> (2006)
<i>Azospirillum sp</i> , <i>azotobacter sp</i> , <i>herbaspirillum sp</i> , <i>gluconacetobacter sp</i> , <i>diazotrophicus sp</i> y <i>Burkholderia sp</i>	Eucalipto	La actividad bacteriana no cambia en épocas secas y lluviosas. <i>Herbaspirillum</i> es endofito. <i>Azotobacter</i> es la más fijadora de N.	No midieron N en suelo y planta ni variables agronómicas de plantas.	Obando <i>et al.</i> (2010)
<i>Azotobacter nigricans</i>	Estevia	La aplicación con biofertilizante obtuvo mayor concentración de glucósidos y biomasa	No compararon con la fertilización convencional para comparar rendimientos. Ni midieron N foliar	Borda-Molina <i>et al.</i> (2009)
<i>Azospirillum sp</i>	Pasto Guinea	Población un poco mayor en época de lluvia que en sequía; tolera estrés hídrico; se encontraron más en las hojas que en raíces y rizósfera;	No compararon con la fertilización convencional para comparar rendimientos. Ni midieron N foliar	Cárdenas <i>et al.</i> (2010)
<i>Azotobacter sp</i> ; <i>Azospirillum sp</i>	Arroz	<i>Azotobacter</i> crece mejor con las DN que <i>azospirillum</i> (50% de la DN de 250 kg·ha ⁻¹)		Vallejo <i>et al.</i> (2008)
<i>Azotobacter sp</i> , <i>Azospirillum sp</i>	Caña de azúcar	Mejor rendimiento fue con bacterias y el 100% de la DN	No evaluaron abonos orgánicos	Castilla <i>et al.</i> (2009)
<i>Azotobacter sp</i>	Pasto Angleton	Las plantas de semillas inoculadas presentaron mayor contenido de N foliar	Sin combinación con fertilizante inorgánico	Mantilla y Oviedo, (2007)
<i>Azospirillum brasilense</i>	Maíz	Promovió la germinación de semilla y el crecimiento de maíz	Fue usado como fitoestimulante y no como suministro de N	Cassan <i>et al.</i> (2009)
<i>Serratia liquefaciens</i>	Maíz	Se utilizó como biofertilizante e incrementó en un 14% la cosecha	Sin combinación con fertilizante inorgánico	Lalande <i>et al.</i> (1989)
<i>Azotobacter sp</i>	Trigo	Se utilizó como biofertilizante aplicado convencionalmente y aplicado dentro de un biofilm, siendo esta última tecnología la que garantizó la mejor adaptación de la bacteria a la rizósfera de la planta	Solo evaluaron la capacidad de inoculación. No se midió MS ni cosecha.	Swarnalakshmi <i>et al.</i> (2013)
<i>Azospirillum sp</i> y <i>Pseudomonas sp</i>	Canola	Fueron utilizadas como bacterias promotoras del crecimiento en suelos salinos	Evaluaron la capacidad de germinación de las semillas. No se midió MS ni cosecha.	Baniaghil <i>et al.</i> (2013)
<i>Azospirillum lipofefum</i>	Pasto guinea	Mayor rendimientos de MS que el testigo pero menores que con fertilización convencional	No se realizó combinación de bacterias con fertilizantes nitrogenados	Ojeda <i>et al.</i> (2016)
<i>Azospirillum brasilense</i>	trigo	Las mejores respuestas agronómicas fueron alcanzadas con la combinación de fertilizante nitrogenado (80 kg·ha ⁻¹) e inoculación con bacterias		Alamri y Mostafa (2009)
<i>Azotobacter sp</i> y <i>Chroococcum sp</i>	Papa criolla	Se utilizó como biofertilizante junto al 50% de la DN de fertilizante nitrogenado y obtuvo cosechas iguales a las halladas con fertilizante convencional	Se utilizó junto a otros microorganismos como los solubilizadores de fósforo	Faccini <i>et al.</i> (2007)
<i>Pseudomonas sp</i> , <i>Azotobacter sp</i> y <i>Azospirillum sp</i>	Tomate	Cuando fueron usadas las tres bacterias al tiempo los rendimientos agronómicos fueron mayores que si se usan cada una por aparte	No se usaron junto a fertilizantes nitrogenados	Ahirwar <i>et al.</i> (2015)

5.3.3. Caracterización del Consorcio Diazótrofo (CD)

El CD utilizado como inóculo provino de muestreo de agua y lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Ginebra (Valle del Cauca) y fue caracterizado en el Laboratorio de Microbiología Ambiental de la Universidad del Valle. A la muestra se le realizó la extracción del ADN por medio de un kit para aislamiento de ADN (PowerSoil® DNA isolation kit), el cual cuenta con remoción de inhibidores de la Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR por sus siglas en inglés). La calidad de la extracción del ADN fue verificada por medio de espectrofotometría, a una longitud de onda de 260 nm.

A la muestra de ADN extraída se le aplicó por triplicado la técnica de PCR, con el fin de identificar la presencia del gen *nifH* responsable de la FBN. Para esto, se empleó un termociclador (Labnet Gradient Thermal Cycler MultiGene) y los primers y nucleótidos propuestos por Poly *et al.* (2001) para la amplificación del gen *nifH*. Los resultados hallados en la PCR del gen *nifH* demostraron la existencia de la nitrogenasa reductasa.

La cultivabilidad de bacterias se realizó utilizando un medio compuesto por carbohidratos, sales y oligoelementos (Tabla 37). Debido a la presencia de trazas de amonio y otros compuestos nitrogenados, fue necesario realizar repetidas inoculaciones en medios sólidos y líquidos libres de N, para asegurar el crecimiento de organismos capaces de realizar FBN atmosférico a amonio. Los ensayos de cultivabilidad demostraron que el gen *nifH*, estuvo activo en estos organismos.

Tabla 37. Composición del sustrato usado para la cultivabilidad de bacterias provenientes de STARMD.

Compuesto	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	K ₂ HPO ₄	MgSO ₄ ·7H ₂ O	NaCl	CaSO ₄ ·2H ₂ O	CaCO ₃	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	MnSO ₄ ·4H ₂ O	FeSO ₄ ·7H ₂ O
Cantidad (g L ⁻¹)	5	0,5	0,2	0,2	0,2	5	0,002	0,002	0,005

El enriquecimiento se realizó disponiendo 200 mL de inóculo en bioreactores tipo Batch secuenciados en mezcla completa, los cuales consistieron en botellas de 1000 mL con 400 mL de medio nutriente igual al utilizado en la cultivabilidad. Los reactores fueron aireados a 200 rpm con un caudal de aire de 4 L·h⁻¹ y mantenidos por 67 días a una temperatura de 30 ± 2 °C. Se efectuaron monitoreos cada 24 horas al comportamiento de la biomasa, por medio de la concentración de proteínas en la mezcla, y al consumo de sustrato, por medio de la concentración de carbohidratos, amonio, nitrito y nitrato, además del pH en el sobrenadante. Las concentraciones promedio de amonio, nitrito y nitrato fueron de 8,27, 1,39 y 8,45 g·mL⁻¹ respectivamente.

Se realizó la cuantificación de bacterias fijadoras de N a partir de la cultivabilidad del inóculo en Agar de eosina y azul de metileno (EMB por sus siglas en inglés), el cual es específico para enterobacterias diazótrofes Gram negativas que estaban en consorcio con fijadoras de N, encontrándose 9,2 x 10⁷ unidades formadoras de colonia (UFC). Dentro de los géneros fijadores de N reconocidos estuvieron *Clostridium sp*, *Beijerinckia sp*, *Azomonas sp*, *Rhizobium sp*, *Xanthobacter sp*, *Brevundimonas sp*, *Pseudoxanthomonas sp*, *Azospirillum sp*, *Pleomorphomonas sp* y *Propionibacterium sp*.

5.3.4. Diseño experimental

Se planteó un diseño unifactorial completo al azar para cada cultivo (Figura 62). Se establecieron 6 tratamientos con tres y cinco repeticiones para los cultivos de estevia y albahaca respectivamente, para un total en su orden de 18 y 30 unidades experimentales. Cada unidad experimental consistió en una matera con capacidad de tres kilogramos, donde se dispuso el suelo previamente tamizado a un tamaño de 2 mm. Los tratamientos propuestos fueron: testigo (T) sin ninguna aplicación de fertilizante nitrogenado, fertilizante industrial (FI) el cual fue urea (46% de N) con una DN de 150 kg·ha⁻¹ (100% de la DN requerida por el cultivo, drc), CD en dosis de 0,05 mL por unidad experimental siguiendo las recomendaciones de Martínez *et al.* (2014), CD + 75% de la drc (CD75), CD + 50% de la drc (CD50) y CD + 25% de la drc (CD25). Las unidades experimentales fueron dispuestas a una distancia de 30 cm entre materas y se contó con plantas alrededor para eliminar el efecto de

borde. La estevia fue cosechada a los 87 ddt, y la albahaca fue cosechada a los 74 ddt cuando todos los tratamientos iniciaron floración.

Como variables de respuesta se midieron la AP, la MS de la parte aérea y NF siguiendo los lineamientos descritos en el capítulo 3. En el suelo se midieron las siguientes variables explicatorias: pH, CE, la MOS y NTS (IGAC, 2006).



Figura 62. Montaje experimental para la evaluación de CD provenientes de STARDM para estevia (A) y albahaca (B)

5.3.5. Establecimiento del cultivo

La estevia variedad “morita” fue sembrada por esquejes, los cuales fueron traídos del municipio de Ricaurte (Cundinamarca). La siembra se realizó en un sustrato compuesto por abono orgánico y turba donde se dispuso cada esqueje. Luego de 35 días de germinación, cada planta fue trasplantada a una unidad experimental con suelo. Por su lado, la albahaca variedad “genovesa morada” fue sembrada en un sustrato de turba y fue trasplantada a cada unidad experimental cuando alcanzó 12 cm de AP (40 días).

El cálculo de la lámina de riego se realizó teniendo en cuenta los Kc reportados en el capítulo 1 y la evaporación medida en un tanque evaporímetro tipo A, instalado dentro del invernadero, el cual fue calibrado como se mostró en capítulos anteriores. Los volúmenes de riego para estevia estuvieron entre 14 y 116 mL por materia, y para albahaca estuvieron entre 5,5 y 58,8 mL. El agua aplicada fue hervida y enfriada para evitar que la presencia del cloro afectara la población microbiana aplicada.

Se realizaron podas de formación tanto a la estevia como a la albahaca y se realizó control biológico de plagas semanalmente mediante la fumigación foliar de una infusión de ajo. En el caso de la estevia fue necesario realizar fumigaciones cada 15 días con fungicida y bactericida de origen biológico, cuyo ingrediente activo fue la kasugamicina. El control de arvenses se realizó manualmente.

La dosis del CD fue calculada a partir de la dosis recomendada por un productor de biofertilizante a base de *Azotobacter* spp ($15 \text{ L} \cdot \text{ha}^{-1}$), siguiendo las recomendaciones de Martínez *et al.* (2014) (Ecuación 7).

Ecuación 7. Cálculo del volumen de aplicación de CD.

Volumen del CD a aplicar = $1,1 \times (\text{volumen a aplicar de } Azotobacter \text{ sp} \times \text{UFC } Azotobacter \text{ sp}) / \text{UFC del CD}$

A todos los tratamientos de los dos cultivos se les aplicó $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de P_2O_5 (0,26 mL por unidad experimental) usando ácido fosfórico y $150 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de K_2O (0,33 g por unidad experimental) usando sulfato de potasio. Estos fertilizantes fueron aplicados disueltos en el volumen de riego dos días antes del trasplante.

5.3.6. Análisis Estadístico

La verificación de la distribución normal de los datos se hizo siguiendo la prueba de Shapiro Wilk y la homogeneidad de varianzas se determinó con la prueba de Levene. Se realizó un análisis estadístico descriptivo y análisis de varianza de una vía para determinar diferencias significativas entre tratamientos. Para las variables que siguieron distribución normal y tuvieron varianzas homogéneas se realizó un análisis de postanova (Test de Tukey al 95% de confiabilidad). Para el caso de las variables que no obtuvieron homogeneidad de varianza se realizó la comparación de medias mediante la prueba de Dunnett con una confiabilidad del 95%. Se utilizó el programa estadístico IBM SPSS Statistics 20.

5.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.4.1. Efecto de la aplicación del Consorcio Diazótrofo (CD) en propiedades agronómicas de estevia.

Los resultados de AP, porcentaje de MS y NF se muestran en la Tabla 38. Las AP estuvieron entre 54,3 y 103,8 cm correspondientes a los tratamientos CD50 y FI respectivamente, con diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. Los valores más altos correspondieron a los tratamientos FI y CD sin diferencias estadísticas entre ellos (C.V.= 26,5%), indicando que tanto el fertilizante nitrogenado como el CD aportaron N suficiente para promover el crecimiento de la planta. Estos valores de AP fueron similares a los reportados por Gusqui *et al.* (2010) (60 cm) y Salgado (2013) (57,8 cm), cuyos cultivos de estevia fueron cultivados al aire libre y menores a los reportados por Kumar *et al.* (2013) (113 cm) quienes decapitaron los ápices para mayor estimulación de crecimiento. El suministro de N por parte de la urea (FI) brindó mayor N disponible, el cual fue aprovechado fácilmente por la planta, mientras que el testigo y el tratamiento CD50 presentaron los menores valores lo que posiblemente se deba a deficiencia de N disponible en el suelo. En otros cultivos como arroz (Castilla, 2006b) y algodón (Lozano *et al.*, 2006) la inoculación con diazótrofos y FN por debajo del 100% de su DN, tampoco han tenido efecto en el crecimiento de la planta.

Tabla 38. Efecto de la aplicación de CD provenientes de STARDM en propiedades agronómicas de estevia.

Tratamiento	AP (cm)	MS (%)	NF (%)	NF (kg ha ⁻¹)
T	56.3±6.41c	24.77±0.42 a	1,31±0.05 c	8,79±1,13 bc
FI	103,8±1.87a	34.08±3.60 a	1,95±0,10 ab	8,02±0,71 bc
CD	94.60±3.98ab	25.61±0.62 a	1,93±0,02 ab	11,54±0,22 ab
CD75	83.77±5.14b	22.68±1.55 a	2,12±0,11 a	12 86±1 18 a
CD50	54.3±3.12c	27.40±2.76 a	2,01±0,01 ab	3 67±0 62 d
CD25	83.57±7.62b	22.32±0.62 a	1,88±0,05 b	5 43±0 51cd
F	15,72	2,34	17,02	18 39
P	<0,001	0,11	<0,001	<0,001

NF = Nitrógeno foliar. Promedio de tres repeticiones ± error estándar. Letras iguales indican que no hay diferencias entre tratamientos. Postanova realizada con el Test de Tukey (p<0,05). T= Testigo; FI = fertilizante industrial 100% de la DN (150 kg ha⁻¹); CD = Consorcio diazótrofo; CD75= consorcio diazótrofo + 75% de la DN; CD50= consorcio diazótrofo + 50% de la DN; CD25= consorcio diazótrofo + 25% de la DN.

El CD funcionó como complemento de la FN en la estimulación del crecimiento de la planta de estevia puesto que sus AP fueron mayores que T. La respuesta del crecimiento de las plantas ante la aplicación de CD pudo deberse no solamente al suministro de N, sino también a la estimulación en la producción de fitohormonas de crecimiento que este tipo de microorganismos pueden realizar (Cassan y Díaz, 2016). A pesar de que Martínez *et al.* (2014) aseguraron que este CD tienen la capacidad para fijar N en presencia de altas concentraciones de amonio, los resultados parecen indicar que la aplicación de fertilizante nitrogenado pudo inhibir dicha FBN y retrasar el suministro de N a la planta. Los valores de AP de los CD + FI fueron menores que los alcanzados por el CD solo. Otra explicación puede ser la ocurrencia de fenómenos de inmovilización del N debido a mayor cantidad de N disponible en el suelo suministrado por la FBN, que pudo conllevar a un aumento de la actividad microbiana, reduciendo la disponibilidad de N para las plantas en el momento oportuno y dejando reservas para su uso posterior como se puede apreciar en los contenidos de NTS al final del ciclo del cultivo. La aplicación de

CD pudo ayudar a proteger las plantas contra fitopatógenos, que pese a realizar su control, pudo afectar negativamente el crecimiento.

El uso de CD junto al fertilizante nitrogenado aumentó en un 32% la AP con respecto al testigo, mientras que el CD aplicado sin fertilizante la aumentó en 40,5%. Sarathambal *et al.* (2015) también encontraron que con la aplicación de diazótrofos (*Enterobacter sp*, *Klebsiella sp* y *Serratia sp*) consiguieron un aumento de AP entre 14% y 17% más de crecimiento en cultivos de arroz, y manifestaron que la respuesta al crecimiento de la planta con dicha aplicación se debió a la FBN para mantener la fertilidad del medio y a la protección contra el ataque de fitopatógenos del suelo.

No se encontraron diferencias estadísticas entre tratamientos para la variable MS. Los porcentajes estuvieron por debajo de los encontrados en experimentos anteriores, debido al ataque de hongos en las hojas ocurrido hacia los 30 ddt que, a pesar de haber sido controlado, pudo afectar la producción de biomasa en todos los tratamientos. El porcentaje de MS decreció al reducir la DN de FI, y el CD no logró ni reducir ni sustituir la FI. Los porcentajes hallados muestran similitud a los entregados por Zetina *et al.* (2014) quienes obtuvieron valores de MS por debajo de los hallados, entre 3,28 y 9,15 g·planta⁻¹ con aplicaciones de 350 mg·kg⁻¹. Los resultados obtenidos son diferentes de los hallados por Borda-Molina *et al.* (2009), quienes alcanzaron 15% más de MS con la aplicación de *Azotobacter nigricans* y adjudican dicho resultado al suministro de N y a la producción de hormonas, que se reflejó en la acumulación de glucósidos en las hojas. No se encontraron diferencias en el porcentaje de MS entre los tratamientos con CD usados como complemento a la FN (C.V.= 6,5%). Los resultados del porcentaje de MS sumados a los de NF sugieren que las diferencias pudieron deberse a deficiencia de nutrientes diferentes al N, ya que los microorganismos también son demandantes de estos nutrientes, y es posible que su consumo comprometiera la disponibilidad para la planta.

Los porcentajes de NF estuvieron por debajo de 2%, con excepción de CD75 el cual obtuvo el mayor porcentaje (2,12%), sin diferencias estadísticas con FI, CD y CD50 (Tabla 40). De acuerdo con Osorio (2014), los contenidos de NF en general para las plantas son del orden entre 2% y 6%. Borda-Molina *et al.* (2011) han reportado contenidos de NF para estevia entre 1,92% y 2,20%, valores similares a los de Salgado (2013) quien encontró valores entre 1,8% y 2,8%. Todos los tratamientos fueron estadísticamente distintos del testigo, indicando que tanto el FI como el CD suministraron N, el cual fue aprovechado por la planta. El CD junto al FI facilitó la absorción de N. La aplicación de CD pudo bajar la FN hasta un 50% de la DN recomendada, sin afectar la absorción de N por la planta. El tratamiento CD25, presentó menor valor que CD75, lo que podría indicar que el suministro de fertilizante fue insuficiente y que el consorcio no logró suplir esa demanda. En el caso de CD75, muestra que la combinación del fertilizante y el CD pudieron facilitar la absorción de N.

5.4.2. Efecto de la aplicación de Consorcio Diazótrofo (CD) en propiedades del suelo de estevia.

Los valores promedio para las propiedades del suelo se presentan en la Tabla 39. Luego de la cosecha, el suelo presentó valores de pH por debajo del inicial, mostrando que la absorción de nutrientes como el Ca y Mg por parte de la planta y posiblemente el lavado de bases a capas inferiores del suelo, pudieron contribuir a la acidificación del suelo. Los tratamientos con urea fueron los que más bajaron el pH, donde a mayor DN de fertilizante, mayor fue la acidez alcanzada al cabo del tiempo. La aplicación de FI fue la responsable de la acidificación, mientras que el CD no promovió el descenso del pH. La urea en su proceso de nitrificación desprende iones H⁺ acidificando el medio (Osorio, 2014). El testigo fue el que obtuvo el mayor valor de pH sin diferencia significativa con los tratamientos CD, CD50 y CD25. Los tratamientos acompañados por CD amortiguaron la acidificación del suelo, donde CD25 tuvo mayor pH que CD75. A pesar de que el producto de la FBN son los iones amonio que siguen el proceso de nitrificación, dicho proceso es más lento que en el caso de la urea, haciendo que la acidificación sea más leve.

Altas aplicaciones de N pueden estimular la actividad microbiana y el crecimiento de la planta, aumentando la demanda de bases intercambiables, lo que permitiría la acidificación del suelo (Osorio, 2014). Sin embargo, el aporte del CD pudo aumentar la biomasa al cabo del tiempo que, al mineralizarse, liberó cationes al medio que

no permitieron la reducción brusca del pH. A pesar del decrecimiento alcanzado, los valores de pH estuvieron dentro de los rangos óptimos para la absorción de nutrientes por las plantas en todos los tratamientos, lo que está relacionado con los contenidos de NF alcanzados.

Tabla 39. Efecto de la aplicación de CD provenientes de STARDM en propiedades del suelo cultivado con estevia.

Tratamiento	pH*	CE (dS·m ⁻¹)	MOS (%)	NTS (%)
T	6.43±0.04c	0,50±0,04c	3,23±0,20 a	0,16±0,02 b
FI	5.96±0.08a	0,88±0,07 a	3,78±0,07 a	0,22±0,04 ab
CD	6.34±0.05bc	0,50±0,01c	3,36±0,08 a	0,25±0,02 a
CD75	6.07±0.04ab	0,74±0,08 ab	3,78±0,44 a	0,24±0,01 a
CD50	6.13±0.06abc	0,70±0,05 ab	3,40±0,20 a	0,18±0,02 ab
CD25	6.22 ±0.02bc	0,63±0,06bc	3,56±0,10 a	0,15±0,02 b
F	7.22	6,31	1,09	9.62
p	0.00	0,00	0,42	0,00

*promedio de la concentración de hidrógenos. CE = conductividad eléctrica; MOS = Materia orgánica del suelo; NTS = Nitrógeno total del suelo. Promedio ± error estándar. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas entre tratamientos determinadas por la prueba de Tukey (p<0,05). T= Testigo; FI = fertilizante industrial 100% de la DN (150 kg·ha⁻¹); CD = Consorcio diazotrofo; CD75= consorcio diazotrofo + 75% de la DN; CD50= consorcio diazotrofo + 50% de la DN; CD25= consorcio diazotrofo + 25% de la DN.

La CE aumentó en todos los tratamientos con respecto a su valor inicial, y osciló entre 0,50 y 0,88 dS·m⁻¹ correspondientes a los tratamientos T y FI respectivamente. Los tratamientos con urea (FI, CD75 y CD50) fueron los que presentaron los mayores valores de CE y mostraron diferencias estadísticas con los demás tratamientos. Las diferencias entre estos tratamientos pueden ser explicadas por la difusión de elementos hacia la zona radicular, ocasionada por una mayor actividad microbiana, la cual es estimulada por la adición del fertilizante. Esta actividad microbiana acelerada pudo permitir mayor producción de CO₂ que, al reaccionar con el amoníaco producto del proceso de amonificación, incrementó la producción de NH₄⁺. A mayor DN de urea empleada, mayor fue el valor de CE alcanzado.

El CD obtuvo un valor de CE similar al testigo, por lo que el efecto en la CE es atribuido más al efecto del FI que a la aplicación de los microorganismos. Es posible que el CD traslade el amonio producto de la FBN directamente a la planta en pequeñas cantidades, no permitiendo la estimulación microbiana como si lo hace el FI. La FBN está determinada por diversos factores como la humedad del suelo y la disponibilidad de formas asimilables de N (Blasco y Burbano, 2015). En primera instancia los microorganismos realizan la FBN para suplir sus propias necesidades. Una vez que se presente excesos de N en su metabolismo, son excretados al suelo, dejando este N a disposición de plantas y otros microorganismos. Bajo este contexto, es posible que la realización de aplicaciones de CD con mayor tiempo de anterioridad a la siembra, pueda alcanzar comportamientos similares en estas variables del suelo que el FI.

La diferencia con la CE inicial del suelo radica en el muestreo realizado para la prueba, ya que inicialmente se extrajo el suelo de la finca y se hizo un cuarteo analizándolo en conjunto, mientras que para los tratamientos, el suelo utilizado de la unidad experimental tuvo influencia de las raíces de las plantas. La aplicación de fertilizantes, así como los exudados de las plantas contribuyen a la fertilidad del suelo aumentando la concentración salina. La aplicación de la urea aumentó la CE del suelo, siendo este aumento directamente proporcional a las DN utilizadas. El suministro de N, aumentó la actividad microbiana y la mineralización de la MOS, aumentando la disponibilidad de cationes y aniones en el suelo. El CD, a pesar de la FBN, no aumentó el contenido de sales en el suelo, lo que podría indicar suministros limitados de N en el ciclo del cultivo que fue aprovechado por la planta, dejando menos disponibilidad en la rizósfera y por tanto reduciendo la difusión de nutrientes. Los tratamientos con CD junto a la aplicación de fertilizante nitrogenado mostraron valores de CE intermedios entre el FI y el testigo, mostrando posiblemente aumento de biomasa microbiana, lo que implica mayor demanda de nutrientes, dejando el suelo con menor concentración de sales, al final del ciclo del cultivo.

Es posible que la adaptabilidad de estos CD se afecte por el tipo de suelo y por los exudados rizosféricos del cultivo. Sánchez *et al.* (2006) reportaron que existen diferencias significativas entre especies rizosféricas en la utilización de aminoácidos para su crecimiento y su efecto sobre la FBN, y encontraron que el crecimiento de *Azospirillum brasilense* se ve limitado en presencia de glutamato, aspartato, serina o histidina como fuente de

carbón y/o N, mientras que *A. lipoferum* estimula su crecimiento con estos aminoácidos. También la concentración en el suelo de metales como el hierro, molibdeno y vanadio, en especial a pH neutros a básicos como los utilizados en la presente investigación, puede favorecer la acción de los CD.

La MOS se incrementó con respecto al valor inicial del suelo, lo cual pudo deberse al efecto de la planta, ya que la presencia de raicillas y exudados, además de la biomasa microbiana, aumentan el porcentaje de MOS. Según Bolaños y Castilla (2006), del 100% del carbono total que es transportado de la parte aérea de la planta, 30% está en la biomasa de las raíces; del 70% restante, 20% es liberado como CO₂ en la respiración de las raíces y 50% de C orgánico es cedido al suelo.

Los valores finales de MOS estuvieron entre 3,23% y 3,78% correspondientes a T y CD75 respectivamente, sin diferencias estadísticas entre tratamientos (C.V.= 10,8%). Sin embargo, los resultados indicaron una tendencia al incremento de la MOS con el aumento de la DN de FI, valores que pueden ser debidos al aumento de biomasa microbiana. Este aumento de la MOS es también atribuible al corto tiempo de medición de las variables, ya que es posible que, al pasar del tiempo, estos niveles de MOS vuelvan a los valores iniciales del suelo, o su aumento sea mínimo, puesto que la biomasa microbiana aportada o generada por la estimulación, es material orgánico fácilmente mineralizable que se agota rápidamente, como ha sido demostrado con la aplicación de abonos orgánicos en trabajos de investigación más largos (Peñarete *et al.*, 2012). Bolaños y Castilla (2006a) afirman que la rizodeposición, es decir, la cantidad total de carbono que llega a la raíz, puede aumentar la tasa de reciclaje del carbono, aumentando la actividad microbiana y generando el Efecto Priming, es decir, reducción de la MOS nativa del suelo. Aplicaciones excesivas de microorganismos pueden conducir a que se presente este mismo efecto. Vale la pena resaltar que la aplicación de CD en las DN utilizadas, no ocasionó Efecto Priming en el suelo, no redujo la MOS nativa del suelo, sino por el contrario la incrementó ligeramente.

El NTS estuvo entre 0,16% y 0,25% correspondiente a T y CD respectivamente, con diferencias estadísticas entre tratamientos. El T obtuvo valor similar al inicial, sin diferencias con FI, CD50 y CD25. El CD obtuvo mayor valor de NTS, similar a CD75, CD50 y FI. A medida que decreció la DN, el valor final de NTS también decreció, debido a que a menor DN, se reduce la concentración de N en el suelo en el tiempo, si la biomasa producida es cosechada. El CD dejó la mayor cantidad de N, que puede ser utilizado para próximas cosechas, lo que implica que, en el siguiente ciclo del cultivo, la DN sea menor. Con base a estos resultados, es posible decir que el CD suministró el N a la planta, como se aprecia en el NTS y en NF, así como en el crecimiento de la planta, pero no estimuló la absorción de otros nutrientes necesarios para conseguir altos rendimientos, como lo demuestra el bajo valor de MS con respecto a FI.

5.4.3. Efecto de la aplicación del Consorcio Diazótrofo (CD) en propiedades agronómicas de albahaca.

Los tratamientos con aplicación de CD no tuvieron efecto en las propiedades agronómicas de la planta de albahaca (Tabla 40). Las AP estuvieron entre 62,0 y 68,0 cm correspondientes a los tratamientos CD50 y FI respectivamente, sin encontrarse diferencias entre tratamientos (C.V.= 10,7%). Estas AP estuvieron por encima de los hallados en los anteriores experimentos donde se usaron fertilizantes de liberación rápida y lenta. Similares resultados fueron encontrados por Yepes *et al.* (2016), quienes aseguran que la AP no fue afectada por la DN suministrada. La ausencia de diferencias en el crecimiento vegetal generada por efecto de distintas DN en albahaca, sugiere que el desarrollo de esta especie vegetal es independiente a la cantidad de N aplicado. Sin embargo, las AP alcanzadas estuvieron por encima de las reportadas por otros estudios donde se utilizaron diferentes tipos de fertilizantes como compost (14 -37 cm) (Ledesma *et al.*, 2013), CD (20 – 36 cm) (González 2013), soluciones nutritivas de relación amonio/nitrato igual a 20/80 (50 – 58,3 cm) (González *et al.*, 2009) y combinación de abono orgánico y fertilizante (65 – 79 cm) (Pandey *et al.*, 2016).

Tabla 40. Efecto de la aplicación de CD provenientes de lodos rizosféricos de plantas usadas en STARDM en propiedades agronómicas de albahaca.

Tratamientos	AP (cm)	Diámetro (mm)	Porcentaje de MS	NF (%)	NF (kg·ha ⁻¹)
T	67,4±4,4 a	3,94±0,16 a	41,33±2,91 a	0,46±0,05 d	6,49 c
FI	68,0±1,67 a	3,80±0,11 a	40,68±1,55 a	1,81±0,09 c	28,01 b
CD	66,1±3,93 a	3,78±0,15 a	41,55±2,54 a	2,13±0,13 abc	30,13 b
CD75	63,9±2,52 a	3,78±0,16 a	42,53±1,40 a	2,04±0,07 bc	37,50 a
CD50	62,0±2,59 a	4,02±0,13 a	44,02±1,77 a	2,21±0,05 ab	31,39 ab
CD25	63,1±2,64 a	3,76±0,13 a	39,31±2,65 a	2,44±0,11 a	29,52 b
F	0,83	0,56	0,53	64,35	49,9
p	0,54	0,73	0,75	<0,001	<0,001

NF = nitrógeno foliar; Promedio ± error estándar. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas entre tratamientos determinadas por la prueba de Tukey ($p < 0,05$). T= Testigo; FI = fertilizante industrial 100% de la DN (150 kg·ha⁻¹); CD = Consorcio diazotrofo; CD75= consorcio diazotrofo + 75% de la DN; CD50= consorcio diazotrofo + 50% de la DN; CD25= consorcio diazotrofo + 25% de la DN.

Los diámetros del tallo estuvieron entre 3,76 y 4,02 mm, correspondientes a los tratamientos CD25 y CD50 respectivamente sin diferencias estadísticas entre tratamientos. Los tratamientos no tuvieron efecto en el diámetro de las plantas, resultados coherentes con los encontrados en los experimentos anteriores. Estos valores estuvieron por encima de los reportados por Guerrero (2008), cuyos diámetros fueron menores a 2 mm. Sin embargo, los valores no alcanzaron los diámetros obtenidos en el experimento con abonos de liberación lenta (5,3 – 6,6 mm) (capítulo 2). Huito (2016) tampoco encontró diferencias significativas en los diámetros de tallo, cuyo promedio fue de 6,1 mm, al aplicar diferentes dosis de biofertilizantes en albahaca variedad Nufar. Estas diferencias de diámetro con los hallados en la presente investigación, pueden deberse a diferencias genotípicas entre las especies utilizadas, condiciones de humedad y temperatura, al tipo de fertilizante empleado y a la hora del día a la cual se realizó la medición, ya que este parámetro está asociado con el estrés hídrico (Florez *et al.*, 2007).

Los porcentajes de MS estuvieron entre 39,31% y 44,02% correspondientes a CD25 y CD50 en su orden, pero sin diferencias estadísticas entre tratamientos. Estos porcentajes están por encima de los reportados en los experimentos anteriores realizados con fertilizantes convencionales, FLL y abonos orgánicos. También los valores estuvieron por encima de los hallados por Genoz *et al.* (2005) quienes encontraron el mayor porcentaje de MS de 25,6%, al utilizar DN de 75 kg·ha⁻¹ y en DN más altas, los porcentajes se fueron reduciendo. Los altos valores conseguidos pueden deberse a la alta fertilidad del suelo y a bajos requerimientos nutricionales de la albahaca. Los mayores valores fueron alcanzados por los tratamientos que incluyeron el CD, ya sea usado como única fuente de suministro de N o como complemento a la FN. Los tratamientos CD75 y CD50 obtuvieron 2,82% y 6,11% más de porcentaje de MS que el testigo respectivamente.

En cuanto al NF, los valores estuvieron entre 1,5% y 2,5% con excepción de T cuyo valor estuvo por debajo de 0,5% encontrándose diferencias estadísticas entre tratamientos. El más bajo nivel perteneció a T, mientras que los valores más altos fueron alcanzados por los tratamientos que contenían el CD, con concentraciones mayores a 2%. En los tratamientos que utilizaron la combinación de CD y FI, se encontró que a mayor DN de FI, menor fue el porcentaje de NF alcanzado, lo que podría indicar que, a mayores concentraciones de N, se puede inhibir la FBN. Los valores alcanzados estuvieron por encima de los hallados en los anteriores experimentos, cuando se utilizó fertilizantes convencionales, FLL y abonos orgánicos. De acuerdo con Alarcón (2013), la variedad genovesa presenta una concentración promedio de NF de 2,4% en su etapa de madurez, por lo que los resultados hallados estarían dentro del rango. El FI obtuvo menor porcentaje que los tratamientos con CD, indicando que la aplicación de los microorganismos tuvo efecto positivo en la absorción de N por parte de la planta. De acuerdo con Cassan y Díaz (2016), las bacterias diazotróficas pueden promover de forma directa el crecimiento de la planta, puesto que favorece la solubilización de minerales y la producción de fitohormonas estimuladoras del crecimiento y desarrollo de la planta.

La toma de N en kg ha⁻¹ por parte de la albahaca estuvo entre 6,49 y 37,5 kg·ha⁻¹ correspondientes a T y CD75, con diferencias estadísticas entre tratamientos. El tratamiento CD75 favoreció la toma de N por la planta en un 83%, 25% y 20% con respecto a T, FI y CD, respectivamente. Los tratamientos que utilizaron CD con FI fueron los que obtuvieron mejor resultado. Mayores resultados fueron alcanzados por Sarathambal *et al.* (2015) cuya toma de N por plantas de arroz estuvieron entre 52,68 y 78,5 kg·ha⁻¹ cuando inocularon con bacterias diazótrofes sin adición de fertilizante químico.

5.4.4. Efecto de la aplicación de Consorcios Diazótrofes (CD) en propiedades del suelo cultivado con albahaca.

Los resultados de la caracterización final del suelo son resumidos en la Tabla 41. Los valores de pH estuvieron entre 6,1 y 6,4 indicando que el suelo quedó ligeramente ácido después de la cosecha, similares al encontrado al inicio del experimento. La aplicación de FI acidificó el suelo ligeramente mientras que los tratamientos con el CD no lo hicieron. Esta reducción del pH pudo deberse al proceso de nitrificación que tiene lugar en el suelo, cuya transformación de amonio a nitrato, expulsa hidrogeniones al medio que lo acidifican. La aplicación de CD, mantuvo los valores de pH similares a T, mientras que las combinaciones CD +FI acidificaron el suelo. Estos resultados indican que la presencia de N fácilmente mineralizable, bajan los potenciales de hidrógeno del suelo por el mismo proceso de mineralización o por la estimulación de absorción de las bases del suelo.

Tabla 41. Efecto de la aplicación de CD provenientes de STARDM en propiedades del suelo cultivado con albahaca.

Tratamiento	pH*	C.E. (dS m ⁻¹)*	MOS (%)	NTS (%)
T	6,40±0,02 b	0,36±0,02 ab	2,62±0,16 a	0,76±0,04 ab
FI	6,18± 0,08a	0,41±0,03 a	2,74±0,11 a	0,96±0,10 a
CD	6,43±0,02b	0,37±0,02 ab	2,76±0,12 a	0,85±0,11 ab
CD75	6,28±0,02ab	0,42±0,01 a	2,91±0,32 a	0,59±0,06 b
CD50	6,34±0,02b	0,37±0,03 ab	2,76±0,06 a	0,74±0,09 ab
CD25	6,42±0,03b	0,33±0,01 b	2,70±0,07 a	0,74±0,09 ab
F	3,34	2,29	0,32	2,13
p	0,02	0,08	0,89	0,01

CE = conductividad eléctrica; MOS = Materia orgánica del suelo; NTS = Nitrógeno total del suelo. Promedio ± error estándar. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas entre tratamientos determinadas por la prueba de Tukey (p<0,05). * Prueba de Dunnett con el 95% de confianza. T= Testigo; FI = fertilizante industrial 100% de la DN (150 kg ha⁻¹); CD = Consorcio diazótrofo; CD75= consorcio diazótrofo + 75% de la DN; CD50= consorcio diazótrofo + 50% de la DN; CD25= consorcio diazótrofo + 25% de la DN.

La CE estuvo entre 0,33 y 0,42 dS·m⁻¹ valores bajos propios de los suelos no salinos (Fernández *et al.*, 2006). Solamente se encontraron diferencias estadísticas entre FI y CD75 con CD25, mostrando que posiblemente a mayor dosis de fertilizante, se incrementó la CE. Los valores encontrados al final del ciclo del cultivo fueron similares al tratamiento testigo. No obstante, los valores hallados resultaron ser más altos que los presentados inicialmente en el suelo. Esto puede deberse a la concentración de nutrientes que se tiene en la zona radicular debido a los fenómenos de transporte de solutos hacia la planta y porque las muestras de suelo fueron extraídas de allí. Bolaños y Castilla (2006) aseguran que la cantidad de nutrientes como el N que está en contacto con las raíces de las plantas es pequeña en comparación con sus necesidades y por esta razón el flujo de masa y la difusión son los procesos más importantes. Las raíces al absorber nutrientes del suelo adyacente crean las condiciones para que exista difusión.

Para la MOS, los valores variaron entre 2,62% y 2,91%, sin diferencias estadísticas entre tratamientos (C.V.= 13,5%), ni con el valor inicial del suelo. A pesar del aporte orgánico por parte de CD, la biomasa orgánica al cabo de los 74 ddt no incrementó la MOS. Es conocido que un aumento significativo de la MOS ocurre cuando se suministran material de alta C/N, difícil de descomponer, con cantidades de lignina que puede dar origen al humus en el suelo. Este proceso está directamente relacionado con los factores de formación de suelos como la mineralogía, el relieve, la biota y el tiempo. En este caso, la biomasa microbiana contribuyó a incrementar los niveles de MOS, pero por espacios de tiempo más cortos volviendo a los valores iniciales del suelo. De acuerdo con Castilla (2006a), las bacterias del género *Azotobacter* sp se multiplican rápidamente en el suelo y pueden favorecer la solubilidad y mineralización de la materia orgánica agregada como abono. El CD en las DN utilizadas no disminuyeron la MOS, lo que evita la pérdida de estabilidad estructural y desequilibrios ecológicos

en las poblaciones rizosféricas, como si suele suceder con el uso inadecuado de caldos microbiales como práctica de fertilización biológica (Burbano, 2006). En otras palabras, las DN utilizadas no ocasionaron “Efecto Priming” en el suelo.

Los valores de NTS estuvieron más altos a los iniciales en el suelo, los valores medidos variaron entre 0,59% y 0,96%, correspondientes a CD75 y FI respectivamente. No se encontraron diferencias estadísticas entre FI y CD. El CD, como complemento a la FN, logró mantener los valores de pH ligeramente ácidos, en los cuales la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes fue mayor. También aumentó la concentración de sales nutritivas, que se manifestó en el aumento de la CE, reduciendo hasta un 50% la DN del fertilizante inorgánico.

A pesar de que la aplicación de CD no aumentó la MOS, los niveles de NTS se incrementaron con respecto al valor inicial encontrado en la caracterización del suelo, lo que supone mayor disponibilidad de N para la cosecha siguiente. Algunas plantas aromáticas pueden jugar un rol importante en la actividad biológica del suelo relacionado con el ciclo del N. Chen *et al.* (2014) encontraron que las plantas de albahaca sembradas como cultivo intercalado con frutales, tenía un efecto positivo en la acumulación de N en el suelo, incrementándolo hasta en un 25,6% con respecto a los cultivos limpios, debido al aumento de dos enzimas importantes en el ciclo del N: la proteasa y la ureasa. Este aumento de la actividad enzimática obedece a la proliferación de microorganismos fijadores, nitrificantes y denitrificantes y está relacionado con el aumento del N orgánico total del suelo, debido al litter y a los exudados emanados por las raíces de la albahaca, los cuales son ricos en aceites y en metabolitos secundarios. Burbano (2006) afirma que no es aplicando microorganismos como se espera beneficiar a las plantas cultivadas, sino se debe considerar siempre la trilogía planta-suelo-microorganismos. No obstante, es posible que una de las limitaciones de estos CD es la falta de transferencia total de N fijado a la planta, como sucede con otros diazotófos como *Azospirillum* sp (Sánchez *et al.*, 2006).

5.5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos sugirieron que la aplicación del CD para el cultivo de estevia debe realizarse con mayor anterioridad a la siembra o trasplante. La CE respalda este resultado, puesto que el fertilizante industrial obtuvo el mayor valor, indicando mayor difusión y por tanto concentración de aniones y cationes en la zona de raíces, lo que se vio reflejado en un mayor porcentaje de MS. El CD mantuvo el pH similar al testigo y presentó el menor valor de CE, indicando menor disponibilidad de nutrientes para la planta, lo cual se reflejó en el porcentaje de MS.

Para el cultivo de albahaca, la aplicación del CD no tuvo incidencia en la AP ni en el porcentaje de MS alcanzado, pero sí en la concentración de NF. Este resultado es de suma importancia, ya que esta alta concentración de N está directamente relacionada con la generación de aceites y extractos aromáticos muy apetecidos en el mercado. El uso de CD no acidificó el suelo, y mantuvo la CE similar al fertilizante industrial. No incrementó la MOS, pero logró dejar una reserva de N que puede ser utilizada por las próximas cosechas (efecto residual).

El uso del CD jugó un importante rol en la toma del N como se pudo observar en el porcentaje de NF de ambos cultivos. El efecto benéfico de la aplicación del CD a los dos cultivos pudo deberse al mantenimiento de la fertilidad del suelo, a la protección contra fitopatógenos, a la habilidad para disolver minerales ricos en P y Zn y promover su absorción, estimular la producción de fitohormonas como auxinas y giberelinas y favorecer la toma del Fe^{+3} , elemento importante en la nutrición de las plantas.

6. PLAN DE MANEJO INTEGRAL PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA (FN) Y LA REDUCCIÓN DE LIXIVIACIÓN DE NITRATOS EN LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS DE *Stevia rebaudiana* B. y *Ocimum basilicum* L.

En este capítulo se muestra el desarrollo de la investigación en torno a la integración de las estrategias evaluadas en los capítulos anteriores para diseñar un plan integral para optimizar la fertilización nitrogenada y reducir el NL. En este capítulo se muestra en primer lugar un análisis de los resultados de información relacionada con el uso de estrategias para aumentar la eficiencia de la FN y reducir el NL, se describe la metodología empleada para el estudio de las estrategias, se muestran los resultados y discusión, se plantea una propuesta de plan para el manejo de la FN para cada cultivo y se finaliza con las conclusiones obtenidas.

6.1. INTRODUCCIÓN

La FN requiere de un manejo integral que permita al agricultor obtener buenos rendimientos y mayores ingresos, pero al mismo tiempo que sea amigable con el ambiente, evitando la degradación del agua, el aire y el suelo. Son diversas las estrategias que se han estudiado para conseguir dicho propósito a nivel global, donde la mayoría ha brindado resultados positivos.

Se realizó un muestreo de 150 artículos publicados en revistas científicas que muestran diferentes estrategias para prevenir o reducir el NL y aumentar la eficiencia de la FN en diferentes cultivos (anexo 20). La búsqueda se realizó a través de la base de datos de Science Direct, Scielo, Redalyc y Scopus, buscando con las palabras claves "lixiviación", "FN", "eficiencia" y "contaminación por N". La selección de artículos se realizó considerando el desarrollo de diseños experimentales, donde se evaluó la(s) estrategia(s) en particular y se mostró la medición directa de la lixiviación, el rendimiento o cosecha y la absorción de N por la planta. No se consideraron artículos de modelación de resultados.

Los artículos consultados fueron publicados entre el 2002 y 2016, donde más del 50% estuvieron entre los años 2012 y 2015 (59%) (Figura 63). De este muestreo se encontró que los países con más publicaciones en el manejo del N en la agricultura son China (36), seguido de México (15), España (11), USA (7), India (7) e Iran (6) (Figura 64). Al clasificarlos por continentes se tiene que 39% de las investigaciones han sido desarrolladas en Asia, 27% en Europa, 21% en Latinoamérica, 7% en Norteamérica, 4% en Oceanía y 2% en África.

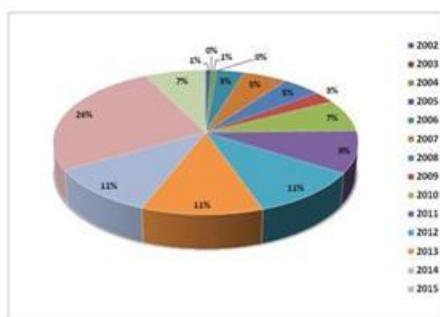


Figura 63. Porcentaje de publicaciones clasificadas por año relacionadas con la lixiviación de nitratos y la FN de cultivos.

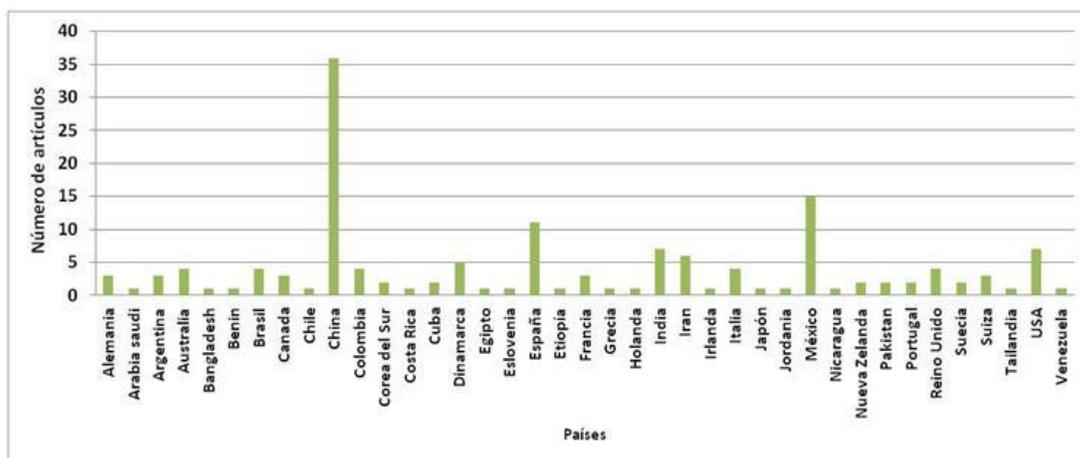


Figura 64. Artículos relacionados con NL y la FN por país.

Las publicaciones consultadas fueron resultados de investigaciones en varios cultivos (Figura 65). La mayoría de las investigaciones se hicieron en un cultivo en particular; sin embargo, algunos artículos muestran resultados de varios ciclos de producción en diversos cultivos de cereales, no especificados, por lo que se agrupo bajo el ítem “cereales”. La mayoría de artículos muestran resultados en cultivos de maíz (26), sin cultivo (13), trigo (9), pastos (7) y arroz (6)

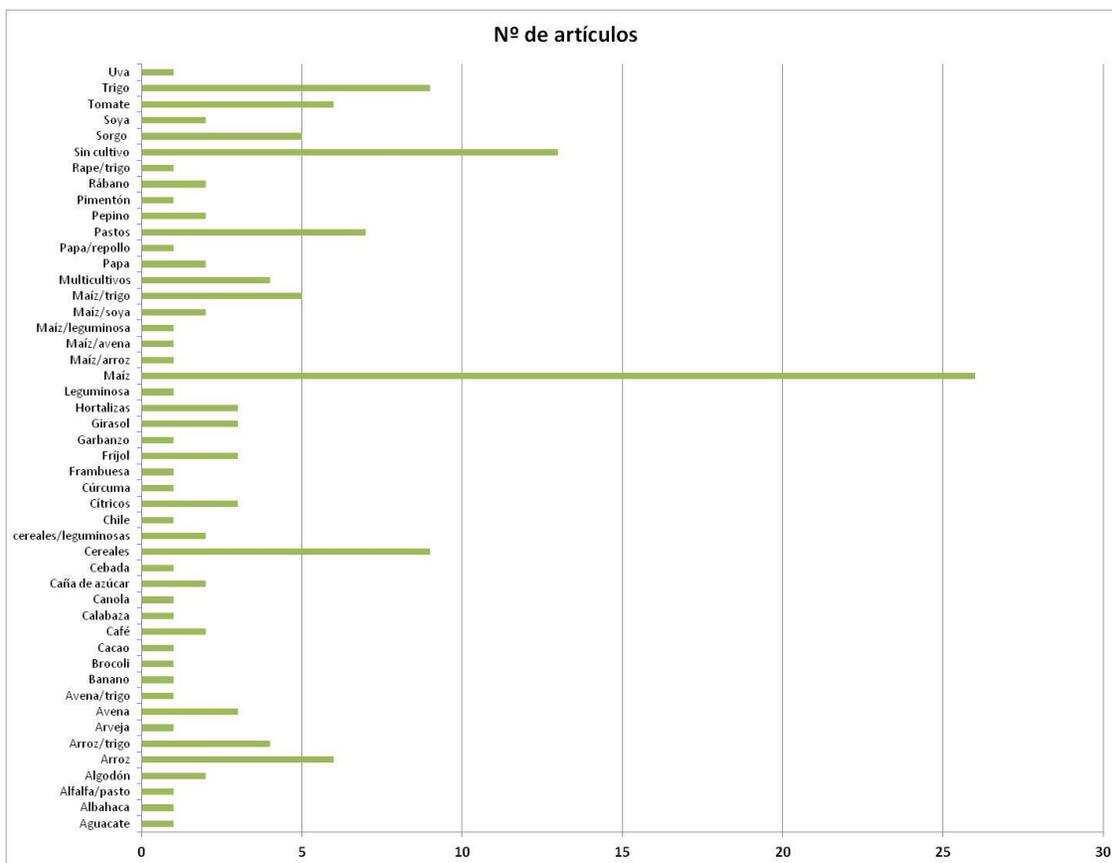


Figura 65. Artículos relacionados con NL y la FN por cultivo.

Las plantas más estudiadas en la dinámica del N son los cereales (51%), seguido de hortalizas (13%), leguminosas (6%), gramíneas (6%), frutales (6%) y condimentarias (1%); algunos artículos no trabajan con

cultivo (9%), y otros trabajaron con otros cultivos como algodón, café, girasol, canola (8%). La mayoría de las investigaciones fueron llevadas a cabo en campo en parcelas experimentales y cultivos comerciales (71%), en LD (9%), en materas (9%), en laboratorio (8%) y en suelo bajo invernadero (3%).

De las publicaciones consultadas, el 59% midieron el comportamiento del NL, de las cuales el 50% obtuvo resultados positivos, es decir, lograron reducir la lixiviación con la aplicación de una o más estrategias, el 43% obtuvieron resultados negativos y 7% no tuvieron resultados significativos. De estas investigaciones, el 60% también mostraron resultados agronómicos, el 32% estudiaron las propiedades químicas del suelo al final del experimento, el 17% consideraron las emisiones de N a la atmósfera y sólo el 3% tuvieron en cuenta el uso eficiente del agua.

El 73% de las publicaciones tuvieron en cuenta la respuesta agronómica de la planta ante las diversas estrategias para el manejo de la FN. De estas investigaciones, el 50% consideraron el NL, el 36% midieron propiedades del suelo al final del experimento, 10% tuvieron en cuenta las emisiones de N a la atmósfera y sólo el 7% mostraron resultados relacionados con el uso eficiente del agua.

La Tabla 42 resume las estrategias encontradas en las publicaciones para mejorar la eficiencia de la FN y reducir el NL en diversos cultivos. Las estrategias más estudiadas son la evaluación de la dosis, el uso de abonos orgánicos, la rotación de cultivos, la utilización de láminas de riego apropiadas y los tipos de labranza. Sin embargo, se encontraron estrategias que pueden traer beneficios a los sistemas productivos y que han ido tomando auge como uso de: coberturas (residuos de cosecha o plásticas), tipos de fertilizantes convencionales de acuerdo a condiciones de suelo y cultivo, métodos de riego más eficientes, microorganismos diazotófos, abonos verdes, FLLs y cultivos asociados con diferentes sistemas de raíz. También se encontraron estrategias poco usuales pero que mostraron resultados favorables como el uso de micorrizas, la frecuencia de aplicación de láminas de riego, la localización del fertilizante en los surcos, el uso de enmiendas órgano-minerales, la disposición de sistemas de drenaje y el uso de plaguicidas y cal. Las estrategias más estudiadas en los cereales son la determinación de DN apropiadas, el empleo de abonos orgánicos y la rotación de cultivos; en los frutales son la DN, el método y lámina de riego y el uso de microorganismos diazotófos; en las gramíneas la DN y los abonos orgánicos; en las hortalizas la DN, la lámina de riego y la rotación de cultivos; en las condimentarias el uso de abonos orgánicos, y en los otros cultivos la DN, la lámina de riego y el tipo de fertilizante convencional.

Al mostrar los resultados por regiones, se puede apreciar que en Asia los estudios se centraron en la DN, el empleo de abonos orgánicos y el cálculo de adecuadas láminas de riego, debido a los altos índices de contaminación y baja disponibilidad de su recurso hídrico. En Europa se siguen investigaciones referentes al empleo de abonos orgánicos, a la determinación de adecuadas DN y a la rotación de cultivos, debido a la estricta reglamentación de la Unión Europea con respecto al manejo de los recursos agua y suelo. En Latinoamérica, las investigaciones se centraron en el cálculo de DN e identificación de fertilizantes apropiados, así como el uso de microorganismos diazotófos, debido a la gran riqueza de biodiversidad de que gozan estos países. En Norteamérica, los artículos mostraron resultados del empleo de las DN y al tipo de labranza, siendo este aspecto determinante, debido a las grandes extensiones de tierra que, sin el manejo mecanizado, sería difícil la producción de cultivos. En Oceanía igualmente las DN, los abonos orgánicos y el manejo de la cantidad de agua, debido a la baja disponibilidad de recurso hídrico. En África, las investigaciones se centraron en las ya descritas y en el uso de enmiendas órgano-minerales.

El manejo integral de la FN debería incluir más de una estrategia. Sin embargo, a la hora de realizar investigaciones, éstas se reducen al estudio de una o dos estrategias como máximo. De los artículos estudiados, el 37% consideraron el estudio de una sola estrategia, el 41% usaron dos estrategias, el 20% utilizaron tres estrategias y sólo el 2% tuvieron en cuenta más de tres estrategias.

Tabla 42. Número de artículos encontrados de acuerdo a las estrategias para aumentar la eficiencia de la FN y reducir la lixiviación de nitratos.

Estrategias	Tipo de experimento					Tipo de cultivo								Continente					Referencias		
	C	M	Li	I	La	Co	Ce	F	G	H	Le	O	Sc	Af	As	E	Lat	N		Oc	Tot al
Micorrizas	3	2					2	1	1		1				1	3	1			5	1, 2, 115,119,146
Biochar		1			3						1		3		3			1		4	3, 57, 61,96
Abonos verdes	7				2		3	1		2	1	1	1		3	3	3			9	4,12,19,24,91,115,131,138,142
DN	59	5	9	4	1	1	47	4	5	13		7	1	1	36	15	19	4	3	78	5,7,9,13,15,16,17,20,21,22,25,28,30,32,33,34,36,37,38,39,44,45,47,48,52,60,67,68,69,73,74,75,76,81,82,83,85,86,88,89,90,91,92,93,97,98,99,100,101,102,103,104,105,106,107,109,110,111,113,114,117,118,124,126,128,159,130,132,133,134,137,138,139,140,143,145,147,148
Tipo de labranza	11		1				11			1				1	3	4		4		12	6,18,20,49,55,62,63,65,68,87,89,107
Rotación de cultivos	20						15			3		2			5	13		2		20	7,8,10,19,23,24,26,27,43,49,55,56,62,68,71,76,88,89,97,111
Abonos orgánicos	30	2	4	1	2	2	26		5	1		2	3	1	12	17	4	3	2	39	7,8,10,15,16,19,25,28,31,33,41,42,45,49,54,65,66,68,69,70,75,78,80,85,87,88,93,95,97,100,106,108,114,121,123,127,137,144.
Coberturas	10		1				6	1		2		1	1	1	8	2				11	9,22,32,40,52,55,56,86,99,107,115
Lámina de agua	17	1	3		1		8	3	1	6		3	1	1	10	6	3		2	22	11,16,25,27,30,34,35,36,50,51,53,60,67,72,81,83,94,105,114,119,133,150
Uso de lombrices					1								1			1				1	12
Método de riego	8		1		1		4	2		3			1		6	2	1	1		10	13,23,67,75,77,82,83,86,101,150
Uso de zeolita	2	2	1		2		3		2				2		2	1	3		1	7	14,31,58,84,130,143,146
Frecuencia de riego	3		1				2	1		1					1	1	1		1	4	22,29,35,147
Uso de microorganismos diazotrofas	8	6		2	1	1	7	2		2	5				8	3	6			17	24,112,113,115,116,117,118,119,120,121,122,123,125,128,140,142,149
Localización del fertilizante	3		1				1			1		1	1		3			1		4	32,40,52,63
Asociación de cultivos	4	1		1			4			2					4	2				6	39,46,47,59,98,103
FLL	5	1		1	1		4			1		2	1		1	1	5	1		8	42,64,92,126,127,129,144,145
Enmienda órgano mineral	2		1				1			1		1		1	2					3	45,53,94
Tipo de fertilizante convencional	9	1		1	2	1	5			2	1	3	1		4	1	7	1		13	67,79,87,92,96,123,127,129,137,138,141,145,146
Uso de plaguicidas	2						1	1								1		1		2	68,77
Fraccionamiento de la fertilización	1						1											1		1	71
Calidad de agua	1	1		1			2		1						1		2			3	72, 113, 144
Densidad de plantas	1											1			1					1	102
Uso de cal	1						1										1			1	110
Tipo de drenaje	2						1						1				2			2	135,136

C= campo; M= materia; Li= lisímetro; I= invernadero; La= laboratorio; Co=condimentarias; Ce= cereales; F= frutales; G=gramíneas; H= hortalizas; Le= leguminosas; O= otros cultivos; Sc= Sin cultivo; Af= África; As= Asia; E= Europa; Lat= Latinoamérica; N= Norteamérica; Oc=Oceanía;

De acuerdo a lo anterior, un plan de manejo de la FN debe considerar dos visiones: la agronómica y la ambiental. La producción de alimentos para la población creciente y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural son aspectos importantes a los que se debe atender, pero no en detrimento de los recursos agua, suelo y aire. Tampoco se debe orientar las acciones a reducir la contaminación de los recursos sin considerar los aspectos socioeconómicos de los productores agrícolas. Se debe buscar la combinación de estrategias que contribuyan a las dos visiones para los sistemas productivos agrícolas, especialmente de aquellos que no cuentan con mucha información y cuyo manejo se realiza de forma artesanal como es el caso de las aromáticas.

6.2. OBJETIVO

Proponer un plan de manejo integral para la optimización de la FN y la reducción de lixiviación de nitratos en los sistemas productivos estudiados, de acuerdo a los mejores resultados obtenidos en las estrategias propuestas.

6.3. MATERIALES Y MÉTODOS

6.3.1. Localización

Los experimentos se realizaron en los invernaderos del Laboratorio de Aguas y Suelos Agrícolas LASA de la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR) de la Universidad del Valle.

6.3.2. Descripción del suelo

El suelo utilizado provino de finca Las Palmas, como en los capítulos anteriores, al cual se le determinaron nuevamente las características físico-químicas (Tabla 43)

Tabla 43. Propiedades físico-químicas del suelo utilizado para la experimentación.

Propiedad (unidades)	Valor	Propiedad (unidades)	Valor
pH	6,90	CE (dS m ⁻¹)	2,58
M.O.(g kg ⁻¹)	36,80	NT (%)	0,04
Ca (cmol(+) kg ⁻¹)	3,82	Textura (%)	A: 23,2, Ar: 42,8 y L: 34,0. Clase textural: arcilloso
Mg (cmol(+) kg ⁻¹)	2,20	Dr (Mg m ⁻³)	2,58
K (cmol(+) kg ⁻¹)	7,81	Da (Mg m ⁻³)	1,38
Na (cmol(+) kg ⁻¹)	0,00	Porosidad (%)	49,23
CIC (cmol(+) kg ⁻¹)	21,20	Macroporosidad (%)	12,41
CICE (cmol(+) kg ⁻¹)	13,83	Microporosidad (%)	36,82

6.3.3. Construcción y calibración del tanque evaporímetro

Se utilizó el mismo tanque descrito en los capítulos anteriores (Figura 66). La calibración del tanque evaporímetro se realizó registrando el valor diario de evaporación y correlacionándolo con tres estaciones de CENICAÑA (Jamundí, Melendez y PTAR Cañaveralejo), obteniéndose coeficientes de correlación de 0,99 (p<0,001).



Figura 66. Tanque evaporímetro ubicado en el invernadero donde se llevó a cabo el experimento. Cortesía: Ing. Víctor Manuel Torres

6.3.4. Diseño y construcción de Lisímetros de Drenaje (LD)

Los LD consistieron en recipientes plásticos de 0,25 m de altura por 0,20 m de diámetro y capacidad de 4 kg, recubiertos con malla y grava donde se dispuso el suelo, similares a los descritos en el capítulo 4 (Figura 67). Se estableció una diferencia de altura de 40 cm entre el lisímetro y el recipiente recolector para favorecer el flujo. A cada lisímetro se le realizó una inclinación con un ángulo de 10° con una mezcla de yeso y cemento blanco, con el fin de garantizar el flujo del total del lixiviado. La recolección se realizó diariamente y la muestra fue guardada en condiciones refrigeradas hasta cuando se contó con suficiente cantidad de lixiviado para ser analizado.



Figura 67. Montaje experimental para evaluar estrategias para la optimización de la FN y reducción de lixiviación de nitratos para albahaca. Cortesía: Karen García.

6.3.5. Diseño experimental para los cultivos de estevia y albahaca.

Se estableció un diseño completamente al azar, donde se propusieron siete tratamientos con tres repeticiones cada uno, para cada cultivo. Los tratamientos propuestos se escogieron de acuerdo a los mejores resultados obtenidos en las anteriores investigaciones (Tabla 44).

Tabla 44. Tratamientos propuestos para la evaluación de estrategias para la optimización de la FN y reducción de la lixiviación de nitratos, para estevia y albahaca.

Nomenclatura	Descripción del tratamiento
T1	Lámina de riego calculada para llevar el suelo a CC + aplicación de 100 kg·ha ⁻¹ de N utilizando como fuente urea convencional
T2	Lámina de riego calculada con los Kc + 100 kg·ha ⁻¹ de N utilizando como fuente urea convencional
T3	Lámina de riego calculada con los Kc + 100 kg·ha ⁻¹ de N utilizando como fuente urea recubierta
T4	Lámina de riego calculada con los Kc + 200 kg·ha ⁻¹ de N utilizando como fuente lombricompost
T5	Lámina de riego calculada con los Kc + 50 kg·ha ⁻¹ de N utilizando como fuente urea recubierta + enmienda órgano mineral*
T6	Lámina de riego calculada con los Kc + 50 kg·ha ⁻¹ de N utilizando como fuente urea recubierta + inóculo diazotrofo en dosis de 18,5 L·ha ⁻¹
T7	Lámina de riego calculada con los Kc + 50 kg·ha ⁻¹ de N utilizando como fuente urea recubierta + inóculo diazotrofo en dosis de 18,5 L·ha ⁻¹ + enmienda órgano mineral*

*Enmienda órgano-mineral 2,68 Mg·ha⁻¹ para estevia y 1,34 Mg·ha⁻¹ para albahaca

Para los tratamientos T1 y T2 la urea utilizada tenía el 46% de N y fue adicionada tres días antes con la lámina de riego necesaria para llevar al suelo a CC. La urea recubierta se adicionó con 5 días de anterioridad al trasplante para T3, T5, T6 y T7. El lombricompost se adicionó 15 días antes del trasplante en el T4. La enmienda órgano mineral se adicionó con tres días de anticipación al trasplante, mezclándola con los primeros 0,20 m de suelo, en T5 y T7. El inóculo diazotrofo se aplicó dos días después del trasplante para T5 y T7. Se realizaron aplicaciones a cada unidad experimental de P₂O₅ y K₂O de 25 y 80 kg·ha⁻¹ para estevia y de 65 y 200 kg·ha⁻¹ para albahaca, respectivamente. Estas DN utilizadas fueron escogidas con base a los requerimientos de plantas de estevia (Casaccia y Álvarez, 2006) y de albahaca (Bonilla y Guerrero, 2010). La unidad experimental consistió en un lisímetro de drenaje, con una planta en su interior a la cual se le realizaron todas las mediciones.

La enmienda órgano-mineral fue hecha a partir de lombricompost y bentonita en relación 55% de lombricompost y 45% de bentonita. Se mezclaron 450 g de bentonita seca al aire con 550 g de lombricompost, hasta alcanzar homogeneidad. Luego la enmienda fue mezclada con el suelo, en dosis 3,0 g·kg⁻¹ de suelo (2,68 Mg·ha⁻¹) para ambos cultivos.

El CD utilizado como inóculo provino de muestreo de agua y lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Ginebra (Valle del Cauca) y fue caracterizado en el Laboratorio de Microbiología Ambiental de la Universidad del Valle. Los detalles de su obtención se mostraron en el capítulo 5.

6.3.6. Variables de respuesta

Las variables de respuesta evaluadas fueron: N-amoniaco lixiviado total medido. En la planta se midió AP, MF, MS, porcentaje de MS, N foliar y el rendimiento de hoja seca en Mg por hectárea. Se consideraron los indicadores ER (cantidad de N absorbido /unidad de N aplicado) y EI (rendimiento obtenido por cantidad de N absorbido) propuestos por Dobermann (2007). También se calculó la eficiencia en el uso del agua (cantidad de masa por m³ de agua) siguiendo los lineamientos de Steduto *et al.* (2012). En el suelo se midió pH, CE, MOS y NTS. Se siguieron los métodos descritos en capítulos anteriores.

Se siguieron las prácticas culturales descritas en los anteriores capítulos. Las láminas de riego para estevia utilizadas durante el desarrollo del experimento estuvieron entre 26 y 260 mL para T1 y entre 26 y 220 mL para los demás tratamientos. En el caso de la albahaca el suministro de riego se hizo de forma manual y las láminas de riego estuvieron entre 32 y 220 mL para T1 y entre 20 y 200 mL para los demás tratamientos. Se realizó remoción del suelo superficial cada tercer día para evitar la formación de flujos preferentes, con el fin de controlar la aparición de flujos preferenciales por efecto del secado y humedecimiento de partículas.

Para la estevia, el control de plagas se realizó de forma manual, identificando oportunamente las plantas afectadas y procediendo a su limpieza, eliminando todo rastro de la plaga en la planta. Durante el ciclo del cultivo se presentó el ataque del hongo *Alternaria steviae*, por lo que fue necesario realizar fumigaciones cada 15 días con fungicida y bactericida de origen biológico, cuyo ingrediente activo fue la kasugamicina. Las arvenses fueron controladas manualmente para evitar la competencia con la planta por agua y nutrientes. Para la albahaca se realizaron fumigaciones con extracto de ajo para el control de pulgones (*Mizus ersicae*).

6.3.7. Análisis estadístico

La verificación de la distribución normal de los datos se hizo siguiendo la prueba de Shapiro Wilk y la homogeneidad de varianzas se determinó con la prueba de Levene. Se realizó un análisis estadístico descriptivo y análisis de varianza de una vía para determinar diferencias estadísticas entre tratamientos. Para las variables que siguieron distribución normal y tuvieron varianzas homogéneas se realizó un análisis de postanova (Test de Tukey). Para el caso de las variables que no obtuvieron homogeneidad de varianza se realizó la comparación de medias mediante la prueba de Dunnet. Para las variables que no siguieron distribución normal, se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis para verificar la distribución homogénea entre tratamientos y la prueba de las medianas para determinar la existencia de diferencias significativas. El análisis de varianza se realizó mediante el Test de Welch. Se utilizó el programa estadístico IBM SPSS Statistics 20.

6.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.4.1. Efecto de la aplicación de las estrategias en la lixiviación de nitrógeno en estevia

El efecto de la aplicación de las estrategias para la optimización de la FN y reducción de la lixiviación de nitratos se encuentra en la Tabla 45. El tratamiento testigo fue el que presentó mayor volumen de lixiviado, debido al mayor volumen de agua aplicado con respecto a los otros tratamientos, manteniendo el suelo a CC. Para los demás tratamientos se utilizó el Kc y el registro de la evapotranspiración de referencia para el cálculo de los volúmenes de agua a aplicar. Esta cantidad de agua aplicada equivalió al 89% de la humedad a CC. Los demás tratamientos no presentaron diferencias estadísticas debido a la alta dispersión de los datos (C.V.= 94,8%). Sin embargo, los resultados sugieren que el manejo del agua de riego es la principal estrategia para reducir la lixiviación de N.

A pesar de la remoción superficial del suelo realizada durante el experimento, la presencia de minerales de arcillas expansivas y las altas temperaturas presentadas modificaron la matriz del suelo, afectando las relaciones de porosidad.

Estas modificaciones generaron flujos preferenciales por donde se aceleró el agua de drenaje, que aparecen en los procesos de secado y humedecimiento de arcillas expansivas alterando la porosidad estructural del suelo (Cerisola *et al.*, 2005). A pesar de esta alta variabilidad, se logró evidenciar diferencias entre los tratamientos y el testigo. Los tratamientos que combinaron dos estrategias, T1, T3 y T4 obtuvieron volúmenes similares de lixiviados, equivalentes al 30,1%, 34,3% y 36,7% del volumen registrado para T1. Los tratamientos que combinaron tres estrategias (T5 y T6) fueron diferentes, donde fue más efectiva la aplicación de enmiendas órgano minerales que la del inóculo diazotrofo. Este resultado pudo deberse a la preservación de la MO proveniente del abono realizada por la bentonita, aumentando la capacidad de retención de humedad y reduciendo la lixiviación (Jaramillo, 2014). El tratamiento T7 que combina cuatro estrategias, también consiguió bajos volúmenes de lixiviados, obteniendo el equivalente a 5,4% del volumen lixiviado por T1.

Tabla 45. Efecto de la aplicación de estrategias para mejorar la eficiencia de N en la NL en estevia.

Tratamiento	Volumen de lixiviados ¹ (mL)	Amonio lixiviado ² (mg·L ⁻¹)	Nitrato ² (mg·L ⁻¹)
T1	136,33±23,4 a	2,19±0,27 a	2,94±0,49 a
T2	41,00±25,6 b	1,47±1,02 a	2,94±1,55 a
T3	46,67±28,39 b	1,91±1,01 a	1,58±0,80 a
T4	50,0±30,09 b	1,28±0,67 a	1,72±0,86 a
T5	2,33±1,86 b	0,00 a	0,00 a
T6	47,67±41,81 b	0,75±0,08 a	2,46±0,05 a
T7	7,36±6,36 b	0,00 a	0,00 a
F	2,88	1,69	1,09
P	0,05	0,2	0,41

T1= Riego a capacidad de campo (CC) + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea; T2= riego calculado con Kc + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea; T3= riego calculado con Kc + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta; T4= riego calculado con Kc + 200 kg·ha⁻¹ de N y fuente lombricompost; T5= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + enmienda órgano mineral (Bentonita - lombricompost); T6= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + consorcio diazotrofo proveniente de STARD; T7= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + consorcio diazotrofo proveniente de STARD + enmienda órgano mineral (Bentonita - lombricompost). Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas entre tratamientos; ¹determinación realizada mediante el Test de Duncan; ²determinación realizada mediante el Test de Dunnett Promedio de tres repeticiones ± error estándar.

La cantidad de amonio lixiviado estuvo entre 0 y 2,19 mg·L⁻¹ correspondientes a los tratamientos T5, T7 y T1 respectivamente. El testigo fue el que obtuvo una concentración de amonio de 2,19 mg·L⁻¹, debido a la mayor cantidad de agua aplicada en el riego, sin diferencias estadísticas con los otros tratamientos. La generación de flujos preferenciales debido al secado y humedecimiento de arcillas expansivas pudieron ocasionar esta lixiviación. Los valores de amonio hallados están por debajo de la concentración recomendada para agua de consumo de 35 mg·L⁻¹ que, a pesar de no ser tóxico para los humanos, si puede afectar a animales como los peces. Además, en el agua de consumo, el riesgo de convertirse en amoniaco puede reducir la eficiencia de la desinfección, favorecer la formación de nitritos, obstaculizar la eliminación del Mn y producir problemas organolépticos (WHO, 2011).

La aplicación de volúmenes de agua calculados con el Kc y los registros de ETo junto a los fertilizantes nitrogenados (T2 y T3) permitieron reducir en 32,9% y 13,8% las concentraciones de amonio con respecto al testigo. Igualmente, el abono orgánico (T4) también redujo en 41,6 % esta concentración con respecto al testigo y en 12,9% y 33,0% con respecto a la urea convencional y la urea recubierta.

Los tratamientos con presencia órgano-mineral no presentaron amonio en sus lixiviados debido a la capacidad de retención tanto del lombricompost como de la bentonita (Colombani *et al.*, 2015), mientras que, a pesar del manejo del agua, el uso de urea recubierta (T3) y del inóculo diazotrofo (T5), presentaron lixiviación de amonio, aunque en menor proporción que los tratamientos T1, T2, T3 y T4.

Las concentraciones de nitratos estuvieron entre 0 y 2,94 mg·L⁻¹ para los tratamientos T5, T7 y T1. Esta presencia de nitratos en los lixiviados obedece al proceso de nitrificación a partir del amonio, que no pudo ser retenido por el complejo de cambio del suelo. Este nitrato pudo provenir tanto del fertilizante adicionado como del abono orgánico y del suelo mismo. Sin embargo, las concentraciones estuvieron por debajo de las permisibles para el agua de consumo de 10 mg·L⁻¹ como N-NO₃ (50 mg·L⁻¹ como NO₃⁻) (Arauzo y Valladolid, 2013). La aplicación de urea presentó igual lixiviación que el testigo a pesar de haber utilizado menor cantidad de agua. El aporte de N en formas disponibles al medio aumenta considerablemente cuando se aplica fertilizantes nitrogenados al suelo, aumentando el riesgo de su pérdida por lixiviación.

Los FLL, tanto la urea recubierta como el lombricompost, redujeron la lixiviación de nitratos en 46,3% y 41,5% con respecto a la urea convencional. Es probable que el N contenido en estos FLL aún no se hubiera nitrificado completamente al momento de finalizar el experimento, al suministrar de forma gradual el N orgánico y retardando el proceso. Sin embargo, al adicionar el CD a la urea recubierta, la cantidad de nitratos encontrados en los lixiviados se incrementó en un 35,8%, debido al aumento de bacterias nitrificantes y al aporte de N que incrementó la concentración de nitratos en la solución del suelo. Algunas propiedades del suelo como el pH pueden estimular la actividad microbiana y acelerar el proceso de nitrificación (Bertola *et al.*, 2004).

La presencia de la enmienda órgano-mineral redujo sustancialmente la concentración de nitratos, al punto de no ser detectados por las metodologías de laboratorio empleadas para su determinación. Al retener el amonio en el complejo de cambio, se redujo el proceso de nitrificación, reduciendo la concentración de nitratos en la solución del suelo. Además, la adición del abono orgánico contribuyó a aumentar la retención de humedad, evitando su lixiviación.

6.4.2. Efecto de estrategias empleadas en las propiedades agronómicas de la estevia.

La respuesta de las variables agronómicas de estevia a diferentes estrategias para disminuir el NL y aumentar la eficiencia de la FN se muestran en la Tabla 46. Las AP al cabo de 89 días después del trasplante estuvieron entre 31,67 y 43,70 cm, sin diferencias estadísticas entre tratamientos. La mayor AP fue encontrada para el tratamiento T7 que combinó más estrategias (manejo del agua + enmienda órgano mineral + inoculo diazotrofo + fertilizante de liberación lenta), mientras que los valores más bajos fueron alcanzados por aquellos tratamientos que tenían sólo dos estrategias como el manejo del agua y el uso del fertilizante. Justamente estos tratamientos fueron los que reportaron mayor lixiviación, por lo que el N aplicado no pudo ser absorbido por las plantas. La respuesta del crecimiento de las plantas ante la aplicación del inóculo diazotrofo pudo deberse al suministro de N y a la producción de fitohormonas de crecimiento que este tipo de microorganismos pueden estimular (Cassan y Díaz, 2016).

Tabla 46. Propiedades agronómicas de estevia obtenidas con la combinación de diferentes estrategias.

Tratamiento	AP (cm) ¹	Porcentaje de MS ²	Rendimiento de hoja fresca (Mg ha ⁻¹) ³	Rendimiento de hoja seca (Mg ha ⁻¹) ³
T1	41,70±3,32 a	26,76±0,59 ab	5,57±0,55 ab	1,49±0,12 ab
T2	35,93±4,60 a	28,10±1,31 ab	4,20±0,52 b	1,17±0,10 b
T3	31,67±2,08 a	27,43±3,26 ab	4,85±0,90 b	1,28±0,13 b
T4	38,17±0,17 a	19,90±0,05 b	6,20±0,70 ab	1,24±0,14 b
T5	38,70±0,45 a	22,15±2,39 ab	5,88±0,16 ab	1,50±0,10 ab
T6	42,40±2,89 a	32,19±3,73 a	4,35±0,43 b	1,38±0,09 b
T7	43,70±2,44 a	26,22±2,86 ab	7,07±0,86 a	1,84±0,23 a
F	1,58	3,18	2,69	2,74
p	0,22	0,04	0,06	0,06

T1= Riego a capacidad de campo (CC) + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea; T2= riego calculado con Kc + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea; T3= riego calculado con Kc + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta; T4= riego calculado con Kc + 200 kg·ha⁻¹ de N y fuente lombricompost; T5= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + enmienda órgano mineral (Bentonita - lombricompost); T6= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + consorcio diazotrofo proveniente de STARD; T7= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + consorcio diazotrofo proveniente de STARD + enmienda órgano mineral (Bentonita – lombricompost). Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas entre tratamientos; ¹ Prueba de Tukey (95%). ² Dunnett al 95%. ³ prueba de Duncan al 90%

A medida que se aumentaron las estrategias empleadas, la respuesta en la AP fue mejor. Los valores obtenidos estuvieron por encima de los valores promedios reportados por Zetina *et al.* (2014) (28,5 cm), pero por debajo de los alcanzados por Gusqui *et al.* (2010) (60 cm), Salgado (2013) (57,8 cm), Maniruzzaman *et al.* (2016) (60 cm) y Zaman *et al.* (2015) (91 cm) cuyos cultivos fueron llevados a cabo al aire libre. Estos resultados sugieren que la luminosidad y la temperatura fueron factores determinantes en la producción y desarrollo de estevia. Szymanska *et al.* (2017) refieren que la baja luminosidad se ve reflejada en peciolos alargados, menor diámetro de tallo, hojas más delgadas y menor contenido de clorofila y proteínas foliares.

Los porcentajes de MS estuvieron entre 19,90% y 32,19% correspondientes a los tratamientos T4 y T6, respectivamente, encontrándose diferencias estadísticas entre tratamientos. En la mitad de los casos, el porcentaje de MS estuvo entre 0,67 y 5,43 unidades por encima del tratamiento testigo (T2, T3 y T6), mientras que en la otra mitad

estuvieron, 0,54 y 6,86 unidades por debajo (T4, T5 y T7). La aplicación de urea convencional consiguió 2,38% y 29,2% más porcentaje de MS que la urea recubierta y el lombricompost. Al parecer, la adición del inóculo diazotrofo en los tratamientos T6 y T7 contribuyó a mejorar la absorción del N y a la producción de biomasa. Los menores valores de porcentaje de masa fueron para los tratamientos T4 y T5, debido posiblemente a bajo contenido de N en formas químicas disponibles para la planta, a una baja tasa de mineralización del lombricompost, a la lenta disolución de la urea recubierta y a la adsorción de amonio en los complejos de cambio.

Los rendimientos de hoja fresca estuvieron entre 4,20 y 7,07 Mg·ha⁻¹ correspondientes a los tratamientos T2 y T7 respectivamente encontrándose diferencias estadísticas entre tratamientos. Con un 90% de confiabilidad se puede afirmar que el tratamiento que combinó el mayor número de estrategias (T7) obtuvo mayor rendimiento que T2, T3 y T6. El uso de lombricompost obtuvo 10,2%, 32,3% y 21,8% más de rendimiento que el testigo, la aplicación de urea convencional y urea recubierta, respectivamente. Este resultado pudo deberse no sólo al suministro de N brindado por el suelo y por el abono, sino también al mejoramiento de las condiciones físicas del suelo que incrementan las relaciones de porosidad y la retención de humedad, creando un medio adecuado para el crecimiento de las plantas. Además, de acuerdo con Milosevic *et al.* (2013), la aplicación de la urea puede reducir el pH, crear desbalances nutricionales y movilizar elementos tóxicos como Mn y Al, que puede inhibir el crecimiento de las plantas y afectar la producción.

La aplicación de la enmienda en el T5 obtuvo 26% más rendimiento que la aplicación del inóculo (T6) ambos tratamientos con manejo del agua y uso de FLL. Sin embargo, el mejor resultado se obtuvo cuando ambas estrategias fueron incluidas en el tratamiento (T7). Los rendimientos en fresco hallados estuvieron por encima de los reportados por Dushyant *et al.* (2014) (2,97 Mg·ha⁻¹) y Maniruzzaman *et al.* (2016) (1,79 Mg·ha⁻¹) y similares a los encontrados por Zaman *et al.* (2015) (3,48 Mg·ha⁻¹)

Para el rendimiento de hoja seca, los valores estuvieron entre 1,17 y 1,84 Mg·ha⁻¹ correspondientes nuevamente a los tratamientos T2 y T7 respectivamente encontrándose diferencias entre tratamientos. El comportamiento de los tratamientos estuvo similar a los hallados para rendimiento de hoja fresca. Sin embargo, vale la pena señalar que los tratamientos que incluyeron la enmienda órgano mineral fueron los que alcanzaron los mayores rendimientos de hoja seca, probablemente al brindar gradualmente el N en forma de amonio, producto de la nitrificación, sin dejarlo perder por lixiviación y por traslocación a capas más profundas del suelo. El rendimiento seco alcanzado con esta combinación de estrategias estuvo entre 18,5% y 36,4% por encima de los demás tratamientos ($p < 0,1$). Los rendimientos hallados estuvieron por debajo de los alcanzados por Yang *et al.* (2013) quienes obtuvieron rendimientos de hasta 4,5 Mg ha⁻¹ al utilizar DN de 225 kg ha⁻¹; Gusqui *et al.* (2010) alcanzaron 2,9 Mg·ha⁻¹ con 50 Mg·ha⁻¹ de vermicompost, mientras que Salgado (2013) encontró rendimientos de 2,78, 4,05 y 5,06 Mg ha⁻¹ para DN de 118, 172 y 215 kg·ha⁻¹ de N respectivamente. Sin embargo, los hallados en el presente trabajo estuvieron por encima de los reportados por Maniruzzaman *et al.* (2016) (0,52 Mg·ha⁻¹) y Zaman *et al.* (2015) (0,95 Mg·ha⁻¹). Dushyant *et al.* (2014) encontraron rendimiento de hoja de estevia seca entre 0,67 y 0,84 Mg·ha⁻¹, Bonilla *et al.*, (2007) entre 0,33 y 0,43 Mg·ha⁻¹ y Velázquez *et al.* (2016) entre 0,96 y 2,76 Mg·ha⁻¹ todos utilizando solamente fertilizantes orgánicos, valores por debajo de los hallados en este trabajo, aún con el tratamiento que utilizó solo lombricompost (T4).

El NF estuvo entre 0,76% y 1,49% correspondiente a los tratamientos T1 y T7 (Figura 68). Los tratamientos con mayor NF fueron T2 y T7. Estos resultados pueden deberse, en el caso de T2 a la alta disponibilidad de N que brinda la urea, a pesar de su elevada capacidad de volatilizarse, suministrando el N oportunamente. Para el caso del T7, el suministro gradual tanto del FLL sumado al N aportado por el inóculo diazotrofo, garantizó mayor cantidad de N disponible para la planta. El aporte de la enmienda órgano mineral, en la retención del amonio, permitió la conservación y garantizó su disponibilidad en el tiempo. Los valores de NF reportados por Borda-Molina *et al.* (2009) para estevia están entre 1,92% y 2,20%, por Salgado (2013) están entre 1,8% y 2,8% y por Maniruzzaman *et al.* (2016) están entre 1,15% y 1,62%, valores por encima de los encontrados en el presente trabajo.

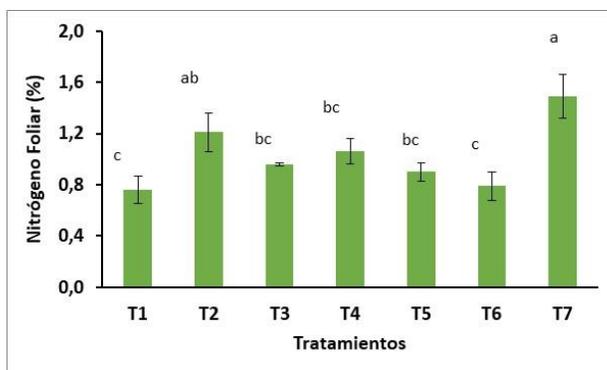


Figura 68. Efecto de la aplicación de estrategias para mejorar la eficiencia de N en la concentración de NF en estevia.

T1= Riego a capacidad de campo (CC) + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea; T2= riego calculado con Kc + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea; T3= riego calculado con Kc + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta; T4= riego calculado con Kc + 200 kg·ha⁻¹ de N y fuente lombricompost; T5= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + enmienda órgano mineral (Bentonita - lombricompost); T6= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + consorcio diazotrofo proveniente de STARD; T7= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + consorcio diazotrofo proveniente de STARD + enmienda órgano mineral (Bentonita – lombricompost). Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas entre tratamientos determinación realizada mediante el Test de Tukey (F=5,21; p=0,005). Promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar.

6.4.3. Efecto de estrategias empleadas en las propiedades del suelo de estevia.

El efecto de las estrategias en las propiedades del suelo, después de 89 días después del trasplante, se muestra en la Tabla 47. Los valores de pH encontrados estuvieron en el rango de moderadamente ácido a neutro para todos los tratamientos. La urea convencional (T2) acidificó el suelo, al cabo del tiempo experimental, debido al proceso de nitrificación, donde la transformación de amonio a nitrito genera H⁺ al medio (Osorio, 2014) y por el favorecimiento en la extracción de nutrientes, especialmente cationes que, por medio del mecanismo de transporte activo de iones hacia las células, expulsa H⁺ al medio, fenómeno conocido como “bomba de hidrógeno”. Esta acidificación llama la atención porque el uso frecuente de este tipo de fertilizantes, podría acidificar significativamente el suelo en el tiempo, conduciéndolo a degradación lenta. Para los demás tratamientos, los pH cercanos a la neutralidad garantizan mayor disponibilidad de macro y micronutrientes.

Tabla 47. Efecto de la aplicación de estrategias para mejorar la eficiencia de N en las propiedades finales del suelo cultivado con estevia.

Tratamiento	pH ¹	CE (dS/m) ²	MOS (%) ²	NTS (%) ¹
T1	6,70±0,01	1,31±0,27 c	2,61±0,04 c	0,12±0,01 b
T2	5,48±0,01	1,73±0,09 bc	2,39±0,03 d	0,47±0,17 ab
T3	6,39±0,13	1,99±0,13 abc	2,44±0,03 d	0,15±0,02 b
T4	6,60±0,06	2,33±0,29 ab	2,39±0,03 d	0,68±0,06 a
T5	6,66±0,08	2,34±0,18 ab	2,90±0,04 b	0,73±0,11 a
T6	6,46±0,02	2,67±0,18 a	2,50±0,02 cd	0,77±0,15 a
T7	6,73±0,04	2,22±0,11abc	3,43±0,03 a	0,73±0,02 a
F	528,56	5,55	137,47	95,51
p	< 0,001	0,004	< 0,001	< 0,001

T1= Riego a capacidad de campo (CC) + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea; T2= riego calculado con Kc + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea; T3= riego calculado con Kc + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta; T4= riego calculado con Kc + 200 kg·ha⁻¹ de N y fuente lombricompost; T5= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + enmienda órgano mineral (Bentonita - lombricompost); T6= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + consorcio diazotrofo proveniente de STARD; T7= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + consorcio diazotrofo proveniente de STARD + enmienda órgano mineral (Bentonita – lombricompost). Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas entre tratamientos; ¹ANOVA por el Test de Welch y comparaciones con Dunnett al 95%. ² Test de Tukey al 95%

La CE obtenida al final del periodo experimental, se incrementó con respecto a los valores iniciales del suelo. Estos valores estuvieron entre 1,31 y 2,67 dS·m⁻¹, catalogados por Fernández *et al.* (2006) como no salino a poco salinos. Estos valores de CE indican la presencia de sales disueltas, lo que implica una mayor concentración de nutrientes o mayor fertilidad. La aplicación de fertilizantes (T2 y T1) al igual que el tratamiento con mayor número de estrategias utilizadas (T7) no incrementó la CE con respecto al testigo (T1). El abono orgánico incrementó la CE en 43,8%, 25,8% y 14,6% con respecto al testigo, la urea convencional y la recubierta, respectivamente. Como era de esperarse, la CE del testigo fue la más baja de todas la CE, debido a que se utilizó mayor cantidad de agua de riego. El tratamiento T6, que tenía el inóculo diazotrofo sin enmienda órgano-mineral fue el que obtuvo mayor CE y estuvo 12,3% y 16,9% más

alta con respecto a T5 y T7. Es posible que la presencia del inóculo diazotrofo aumentara la actividad microbiana de la rizósfera y promoviera la mineralización de la MO del suelo aumentando la disponibilidad de nutrientes. Los tratamientos con enmienda órgano-mineral presentaron CE similares a las halladas con el lombricompost sólo, indicando que la enmienda contribuyó a la retención de iones, dejándolos disponibles gradualmente para la planta, como se pudo ver en la obtención de mayores rendimientos y mayor NF.

La MO del suelo varió desde 2,39% a 3,43% encontrándose diferencias significativas entre tratamientos. Los valores más bajos de MOS fueron encontrados para T2, T3, T4 y T6, los cuales estuvieron 8,4%, 6,5%, 8,4% y 4,2% por debajo del tratamiento testigo (T1). La aplicación de la urea convencional y la de recubierta redujeron el contenido de MO debido a la estimulación de la actividad microbiana que, al disponer de formas inorgánicas de N, incrementan la tasa de mineralización, reduciendo incluso con la MO nativa, si las DN son excesivas. La aplicación de solo lombricompost redujo igualmente la MO significativamente con respecto al testigo mostrando que a pesar de que los abonos orgánicos aportan MO al suelo, su baja relación C/N estimula la actividad microbiana y es descompuesta rápidamente en el tiempo, incluso produciendo el “efecto primming”, en donde no solo hay consumo del material orgánico adicionado, sino además se reduce la MOS.

La adición de la enmienda favoreció e incrementó los niveles de MOS de forma significativa. La aplicación de la bentonita junto al lombricompost protegió la MOS, debido a la forma de enlaces entre radicales orgánicos como los hidroxilos y la carga del mineral de arcilla. Al quedar la MOS adsorbida en la superficie de la arcilla, la protege del ataque microbiano y limita la mineralización de la misma, conservándola por más tiempo (Turner *et al.*, 2017). Esta conservación trae beneficios a largo plazo en las propiedades físicas de los suelos, como la creación de microestructura, aumento en la capacidad de retención de agua e iones y mejoramiento de porosidad. La aplicación del inóculo diazotrofo pudo activar la biomasa del suelo y acelerar la mineralización, lo que ocasiona la reducción de la MOS.

El NTS estuvieron altos para todos los tratamientos, encontrándose diferencias estadísticas entre ellos. La aplicación de fertilizantes no produjo incremento significativo en el NTS con respecto al testigo, resultando coherente con la MOS encontrada debido a que, a pesar del suministro de N inorgánico, este aporte no incidió significativamente en el NTS. Los tratamientos que combinaron tres estrategias o más lograron aumentar el NTS y dejaron un efecto residual para próximas cosechas, además de un remanente necesario para la conservación de coberturas del suelo y protección contra agentes erosivos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que aumentos significativos de MOS y del NTS se pueden alcanzar con el tiempo aplicando constantemente la enmienda para la protección de los compuestos orgánicos (Czaban *et al.*, 2013).

6.4.4. Efecto de estrategias empleadas en la eficiencia de la Fertilización Nitrogenada (FN) de estevia

Las EI alcanzadas por todos los tratamientos estuvieron entre 0,05 y 0,20 Mg de MS por kg de N absorbido. La EI más alta fue alcanzada por T1, indicando que la cantidad de agua aplicada incide en la eficiencia de utilización del N (Figura 69). Sin embargo, este tratamiento sólo presentó diferencias estadísticas con T7, el tratamiento que combinó mayor número de estrategias. Lo anterior no quiere decir que la aplicación de las estrategias no contribuya a la eficiencia de la FN. De acuerdo con Dobermann (2007), valores muy altos de EI indican que existe deficiencia de N, mientras que valores muy bajos indican pobre conversión interna del N, debido a algún agente de estrés. Sin embargo, a partir de este indicador es imposible deducir en cual situación se encuentra cada tratamiento, puesto que se desconocen valores de referencia para la estevia. Es probable que valores por encima del alcanzado por T7 resulten ser altos ya que, al correlacionarlos con el NF, los demás tratamientos presentaron concentraciones menores a los reportados por varios estudios y las cosechas fueron menores.

Todos los fertilizantes empleados alcanzaron valores similares de EI, cercanos a 0,10 Mg de MS por kg de N absorbido. Tanto la enmienda órgano-mineral como el CD, ambos aplicados independientemente uno del otro, aumentaron la EI por encima de los valores registrados para la urea convencional, la urea recubierta y el lombricompost. Sin embargo,

al aplicarse en conjunto con la urea recubierta y a la lámina de agua calculada con Kc, la EI fue estadísticamente más baja, debido posiblemente a un uso más eficiente del N por parte de la planta (Dobermann, 2007).

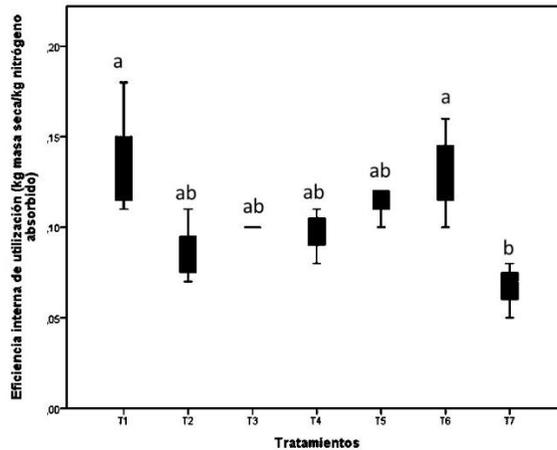


Figura 69. Efecto de la aplicación de estrategias para aumentar la eficiencia de N en la eficiencia interna de utilización en estevia.

T1= Riego a capacidad de campo (CC) + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea; T2= riego calculado con Kc + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea; T3= riego calculado con Kc + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta; T4= riego calculado con Kc + 200 kg·ha⁻¹ de N y fuente lombricompost; T5= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + enmienda órgano mineral (Bentonita - lombricompost); T6= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + consorcio diazótrofo proveniente de STARD; T7= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + consorcio diazótrofo proveniente de STARD + enmienda órgano mineral (Bentonita – lombricompost). Las barras indican los intervalos de confianza (95%). (F=3,73; p=0,02)

6.4.5. Efecto de estrategias empleadas en el uso eficiente del agua de estevia

En la Figura 70, se muestran los resultados del indicador del uso eficiente del agua alcanzado por los tratamientos. Para la MF, los valores estuvieron entre 1,5 y 2,6 kg·m⁻³ mientras que para la MS estuvieron alrededor de 0,5 kg·m⁻³. Solamente el tratamiento que combinó mayor número de estrategias (T7) obtuvo diferencias estadísticas con el testigo.

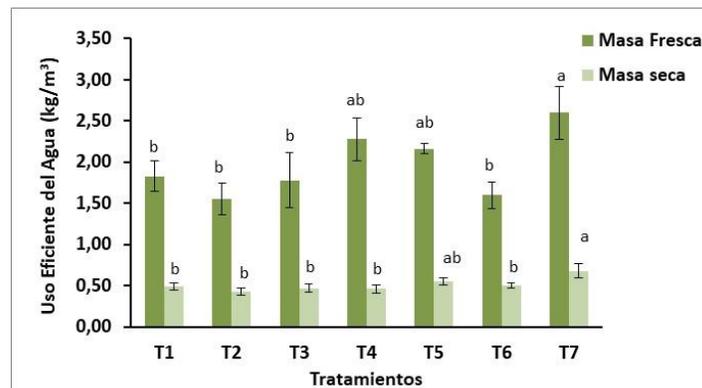


Figura 70. Efecto de la aplicación de estrategias para mejorar la eficiencia de N en el uso eficiente del agua en estevia.

T1= Riego a capacidad de campo (CC) + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea; T2= riego calculado con Kc + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea; T3= riego calculado con Kc + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta; T4= riego calculado con Kc + 200 kg·ha⁻¹ de N y fuente lombricompost; T5= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + enmienda órgano mineral (Bentonita - lombricompost); T6= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + consorcio diazótrofo proveniente de STARD; T7= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + consorcio diazótrofo proveniente de STARD + enmienda órgano mineral (Bentonita – lombricompost). Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas entre tratamientos, determinación realizada mediante el Test de Ducean. MF (F=2,81; p=0,05); MS (F=2,89; p=0,05). Las barras indican el error estándar.

El tratamiento con urea recubierta fue más eficiente en el uso del agua que la urea convencional, aumentando la eficiencia en 12,9% en MF. Estos resultados pudieron deberse a que la urea recubierta permitió mayor oportunidad de absorción de N por la planta, aumentando el rendimiento. No obstante, el lombricompost incrementó la eficiencia en 32,0% y 21,9% con respecto a la urea convencional y la urea recubierta, respectivamente. La mayor cualidad de los abonos orgánicos es el aumento de la porosidad que permite mayor retención de humedad, lo que hace más eficiente

el aprovechamiento del agua por la planta. La aplicación de la enmienda órgano-mineral junto a la urea recubierta incrementó el uso eficiente del agua en 17,6% con respecto a la urea recubierta sola y solamente 5,3% del lombricompost, mostrando su capacidad para la retención de humedad y nutrientes. La aplicación del CD no afectó el uso del agua, obteniendo valores similares a los hallados con la urea convencional y la urea recubierta.

Para el caso de la MF, la combinación de la enmienda órgano-mineral junto al CD y la urea recubierta fue más eficiente en el uso del agua y fue estadísticamente diferente del testigo, la urea convencional, la urea recubierta y el CD. Estos resultados demuestran que el uso de un mayor número de estrategias puede contribuir tanto al uso más eficiente del nutriente por la planta como a mejorar la retención de humedad, haciendo más eficiente el riego.

6.4.6. Efecto de la aplicación de las estrategias en la lixiviación de nitrógeno en albahaca

Debido a los bajos volúmenes de agua utilizados no se presentó lixiviación en los tratamientos. Solamente los tratamientos T1 y T4 presentaron lixiviación de 20 y 6 mL respectivamente durante el experimento. Estos volúmenes están por debajo de los requeridos por el protocolo para la determinación de NL por lo que no se realizó su determinación. Además, dado que las raíces de las plantas de albahaca son más profundas que las de estevia, la remoción del suelo superficial para evitar los flujos preferenciales fue más sencilla y eficiente.

6.4.7. Efecto de estrategias empleadas en las propiedades agronómicas de albahaca

El efecto de las diversas estrategias para aumentar la eficiencia de N y reducir la lixiviación en albahaca se encuentran en la Tabla 48. Las mayores AP fueron encontradas para los tratamientos testigo (T1) y lombricompost (T4), donde la concentración de N fue menor, demostrando que la AP de albahaca es independiente de la cantidad de N disponible en el suelo. En la otra mano, la AP más baja fue alcanzada por la urea convencional (T2) sin ninguna diferencia estadística con los demás tratamientos que combinaban dos o más estrategias para el manejo del N.

Tabla 48. Efecto de la aplicación de estrategias para mejorar la FN en propiedades agronómicas de la albahaca.

Tratamiento	AP (cm)	Porcentaje de MS	Rendimiento de hoja fresca (Mg ha ⁻¹) ¹	Rendimiento de hoja seca (Mg ha ⁻¹)
T1	61,33±0,3 ab	28,54±1,2 a	3,01±0,3 a	0,69±0,1 a
T2	48,27±3,9 c	23,54±1,5 a	2,07±0,3 a	0,45±0,1 ab
T3	54,50±2,8 bc	29,38±4,9 a	2,08±0,2 b	0,52±0,1 ab
T4	59,80±1,8 ab	25,80±3,1 a	2,00±0,1 b	0,30±0,0b
T5	52,83±1,1 bc	21,79±2,3 a	2,43±0,1 a	0,38±0,0 ab
T6	49,50±3,2 c	24,18±2,9 a	2,06±0,2 b	0,34±0,0b
T7	55,63±1,8 bc	25,21±0,5 a	2,24±0,3 b	0,45±0,0 a
F	5,40	1,02	2,55	2,64
P	0,003	0,46	0,07	0,02

T1= Riego a capacidad de campo (CC) + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea; T2= riego calculado con Kc + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea; T3= riego calculado con Kc + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta; T4= riego calculado con Kc + 200 kg·ha⁻¹ de N y fuente lombricompost; T5= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + enmienda órgano mineral (Bentonita - lombricompost); T6= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + consorcio diazotrofo proveniente de STARD; T7= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + consorcio diazotrofo proveniente de STARD + enmienda órgano mineral (Bentonita - lombricompost). Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas entre tratamientos, determinación realizada mediante el Test de Duncan (95%); ¹ Prueba de Duncan (90%).

Las plantas fertilizadas con FLL como la urea recubierta (T3) y el lombricompost (T4) obtuvieron 11,4% y 19,3% más de AP que la urea convencional (T2). No se encontraron diferencias estadísticas entre T2 y T3, pero sí entre T2 y T4, debido a que el abono orgánico, además de brindar nutrientes a la planta, mejora las condiciones físicas del suelo, facilitando la toma de agua, la aireación y la difusión de nutrientes hacia las raíces de las plantas. La adición de más de dos estrategias, no hizo ninguna diferencia en AP, por el contrario, obtuvieron resultados muy similares con respecto a la aplicación de fertilizantes e incluso al testigo. Los valores encontrados estuvieron por encima de los reportados por Ledesma *et al.* (2013), cuyas AP estuvieron entre 14 y 37 cm, al utilizar diferentes dosis de compost proveniente de residuos orgánicos domiciliarios y por González (2013) quien al usar aislados bacterianos de *Bacillus spp.*, las plantas alcanzaron AP de 36 cm máximo. González *et al.* (2009) encontraron AP similares a las halladas (50,0 y 58,3 cm), al utilizar relaciones de amonio/nitrato igual a 20/80, demostrando que la nitrificación es importante para aumentar la absorción de nitrato por la planta. Pandey *et al.* (2016) encontraron AP entre 65 y 79 cm donde los mayores valores

correspondieron a tratamientos que combinaban abono orgánico (2500 kg ha⁻¹) y fertilizante de síntesis química (50 kg ha⁻¹).

No se encontraron diferencias estadísticas en el porcentaje de MS para todos los tratamientos, el cual estuvo entre 21,79% y 29,38% (C.V.= 17,5%). La variabilidad de los datos registrados no permitió visualizar el efecto de los tratamientos. A pesar de esto, se encontró que la urea recubierta alcanzó 5,8% más de MS que la urea convencional, demostrando que la liberación controlada del N puede favorecer la absorción por parte de la planta. A su vez, la urea recubierta obtuvo alrededor de 6,6% más que el lombricompost resultando más efectiva su liberación que la proveniente del abono orgánico. Esto puede deberse a que el proceso de mineralización de la MOS toma más tiempo, (alrededor de 3 semanas aproximadamente como se vio en el capítulo 3), para suministrar la mayor parte del N inorgánico que la solubilización de la urea. De acuerdo con Milosevic *et al.* (2013) la aplicación de solo abonos orgánicos no puede satisfacer la demanda nutricional de los cultivos, especialmente en los primeros años de aplicación.

El menor valor de MS fue alcanzado por T5 posiblemente a que la lenta liberación del N por parte de la urea recubierta y la presencia de la enmienda que pudo haber adsorbido el amonio disponible, redujo la disponibilidad de N para la planta. La presencia del inóculo diazotrofo junto a la enmienda y la urea recubierta pudo aumentar la disponibilidad de N en la solución del suelo, como se puede apreciar en los valores alcanzados por T6 y T7.

En cuanto a los rendimientos de hoja fresca, la cantidad de agua aplicada fue determinante. El testigo con la DN igual, pero con mayor cantidad de agua, logró alcanzar mayor rendimiento de hoja fresca que los demás tratamientos, donde se aplicó menor cantidad de agua, con excepción de T5 ($p < 0,1$). A pesar de utilizar volúmenes de agua más altos que los demás tratamientos, no se presentó lixiviación, debido a que se escarificó el suelo constantemente para evitar la formación de grietas y se evitó la generación de flujos preferenciales. El uso de enmiendas órgano-minerales favoreció la retención de humedad lo que brindó similares resultados al testigo. El rendimiento fresco fue independiente del tipo de fertilizante empleado, así se obtuvieron similares resultados para la urea, la urea recubierta, el lombricompost y el inóculo diazotrofo. El uso de la enmienda órgano-mineral incrementó ligeramente el rendimiento fresco, pero sin diferencias estadísticas con los abonos solos.

Los rendimientos de hoja seca estuvieron entre 0,30 y 0,69 Mg·ha⁻¹ correspondientes a T4 y T1 respectivamente. Nuevamente, el testigo, con mayor aplicación de agua, obtuvo el valor más alto, aunque sin diferencias estadísticas con T2, T3, T5 y T7 (C.V.= 27,3%). Los valores más bajos fueron conseguidos por T4 y T6, aunque ambos no presentaron diferencias estadísticas con T5, T3 y T2. Nuevamente, la urea recubierta alcanzó mayores rendimientos que la urea y que el lombricompost. Sin embargo, al utilizarla junto a otras estrategias como la enmienda órgano-mineral y el CD, los rendimientos se redujeron levemente. Es importante escoger las estrategias que mayor disponibilidad de N ofrezca a la planta, y que a su vez ocasione menores pérdidas del nutriente. No necesariamente el empleo de más cantidad de estrategias, obtiene los mejores resultados. Es posible que, a mayor número de estrategias utilizadas, la lixiviación sea mucho menor y menos riesgo de contaminación de aguas profundas se presente, pero puede interferir con los rendimientos de un cultivo, lo que perjudicaría al productor.

El efecto de las estrategias empleadas en la absorción de N por la planta se puede apreciar en la Figura 71. Las concentraciones de N estuvieron entre 0,53% y 1,59% para los tratamientos T4 y T6 respectivamente, con diferencias estadísticas entre tratamientos. La aplicación de los fertilizantes (T2 y T3) obtuvo valores iguales al testigo, indicando que ni la cantidad de agua aplicada ni la fuente ni la DN afectó significativamente la absorción de N por la planta. El aumento de la retención de amonio y de agua y de la actividad microbiana con la aplicación del CD, tuvieron gran significancia en incrementar la concentración de N en la planta, siendo esta última estrategia, la más determinante para mejorar la absorción radical del nutriente. De acuerdo con Alarcón (2013), la variedad genovesa presenta una concentración promedio de NF de 2,4% en su etapa de madurez, por lo que los resultados hallados estarían por debajo del rango. Estos resultados pudieron deberse a las altas temperaturas alcanzadas durante el periodo experimental.

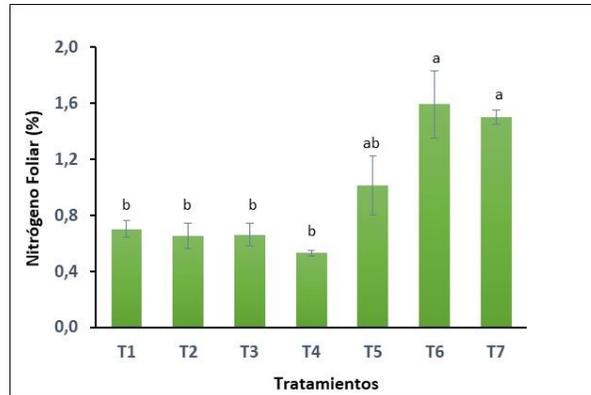


Figura 71. Efecto de la aplicación de estrategias para mejorar la eficiencia de N en la concentración de NF en albahaca.

T1= Riego a capacidad de campo (CC) + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea; T2= riego calculado con Kc + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea; T3= riego calculado con Kc + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta; T4= riego calculado con Kc + 200 kg·ha⁻¹ de N y fuente lombricompost; T5= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + enmienda órgano mineral (Bentonita - lombricompost); T6= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + consorcio diazotrofo proveniente de STARD; T7= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + consorcio diazotrofo proveniente de STARD + enmienda órgano mineral (Bentonita – lombricompost). Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas entre tratamientos determinación realizada mediante el Test de Dunnett (F=9,91; p < 0,001). Las barras indican el error estándar.

También la disponibilidad de agua es crucial para incrementar la mineralización del N y favorecer su absorción. Yang *et al.* (2017) encontraron una correlación positiva entre las tasas de mineralización y la humedad del suelo y aseguran que el agua puede incrementar la conectividad entre poros y mejorar la distribución de N en los micrositos, incrementando la transformación de formas orgánicas a inorgánicas.

Mota & Sanchez (2013), fertilizaron plantas de albahaca con DN por encima de las empleadas en el presente trabajo utilizando abonos orgánicos, y obtuvieron mayores valores de NF, entre 2,2% y 2,8%, debido posiblemente a la baja densidad de los materiales orgánicos empleados que permite mejorar las relaciones de porosidad y favorecer la absorción de nutrientes. Sin embargo, Ferreira *et al.* (2015) no recomiendan el uso de altas DN cuando se va a realizar un único corte de plantas de albahaca con fines farmacéuticos o homeopáticos, debido a que puede alterar sus compuestos volátiles.

6.4.8. Efecto de estrategias empleadas en las propiedades del suelo en albahaca

El efecto de la aplicación de estrategias para mejorar la FN en algunas propiedades químicas del suelo, después de la cosecha de la albahaca se presenta en la Tabla 49. Los valores finales de pH estuvieron entre 5,81 y 7,04 unidades, catalogados como ligeramente ácidos a ligeramente alcalinos. Los valores finales estuvieron por debajo del hallado en la caracterización inicial del suelo, mostrando que, con excepción de los tratamientos que contienen enmienda órgano-mineral, todos acidifican el suelo. La urea convencional y la recubierta fueron los que más acidificación produjeron y se debe principalmente al proceso de nitrificación que sucede al transformar el amonio a formas nítricas y a la estimulación del crecimiento de la planta que demanda más bases intercambiables, adicionando hidrogeniones al medio. Esta acidificación no es conveniente debido a que, a menor pH menor disponibilidad de nutrientes esenciales como el P y S, además de los cationes Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ y mayor solubilidad de elementos tóxicos como Al³⁺ y Mn⁴⁺. El abono orgánico mantuvo el pH en valores cercanos a la neutralidad, similar al testigo, mientras que la aplicación del inóculo (T5 y T7) aumentó el pH a 7,0, sin diferencias significativas.

La adición de enmienda órgano-mineral aumentó la CE significativamente en comparación con los demás tratamientos debido posiblemente a la cantidad de Ca²⁺ en el complejo de cambio que pudo ser intercambiado con la solución del suelo, aumentó el contenido de sales. Estas CE estuvieron por encima de 3 dS·m⁻¹ que, a pesar de no ser considerado como suelo salino, si podría causar problemas para cultivos sensibles a la salinidad. Para el caso específico de la albahaca, esta mayor CE no afectó la producción de biomasa, aunque sí pudo haber tenido incidencia en su crecimiento.

La aplicación de urea incrementó la CE en un 27%, con relación al testigo y la urea recubierta y un 17% con respecto al lombricompost, aunque sin diferencias estadísticas entre ellos. De acuerdo con Fernandez *et al.* (2006), la aplicación de la urea no produce salinidad de suelos. La adición del inóculo diazotrofo + la urea recubierta (T6) obtuvo CE similar al obtenido con la urea recubierta sola, mostrando que los microorganismos no incrementaron la concentración de sales en la solución del suelo.

Tabla 49. Efecto de la aplicación de estrategias para mejorar la eficiencia de N en propiedades del suelo cultivado con albahaca.

Tratamiento	pH ¹	CE (dS/m) ²	MO (%) ²	NT (%) ³
T1	6,23±0,05 bc	1,24±0,20 b	3,12±0,19 b	0,21±0,05 b
T2	6,12±0,07 b	1,70±0,15 b	2,13±0,20 bc	0,17±0,01 b
T3	5,81±0,12 a	1,23±0,27 b	1,99±0,17 c	0,41±0,07 a
T4	6,49±0,08 bc	1,41±0,18 b	2,15±0,27 bc	0,34±0,05 ab
T5	7,04±0,00 c	3,43±0,12 a	5,14±0,19 a	0,16±0,04 b
T6	6,95±0,03 c	1,26±0,03 b	2,37±0,15 bc	0,22±0,07 b
T7	7,00±0,10 c	3,00±0,28 a	4,32±0,30 a	0,23±0,09 ab
F	9,35	23,34	32,54	2,54
p	0,01	<0,001	<0,001	0,05

T1= Riego a capacidad de campo (CC) + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea; T2= riego calculado con Kc + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea; T3= riego calculado con Kc + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta; T4= riego calculado con Kc + 200 kg·ha⁻¹ de N y fuente lombricompost; T5= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + enmienda órgano mineral (Bentonita - lombricompost); T6= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + consorcio diazotrofo proveniente de STARD; T7= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + consorcio diazotrofo proveniente de STARD + enmienda órgano mineral (Bentonita - lombricompost). Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas entre tratamientos. ¹Test de Dunnett (95%); ² Test de Tukey (95%); ³ Test de Duncan (95%)

La urea convencional y la urea recubierta redujeron la MOS, debido probablemente a la estimulación de la actividad microbiana con el suministro de N disponible. La aplicación de lombricompost también redujo la MOS con respecto al testigo, comportándose como los abonos industriales. Es conocido que la aplicación de abonos orgánicos aumenta los niveles de MOS. Sin embargo, este resultado depende del tipo de abono aplicado, de su composición y de la relación C/N que en última instancia determina el predominio de la mineralización o de la inmovilización de nutrientes en el suelo. En el caso del lombricompost utilizado, su relación C/N fue baja, lo que estimuló la mineralización de gran parte de los compuestos orgánicos, lo que se tradujo en bajo aporte orgánico permanente en el suelo.

La aplicación del inóculo contribuyó al aporte orgánico más que la urea recubierta sola, pero sin llegar a igualar al testigo, indicando predominio de mineralización de la MOS nativa lo que podría llegar a ser contraproducente, ya que la reducción de los niveles de MOS, inducen a la pérdida de la estructura y por tanto de las relaciones de porosidad y se ven afectadas las propiedades hidrodinámicas principalmente. De acuerdo con Castilla (2006a), las bacterias del género *Azotobacter sp* se multiplican rápidamente en el suelo y puede favorecer la solubilidad y mineralización de la materia orgánica agregada al suelo como abono, así como la MOS nativa. La aplicación de dosis adecuadas es importante para evitar la pérdida de estabilidad estructural y desequilibrios ecológicos en las poblaciones rizosféricas (Burbano, 2006). La aplicación de microorganismos debe considerar siempre la trilogía planta-suelo-microorganismos. No obstante, es posible que una de las limitaciones de estos CD es la falta de transferencia total de N fijado a la planta, como sucede con otros diazotrofos como *Azospirillum sp* (Sánchez *et al.*, 2006).

Los tratamientos con aplicación de la enmienda órgano mineral (T5 y T7) fueron los que obtuvieron mayores porcentajes de MOS, doblando su contenido con respecto a los fertilizantes de síntesis y al abono orgánico. Estos resultados posiblemente se deban a la capacidad de la bentonita de realizar enlaces con los terminales orgánicos del lombricompost, protegiéndolo de la actividad microbiana y simulando los complejos órgano-minerales que se forman naturalmente en el suelo que impide la oxidación de la MOS. A pesar de no encontrarse diferencias estadísticas entre T5 y T7, la aplicación del inóculo diazotrofo redujo el contenido de MOS. La aplicación de microorganismos puede traer beneficios al suelo como la regulación de los ciclos de elementos como N, P y S. Sin embargo, se debe considerar las dosis de aplicación, puesto que aumentar en exceso la población microbiana induce al consumo de formas inorgánicas de los nutrientes esenciales, reduciendo su disponibilidad para las plantas. Este consumo es necesario para el proceso de mineralización de la MOS, tanto de la aplicada como de la nativa del suelo, llegando a producir "efecto primming", lo que resulta contraproducente para la conservación de las propiedades del suelo.

El contenido de NTS estuvo entre 0,16% y 0,41% para los tratamientos T5 y T3 respectivamente, encontrándose diferencias estadísticas entre ellos. La urea recubierta fue el tratamiento que brindó mayor cantidad de NTS, duplicando

el valor con respecto al testigo. Este resultado indica la capacidad de estos fertilizantes de liberar gradualmente el N permitiendo a las plantas tener mayor posibilidad de absorción. Sin embargo, resulta importante definir el tiempo de aplicación de estos fertilizantes para que la liberación de N coincida con el momento de mayor necesidad de la planta. En el presente trabajo, a pesar de que fue aplicado con cinco días de antelación al trasplante, es posible que no fuera suficiente, y que se promovió la inmovilización del N, ya que los rendimientos obtenidos por este tratamiento no fueron los más altos.

La aplicación del lombricompost también dejó N residual en el suelo en el tiempo similar a la urea recubierta, aunque no fue estadísticamente diferente del testigo, ni de la urea convencional. Es posible que el proceso de inmovilización haya predominado en el suelo, dejando el NT de forma orgánica principalmente, lo que repercutió en la disponibilidad de N para la planta y obtuvo los menores rendimientos. Yang *et al.* (2017) aseguran que la mineralización es el proceso regulador de la disponibilidad de N para las plantas.

La aplicación de la enmienda órgano-mineral junto a la urea recubierta (T5) fue el tratamiento que obtuvo el menor valor residual de N, pero a su vez, altos rendimientos en planta. Es posible que la enmienda órgano-mineral, en especial la bentonita, contribuyera a la retención de amonio y a hacer más lento el proceso de inmovilización, permitiendo mayor absorción por la planta. Esto pudo reducir el NT después del primer corte de la albahaca. Al adicionar el inóculo diazotrofo, los niveles de NT crecieron debido posiblemente al aporte de la masa microbiana adicionada. Chen *et al.* (2014) encontraron incrementos significativos en el NT orgánico (2,7% - 25,6%) y en el N disponible (8,2% - 29,0%) en suelos cultivados con albahaca y relacionan este resultado con la capacidad de la planta de generar exudados al suelo, los cuales incrementan, en primer lugar, la biomasa microbiana especialmente aquellos organismos relacionados con el ciclo del N como *Azotobacter sp.*, bacterias nitrificantes y denitrificantes, y en segundo lugar, gracias a la presencia de metabolitos secundarios, incrementan la actividad de la ureasa y proteasa, enzimas importantes en la mineralización de los compuestos orgánicos. Los mismos autores aseguran que la albahaca al ser una planta con alta concentración de polifenoles, dinamiza el ciclo del N en el suelo.

6.4.9. Efecto de estrategias empleadas en la eficiencia de la Fertilización Nitrogenada (FN) de albahaca

Las El estuvieron por debajo de 0,20 Mg de MS por kg de N absorbido (Figura 72). No se encontraron diferencias estadísticas entre la urea convencional, la urea recubierta y el lombricompost, ni de estos con el testigo (T1) (C.V.= 19,1%). Vale la pena resaltar que al tratamiento T1 se le aplicó una mayor cantidad de agua, lo que pudo haber incidido en la absorción de N y en la producción de biomasa, como lo han sugerido Ekren *et al.* (2012), donde demuestran que, a mayor lámina de agua aplicada, mayor rendimiento es posible obtener. De los tres abonos empleados individualmente, el lombricompost fue el que obtuvo mayor eficiencia, debido posiblemente al mejoramiento en las propiedades físicas del suelo y en menor medida al aporte de N.

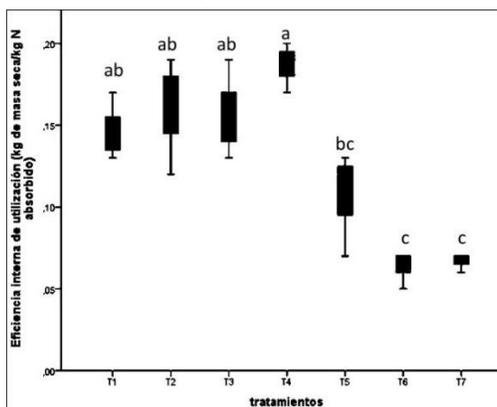


Figura 72. Efecto de estrategias para optimizar la FN en la eficiencia interna de la FN en albahaca. MS (F= 12,0; p<0.001). T1= Riego a capacidad de campo (CC) + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea; T2= riego calculado con Kc + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea; T3= riego calculado con Kc + 100 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta; T4= riego calculado con Kc + 200 kg·ha⁻¹ de N y fuente lombricompost; T5= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + enmienda órgano mineral (Bentonita - lombricompost); T6= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + consorcio diazotrofo proveniente de STARD; T7= riego calculado con Kc + 50 kg·ha⁻¹ de N y fuente urea recubierta + consorcio diazotrofo proveniente de STARD + enmienda órgano mineral (Bentonita – lombricompost). Letras iguales indican que no se encontraron diferencias estadísticas con un nivel de confianza del 90% (Test de Duncan).

El uso de más estrategias para mejorar la FN no tuvo repercusión en la eficiencia, por el contrario, los valores hallados fueron más bajos. Al igual que con la estevia, no se encuentran valores de referencia para la albahaca, por lo que no es posible indicar cual valor es el adecuado. Si se considera la masa producida y el N absorbido, los valores alcanzados por los tratamientos T5, T6 y T7 serían los apropiados. Las estrategias aplicadas de la enmienda órgano mineral y el CD obtuvieron valores diferentes de EI, aunque sin diferencias estadísticas, debido probablemente a la dispersión de los datos. Para conocer el efecto de las estrategias en la eficiencia de la FN sería necesario realizar aplicaciones periódicas de ellas en el largo tiempo (Sepaskhah y Barzegar 2010).

6.4.10. Efecto de estrategias empleadas en el uso eficiente del agua en albahaca

La Figura 73 muestra la eficiencia del uso del agua para la MF y MS de albahaca. En el caso de la MF, los valores estuvieron entre 5,85 y 7,68 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, correspondientes a T6 y T1, respectivamente. El testigo no presentó diferencias con los demás tratamientos, indicando que es posible reducir el volumen de agua a aplicar usando Kc sin alterar la eficiencia. Daneshnia *et al.* (2015) encontraron eficiencias más bajas, del orden de 2,33 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ en cultivos de albahaca asociados con trébol, utilizando láminas de riego que suministraban el 100% de la lámina evaporada.

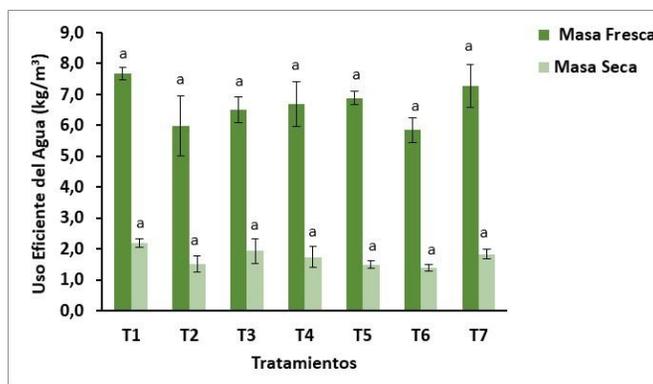


Figura 73. Efecto de estrategias para optimizar la FN en el uso eficiente del agua en albahaca.

MF ($F= 1.30$; $p=0.32$) y MS ($F= 1.37$ $p=0.29$). T1= Riego a capacidad de campo (CC) + 100 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N y fuente urea; T2= riego calculado con Kc + 100 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N y fuente urea; T3= riego calculado con Kc + 100 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N y fuente urea recubierta; T4= riego calculado con Kc + 200 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N y fuente lombricompost; T5= riego calculado con Kc + 50 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N y fuente urea recubierta + enmienda órgano mineral (Bentonita - lombricompost); T6= riego calculado con Kc + 50 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N y fuente urea recubierta + consorcio diazotrofo proveniente de STARD; T7= riego calculado con Kc + 50 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N y fuente urea recubierta + consorcio diazotrofo proveniente de STARD + enmienda órgano mineral (Bentonita – lombricompost). Letras iguales indican que no se encontraron diferencias estadísticas con un nivel de confianza del 90% (Test de Duncan).

No se encontraron diferencias estadísticas entre abonos, aunque los de liberación lenta (urea recubierta y lombricompost) obtuvieron 8,0% y 10,6% más kilogramos de MF por m^3 de agua aplicado que la urea convencional, respectivamente (C.V.= 23,3%). La aplicación de la enmienda órgano-mineral obtuvo UEA cercano a 7,0 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, aunque sin diferencias estadísticas con el lombricompost, mientras que el CD obtuvo menos de 6,0 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ sin diferencias con los tratamientos que emplearon el 100% de la dosis y abonos de síntesis industrial. El aumento de las poblaciones microbianas en el suelo incrementa proporcionalmente la demanda de nutrientes y agua, reduciendo la productividad.

Con relación a la MS, el uso eficiente de agua estuvo entre 1,39 y 2,19 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para T6 y T1, resultados similares a los de MF. Nuevamente el testigo no presentó diferencias estadísticas con ningún tratamiento. Los abonos de liberación lenta (T3 y T4) estuvieron 21,8% y 13,2% por encima de la urea convencional, debido a la capacidad de estos abonos de suministrar gradualmente el agua y el N, evitando su pérdida. La aplicación de la enmienda y el CD, de manera independiente alcanzaron valores similares, pero cuando fueron aplicados simultáneos, mantuvieron la productividad del agua sin diferencias con el testigo, mostrando la posibilidad de reducir la cantidad de agua usando estas estrategias.

6.4.11. Propuesta de plan de manejo para la Fertilización Nitrogenada (FN) en cultivos de estevia y albahaca

En las Tablas 50 y 51 se muestran propuestas de plan de manejo de la FN para la estevia y albahaca respectivamente, de acuerdo a los resultados obtenidos durante la investigación. Para evitar la lixiviación del N y la contaminación del agua, el plan de FN debe empezar por el manejo del agua. El uso de los Kc durante el ciclo de cultivo puede servir de guía para el cálculo de los volúmenes de agua a aplicar. La aplicación del agua con sistemas de riego localizado de alta frecuencia sería lo más recomendable. El uso de acondicionadores de suelo que contribuyan tanto a la retención como al aporte de N también es recomendable para la reducción de la DN y reducir las pérdidas de N por lixiviación. El uso de enmiendas órgano-minerales puede ser una alternativa interesante para contribuir a la retención y mejorar la eficiencia en la utilización del nutriente por la planta. Como complemento a la fertilización, se recomienda el uso de CD provenientes de STARDM, puesto que brindan buenos resultados, al poder ser aplicados junto a fertilizantes nitrogenados como la urea o la urea recubierta. Esta aplicación permite también reducir la DN a aplicar hasta en un 50%.

Tabla 50. Plan de manejo de la FN para estevia.

Criterio	Descripción
Manejo del agua	Utilización del Kc del cultivo: 0,86 para etapa de desarrollo, 1,24 para madurez y 0,85 para cosecha
DN	100 kg·ha ⁻¹
Tipo de fertilizante	Urea ya sea convencional o recubierta
Uso de enmienda órgano mineral	Elaborada a partir de lombricompost y montmorillonita en proporción 1:1. Su aplicación a suelo aproximada de 2,68 Mg·ha ⁻¹
Uso de CD provenientes de STARDM	18,5 L·ha ⁻¹

Tabla 51. Plan de manejo de la FN para albahaca.

Criterio	Descripción
Manejo del agua	Utilización del Kc del cultivo: 0,46 para etapa de desarrollo, 0,59 para madurez y 0,42 para cosecha
DN	75 kg·ha ⁻¹
Tipo de fertilizante	Urea ya sea convencional o recubierta
Uso de enmienda órgano mineral	Elaborada a partir de lombricompost y montmorillonita en proporción 1:1. Su aplicación a suelo aproximada de 1,34 Mg·ha ⁻¹
Uso de CD provenientes de STARDM	18,5 L·ha ⁻¹

6.5. CONCLUSIONES

El manejo del agua es la estrategia más importante para la prevención de la lixiviación del N en sistemas productivos agrícolas. La utilización de enmiendas organominerales fue la estrategia que redujo más la lixiviación, gracias a su alta CIC que retuvo agua y el N amoniacal. En cuanto al tipo de fertilizante, la urea recubierta logró retener más N en el suelo que la urea convencional. Los tratamientos que combinaron mayor número de estrategias obtuvieron mejores resultados en la prevención de la lixiviación tanto en estevia como en albahaca. Para ambos cultivos el empleo de estrategias para aumentar la eficiencia de la fertilización no tuvo efecto en la AP. Sin embargo, a mayor número de estrategias, el comportamiento de la MF y MS fue mejor, siendo la aplicación de enmienda órgano-mineral la que más contribuyó a la producción de los cultivos. En cuanto al tipo de fertilizante, la urea convencional y el inóculo permitieron obtener mayor rendimiento que la urea recubierta y el lombricompost.

En las condiciones finales del suelo los resultados indican que las estrategias deben ser manejadas con cuidado. Los valores de pH, CE, MOS y NTS se incrementaron con el uso de la enmienda órgano mineral compuesta por bentonita y lombricompost. La urea convencional aumentó la CE en mayor proporción que el inóculo, la urea recubierta y el lombricompost. La aplicación del abono orgánico incrementó la MOS, aunque es importante indicar que este aumento puede ser temporal. El número de estrategias no tuvo influencia en el contenido final de NTS para ambos cultivos. Con el empleo de más cantidad de estrategias no siempre se obtiene los mejores resultados. Es posible que la lixiviación y el riesgo de contaminación de aguas profundas se reduzcan, pero puede interferir con los rendimientos de los cultivos, lo que perjudicaría al productor.

7. CONSIDERACIONES FINALES

El primer objetivo específico estuvo relacionado con la determinación de las curvas experimentales del coeficiente del cultivo para el cálculo de las láminas de riego para las diferentes etapas fenológicas de estevia y albahaca. En primer lugar, se realizó un experimento en campo, en un cultivo comercial de aromáticas en el corregimiento de Juanchito, donde a partir de balances hídricos, y con el uso de LD se determinó la primera aproximación a los valores de los Kc para ambas especies (Tabla 52 y 53 experimento 1).

En el caso de la estevia, el mayor consumo de agua ocurrió en su madurez, entre los 55 y 72 días después del trasplante, cuyo coeficiente hallado estuvo por encima de 1,0. En las etapas iniciales y de senescencia, el consumo de agua es menor, siendo similares sus valores. En la albahaca, el consumo de agua durante su ciclo productivo antes del primer corte es similar y no es altamente demandante. Estos resultados, sirven de guía para realizar un manejo adecuado del recurso hídrico, y se presentó adicionalmente la curva del Kc en función de los grados-día con el fin de poder extrapolar los resultados a diferentes condiciones biofísicas.

Tabla 52. Valores promedio de coeficientes de cultivo (Kc) por etapa fenológica para estevia cultivada en el Valle del Cauca Colombia.

Etapas fenológicas (días después del trasplante)	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4	Experimento 5	Experimento 6	Promedio
3 - 54	0,86	0,85	0,99	0,99	0,67	1,11	0,92±0,08
55 - 72	1,24	1,10	1,43	1,46	0,83	1,15	1,19±0,12
73 - 96	0,85	1,01	0,98	0,99	0,62	1,04	0,93±0,08

Los Kc hallados se emplearon en los experimentos siguientes llevados a cabo en los años 2015, 2016 y 2017, bajo condiciones de invernadero. Al cambiar las condiciones ambientales, especialmente el aporte de la lluvia y las altas temperaturas, el volumen de riego calculado con estos Kc no fue suficiente, por lo que se hizo necesario aplicar, en algunas ocasiones, volúmenes más altos de riego para evitar el estrés hídrico en las plantas. Una vez terminados los experimentos se analizaron los registros de agua aplicada y la evapotranspiración dentro del invernadero y se recalcularon los Kc. Con excepción del experimento 5, los Kc para estevia en las diferentes etapas fenológicas fueron más altos, aunque cercanos, a los hallados en el primer experimento. En la albahaca, los Kc hallados en cada experimento fueron muy similares, destacándose que es en la etapa de madurez donde mayor consumo de agua se presentó. No obstante, en comparación con la estevia, la albahaca es una planta con menor demanda de agua (Tabla 55).

Tabla 53. Valores promedio de coeficientes de cultivo (Kc) por etapa fenológica para albahaca cultivada en el Valle del Cauca Colombia.

Etapas fenológicas (días después del trasplante))	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4	Experimento 5	Experimento 6	Promedio
1 - 25	0,46	0,57	0,61	0,42	0,38	0,44	0,48±0,04
26 - 50	0,59	0,74	0,57	0,70	1,00	0,72	0,72±0,07
51 - 71	0,42	0,72	0,50	0,50	0,39	0,61	0,52±0,06

Los valores promedio de Kc registrados en las tablas anteriores son más ajustados puesto que fueron determinados en años diferentes. Con estos resultados los productores pueden a partir de estos valores realizar una mejor estimación para que el agua aplicada sea mejor aprovechada por las plantas y reduzca sustancialmente las pérdidas de nutrientes por lixiviación, especialmente el N, aumentando su eficiencia de uso y reduciendo costos de producción.

El segundo objetivo se realizó una propuesta de plan de FN para estevia y albahaca teniendo en cuenta la aplicación de FLL. Se montaron cinco experimentos, dos relacionados con la determinación de la DN apropiada, dos relacionados con el uso de DN y fuentes diferentes de N, incluyendo abonos orgánicos y FLL y el último para estudiar el proceso de mineralización de diferentes DN de abonos orgánicos para determinar tiempo de aplicación al suelo para mayor disponibilidad de nutrientes para las plantas. Los resultados de estas experiencias se resumen en las Tablas 54 y 55 donde se muestra la DN, fuente, modo de aplicación y se realizó las recomendaciones pertinentes para los fertilizantes y abonos evaluados. En esta etapa de experimentación las láminas de riego empleadas fueron calculadas a partir de

Kc obtenidos en otras condiciones biofísicas o fueron calculadas para llevar el suelo a CC. Los ciclos de humedecimiento y secado junto a mayores láminas de riego, hicieron que se presentara lixiviación más allá de la zona de raíces, resaltando el papel importante del agua en el control de la lixiviación de nitratos.

La recomendación de DN para estevia para las condiciones climatológicas y con las características físico-químicas del suelo estudiado estuvieron entre 50 y 150 kg·ha⁻¹, puesto que estas DN presentaron el mejor comportamiento de variables agronómicas, la mayor concentración de N en las hojas y las mayores eficiencias calculadas. La respuesta agronómica de estevia fue indiferente a las fuentes nitrogenadas, ya sea de liberación rápida o lenta. La respuesta de cada fuente nitrogenada utilizada está en función de su forma y época de aplicación, las cual debe ser entre 2 a 5 días de antelación al trasplante para los fertilizantes de síntesis y entre dos y tres semanas para los abonos orgánicos, que fueron los que presentaron menor lixiviación de nitratos y dejaron mejores condiciones en el suelo al cabo del tiempo experimental.

Tabla 54. Plan de fertilización para la estevia, considerando los FLL.

DN Recomendada (kg/ha de N) en suelos con contenido medio de N	Fuentes	Forma de aplicación	Frecuencia
50 - 100	Urea	3 días antes del trasplante incorporada ó disuelta en la lámina de riego	Renovar aplicación en cada corte (aproximadamente cada 100 días)
250 - 300	Lombricompost	2 -3 semanas antes del trasplante, mezclados en los primeros 15 cm de suelo	
250 - 300	Gallinaza	1 - 2 semanas antes del trasplante mezclados en los primeros 15 cm de suelo	
50 - 100	Sulfato de amonio	1 - 2 días antes del trasplante, disuelta en el agua de riego	
100 - 150	Urea recubierta	5 - 8 días antes del trasplante para dar tiempo a disolución	

La DN recomendada para el cultivo de albahaca en las mismas condiciones biofísicas anteriores fue de 100 kg ha⁻¹. Esta DN brindó la menor pérdida de nitrato por lixiviación, se obtuvo las mayores respuestas agronómicas de la planta y no alteró significativamente las propiedades del suelo, dejando incluso niveles medios de N en el mismo. Además, presentó las mayores eficiencias de FN. Los abonos orgánicos evaluados presentaron la mayor mineralización del N en las cuatro primeras semanas, y al cabo de las 16 semanas ya se había mineralizado más del 50% del N potencialmente mineralizable.

La respuesta agronómica de albahaca a las fuentes nitrogenadas no fue uniforme para todas las variables evaluadas. Los abonos orgánicos obtuvieron mayor contenido de MF mientras que la urea de liberación lenta y el sulfato de amonio brindaron mejores resultados en la obtención de MS. Estos resultados son importantes considerarlos, ya que, dependiendo del destino final de la albahaca o su forma de comercialización, el uso de una determinada fuente puede favorecer la producción de MF o MS.

El tercer objetivo específico se evaluó la aplicación de enmiendas órgano-minerales en la FN y la reducción de la lixiviación en ambos cultivos. Este objetivo se desarrolló en dos fases, la primera relacionada con el estudio de proporciones de dicha enmienda en el suelo sin planta y en la segunda su efecto en cultivo de estevia y albahaca. En la primera fase se encontró que la aplicación de enmiendas órgano minerales, mejoró algunas propiedades del suelo, al cabo de cuatro meses como el contenido de MOS, la CICE y la concentración de potasio. Las enmiendas con lombricompost resultaron mejor, al presentar menor lixiviación y mejor comportamiento en las propiedades del suelo. La proporción utilizada con mejores resultados conseguidos fue en la relación lombricompost: bentonita de 1:1, utilizando 4,0 g de enmienda órgano-mineral por kg de suelo.

Tabla 55. Plan de fertilización para la albahaca, considerando los FLL

DN Recomendada (kg/ha de N) en suelos con contenido medio de N	Fuentes	Forma de aplicación	Frecuencia
100	Urea**	3 - 5 días antes del trasplante incorporada ó disuelta en la lámina de riego	Renovar aplicación en cada corte (aproximadamente cada 80 días)
200 - 250	Lombricompost*	2 - 3 semanas antes del trasplante, mezclados en los primeros 15 cm de suelo	
250 - 300	Gallinaza*	1 - 2 semanas antes del trasplante mezclados en los primeros 15 cm de suelo	
100	Sulfato de amonio**	1 - 2 días antes del trasplante, disuelta en el agua de riego	
100	Urea recubierta**	5 - 8 días antes del trasplante para dar tiempo a disolución	

*Recomendados para su comercialización en fresco; **comercialización deshidratada o extracción de aceites.

Para el cultivo de estevia, la dosis de 2,68 Mg·ha⁻¹ de enmienda órgano mineral alcanzó los mejores resultados agronómicos, condiciones de suelo finales, adecuada eficiencia de la FN y mayor productividad del agua, la cual permitió reducir la DN del fertilizante hasta en un 50% y aumentó la CIC significativamente, aumentando la retención de nutrientes y agua. Las eficiencias de la FN en estevia se vieron afectadas positivamente por la aplicación de las enmiendas órgano-minerales, donde el empleo del 50% de la DN del fertilizante acompañada de enmienda, fueron las más altas. De igual manera, el tipo de abono y el empleo de las enmiendas órgano-mineral mejoró la eficiencia del uso del agua, donde la urea recubierta resultó mejor en este indicador, aumentando la eficiencia en 2,5%. En el cultivo de albahaca, la dosis de enmienda órgano mineral que mejores resultados agronómicos y ambientales brindó fue de 1,34 Mg·ha⁻¹, donde se logró un aumento de la CIC del 40% y reducir la DN de la FN en un 25 %. La mayor eficiencia agronómica y el mejor uso del agua se obtuvieron con el uso del 50% de la DN junto a la enmienda órgano mineral, independiente del tipo de fertilizante utilizado.

El cuarto objetivo específico evaluó el potencial de uso de CD proveniente de STARDM como complemento a la FN en estevia y albahaca y su efecto en suelo. En estevia, se encontró mejores resultados aplicando 18,5 L·ha⁻¹ de inóculo + 112 kg·ha⁻¹ de N. Los resultados obtenidos sugieren que posiblemente la aplicación de estos CD debe realizarse con más tiempo de antelación al trasplante, para obtener mejor respuesta en la planta. El uso de sólo CD mantuvo el pH similar al testigo y presentó el menor valor de CE, indicando menor disponibilidad de nutrientes para la planta, lo cual se vio reflejado en el porcentaje de MS.

En albahaca se encontró mejores resultados aplicando el equivalente a 18,5 L·ha⁻¹ de inóculo + 75 kg·ha⁻¹ de N. La aplicación del CD tuvo incidencia en la concentración de NF, resultado de importancia, ya que esta alta concentración de N está directamente relacionada con la generación de aceites y extractos aromáticos apetecidos en el mercado. El uso de CD no acidificó el suelo ni incrementó la MOS pero logró dejar una reserva de N que puede ser utilizada por las próximas cosechas (efecto residual). El efecto benéfico de la aplicación del CD en ambos cultivos pudo deberse al mantenimiento de la fertilidad del suelo, a la protección contra fitopatógenos, a la habilidad para disolver minerales ricos en P y Zn y promover su absorción, estimular la producción de fitohormonas como auxinas y giberelinas y favorecer la toma del Fe⁺³, elemento importante en la nutrición de las plantas.

El último objetivo específico se evaluó la combinación de las estrategias utilizadas durante la investigación para la formulación de una propuesta de fertilización integral que contemple ambas visiones, la agronómica y la ambiental, y contribuir a la sostenibilidad de los sistemas productivos. Este plan integral contempló, en primer lugar, el manejo del agua de riego, mediante el uso de los Kc, para cada etapa fenológica. También consideró las DN y fuentes nitrogenadas que obtuvieron menor lixiviación de nitrato, mejores características agronómicas, mayor eficiencia de fertilización y de uso de agua y que afectaran positivamente las propiedades del suelo, después de la cosecha. Finalmente, este plan integral recomienda el uso de enmiendas órgano-minerales y CD provenientes de STARDM en adecuadas dosis que contribuya a reducir la DN de fertilizante y genere menor pérdidas por lixiviación.

El manejo del agua es la estrategia más importante para la prevención de la lixiviación del N en sistemas productivos agrícolas. Sin embargo, el método y la frecuencia de aplicación deben ser tenidas en cuenta, en suelos con presencia

de arcillas expansivas para evitar la formación de grietas que pueden aumentar el NL. De todas las estrategias, la utilización de enmiendas órgano-minerales fue la que mejor comportamiento tuvo a la hora de reducir la lixiviación, gracias a su alta CIC que retuvo agua y el N amoniacal. En cuanto al tipo de fertilizante, la urea recubierta logró retener más N en el suelo que la urea convencional. Los tratamientos que combinaron mayor número de estrategias obtuvieron mejores resultados en la prevención de la lixiviación tanto en estevia como en albahaca. A mayor número de estrategias, el comportamiento de la mayoría de las variables agronómicas fue mejor, siendo la aplicación de enmienda órgano-mineral la que más contribuyó a la producción de los cultivos. En cuanto al tipo de fertilizante, la urea convencional y el CD permitieron obtener mayor rendimiento que la urea recubierta y el lombricompost.

En las condiciones finales del suelo, las diferentes estrategias obtuvieron resultados diferentes. La enmienda-órgano mineral incrementó el pH, la CE, la MOS y el NTS. La urea convencional aumentó la CE en mayor proporción que las demás estrategias. La aplicación del abono orgánico incrementó la MOS, aunque es importante indicar que este aumento puede ser temporal, debido al proceso de mineralización. El número de estrategias no tuvo influencia en el contenido final de NTS para ambos cultivos. Con el empleo de más cantidad de estrategias no siempre se obtiene los mejores resultados. Es posible que la lixiviación y el riesgo de contaminación de aguas profundas se reduzcan, pero puede interferir con los rendimientos de los cultivos, lo que perjudicaría al productor.

En las tablas 56 y 57 se muestran los costos comparativos entre la propuesta de esta investigación y la de un productor comercial a gran escala de estevia y albahaca. En el cultivo de estevia el productor elegido fue el señor Yimmi Zape propietario de la finca “La Hacienda” en el municipio de Villa Rica (Cauca). El sistema de riego utilizado por el productor en estevia es por surcos, donde se hace aplicaciones excesivas de agua, de más de 123000 m³·ha⁻¹, lo que representa un costo importante dentro del sistema productivo. La dosis nitrogenada por abonos inorgánicos es similar a la propuesta; sin embargo, la aplicación de altas dosis de abono orgánico, incrementa la dosis nitrogenada y por consiguiente los costos de producción. Con la propuesta realizada, estos costos se reducen en un 70%, donde la principal reducción es en el rubro del consumo de agua.

Tabla 56. Cuadro comparativo de costos entre un cultivo comercial y la propuesta realizada para estevia.

	Volumen de agua		Fertilización Nitrogenada									TOTAL (\$·ha ⁻¹)
	(m ³ ·ha ⁻¹) [*]	Costo (\$·ha ⁻¹) ^{****}	DN (kg·ha ⁻¹) ^{*****}	\$·ha ⁻¹	Abono orgánico (kg·ha ⁻¹)	\$·ha ⁻¹	Bentonita (kg·ha ⁻¹)	(\$·ha ⁻¹)	Consorcio diazótrofo (L·ha ⁻¹)	(\$·ha ⁻¹)	\$ total	
Productor	123648 ^{**}	1480	105	135	5000	4000	-	-	-		4135	5615
Propuesta	4428 ^{***}	53	100	128	1340	1072	1340	268	18,5	162	1630	1683

*Asumiendo una ETo= 5 mm para la ecuación ETC = Kc * ETo; **Riego por surcos; *** Riego localizado; ****Costo en miles de \$ calculado con tasa de uso de agua de \$11,97/m³ de acuerdo a resolución 1571 de 2017 del MADS; *****DN utilizando urea.

Para el cultivo de albahaca el productor escogido es la empresa Nalpiherbs SAS cuyos cultivos se encuentran ubicados en el municipio de Honda (Tolima). Al comparar los costos de producción, la propuesta de esta tesis los reduce en 7%, sin contar con el poder residual que puede llegar a tener el uso de diazótrofos y de la bentonita en la siguiente cosecha. La reducción del volumen de agua aplicada disminuye los costos en alrededor del 45%, lo que permite un mejor uso del recurso hídrico y mayor sostenibilidad.

Tabla 57. Cuadro comparativo de costos entre un cultivo comercial y la propuesta realizada para albahaca

	Volumen de agua		Fertilización Nitrogenada									TOTAL (\$·ha ⁻¹)
	(m ³ ·ha ⁻¹) [*]	Costo (\$·ha ⁻¹) ^{***}	DN (kg·ha ⁻¹) ^{*****}	\$·ha ⁻¹	Abono orgánico (kg·ha ⁻¹)	\$·ha ⁻¹	Bentonita (kg·ha ⁻¹)	(\$·ha ⁻¹)	Consorcio diazótrofo (L·ha ⁻¹)	(\$·ha ⁻¹)	\$ total	
Productor	3818 ^{**}	46	100	128	2000	1600	-	-	-		1728	1774
Propuesta	2828 ^{**}	24	75	96	1340	1072	1340	268	18,5	162	1622	1646

*Asumiendo una ETo= 7 mm para la ecuación ETC = Kc * ETo; ** Riego localizado; ***Costo en miles de \$ calculado con tasa de uso de agua de \$11,97/m³ de acuerdo a resolución 1571 de 2017 del MADS; *****DN utilizando urea

Las siguientes recomendaciones brindan herramientas para continuar las líneas de investigación relacionadas con mejorar la eficiencia de la fertilización y reducir el NL:

- Realizar experimentos para el cálculo del Kc en diferentes periodos del año y en diferentes años para obtener una mayor aproximación a los valores por etapa fenológica para el cálculo del riego.
- Realizar experimentos para el cálculo del Kc en diferentes tipos de suelos, ya que cada uno tiene condiciones diferentes de retención de agua y están ubicados en diferentes condiciones climáticas. Esto permite obtener valores de Kc con mayor ajuste.
- Sería conveniente en la realización de nuevos balances hídricos considerar la construcción de LD más robustos y con uso de sensores para mayor precisión de los datos.
- Realizar experimentos con marcadores isotópicos de N para la determinación de DN y fuentes para lograr mayor exactitud.
- Realizar estudios con otros FLL y otros abonos orgánicos de uso en la agricultura del país, partiendo del conocimiento de las curvas de mineralización para determinar con mayor exactitud la DN y la época de aplicación.
- Realizar estudios con FLL que permitan establecer con mayor exactitud el tiempo de aplicación para una mayor efectividad en el uso del nutriente por la planta.
- Continuar con la investigación en el uso de minerales de arcilla en enmiendas órgano-minerales para mejorar la eficiencia de la fertilización no sólo en N, sino en otros elementos esenciales como el fósforo, el potasio y el azufre.
- Evaluar a largo plazo el efecto de la aplicación de las enmiendas órgano-minerales en las propiedades del suelo, especialmente en el pH y la CE.
- Evaluar otras técnicas de inoculación de CD que podrían ser más efectivas de aplicación como embeber las raíces en una solución bacteriana por 12 horas, antes del trasplante.
- Aplicar CD junto a microorganismos solubilizadores de fosfatos y micorrizas, ya que se ha demostrado sus beneficios en el desarrollo de plantas.
- Desarrollar estudios de campo que permitan evaluar la magnitud de los CD para lograr diferenciar su actividad de las poblaciones naturales.
- Continuar realizando estudios que permitan aumentar la eficiencia de la fertilización nitrogenada considerando otras fuentes de fertilizantes y abonos orgánicos, otras estrategias como la rotación y asociación de cultivos y el fraccionamiento de la fertilización.
- Realizar estudios de mayor tiempo para evaluar el efecto residual de las diferentes estrategias evaluadas en la presente investigación.
- Incluir variables como la actividad microbiana y el uso de isotopos marcados en los siguientes trabajos de investigación para conocer el comportamiento del proceso de nitrificación a través del tiempo.
- Realizar estudios de pérdidas de N por volatilización que permitan definir un plan integral de fertilización que incluya las estrategias, cuyas dosis sean definidas a partir del método del balance.
- Continuar trabajando en la determinación de eficiencias de fertilización nitrogenada en los cultivos de estevia y albahaca para definir rangos adecuados de uso del nutriente.
- Evaluar las diferentes estrategias en campo para realizar comparaciones más aproximadas con los cultivos comerciales de plantas aromáticas.
- Evaluar la fertilización integral con otros nutrientes como el fósforo y el potasio, con el uso de fertilizantes compuestos y estrategias que permitan optimizar la eficiencia de la fertilización múltiple.

8. LITERATURA CITADA

- Addison, S. & McDonald, I. (2010). Identifying diazotrophs by incorporation of nitrogen from $^{15}\text{N}_2$ into RNA. *Applied genetics and molecular biotechnology*, 87: 2313 – 2322.
- Ahirwar, N.K., Gupta, G., Singh, V., Rawley, R.K. & Ramana, S., (2015). Influence on growth and fruit yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plants by inoculation with *Pseudomonas fluorescens* (SS5): possible role of plant growth promotion. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 4: 720–730.
- Aladakatti, Y. R., Palled, Y. B., Chetti, M. B., Halikatti, S. I., Alagundagi, S. C., Patil, P. L., Patil V. C. & Janawade, A. D. (2012). Effect of irrigation schedule and planting geometry on growth and yield of stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni.). *Karnataka Journal of Agricultural Science*, 25 (1): (30-35).
- Alamri, S. & Mostafa, Y. (2009). Effect of nitrogen supply and *Azospirillum brasilense* Sp-248 on the response of wheat to seawater irrigation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 16: 101 – 107.
- Alarcón, V. (2013). Caracterización química proximal de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) orgánica en diferentes sistemas de producción. Tesis de grado. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Torreón, México.
- Alfaro, M., Salazar, F., Endress, E., Dumont, J.C. & Valdebenito, A. (2006). Nitrogen leaching losses on a volcanic ash soil as affected by the source of fertilizer. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 6(2): 54 – 63.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación FAO. Estudio Riego y Drenaje N° 56. 300 p.
- Almaguer, J. (2013). Fertilización nitrogenada, impactos sobre los rendimientos y el medio ambiente. *Revista Desarrollo Local Sostenible* 6(16): 1-8.
- Almendros, C. (2004). Investigaciones básicas sobre el origen y la estructura molecular de las formas estables de materia orgánica relacionadas con el proceso de secuestro de carbono en los suelos. *Edafología* 11(2): 229 – 248.
- Álvarez, J., Balanguera, L. & Pardo, C. (2010). Efecto de la propagación de la aplicación de diversas laminas y frecuencias de riego en la propagación del romero (*Rosmarinus officinalis* L.). *Revista. Ingeniería e. Investigación*, 30 (1):86-90.
- Andreu, J., Betran, J., Delgado, I., Espada, J., Gil, M., Gutierrez, M., Iguácel, F., Isla, R., Muñoz, F., Orus, F., Pérez, M., Quílez, D., Sin, E. & Yagüe, M. (2006). Fertilización nitrogenada. Guía de Actualización. Departamento de Agricultura y Alimentación. Gobierno de Aragón. Zaragoza. 196p.
- Anton a. & Lizaso, J. (2001). Nitritos, Nitratos y nitrosaminas. Fundación Ibérica para la seguridad alimentaria. Disponible en: <http://mie.esab.upc.es/ms/formacio/Control%20%20Contaminacio%20Agricultura/biblio/nitratos%20y%20nitrosaminas.pdf>. Fecha de consulta: marzo de 2013.
- Apaza, V. (2003). Evaluación agronómica de la estevia (*Stevia rebaudiana*, bert.) bajo tres niveles de fertilización nitrogenada en los yungas de La Paz. Trabajo de Grado. Universidad de Bolivia.
- Arauzo, M. & Valladolid, M. (2013). Drainage and N-leaching in alluvial soils under agricultural land uses: implications for the implementation of the UE Nitrates Directives. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 179: 94 – 107.
- Arauzo, M., Valladolid, M. & Martínez Bastida, J.J. (2011). Spatio-temporal dynamics of nitrogen in river-alluvial aquifer systems affected by diffuse pollution from agricultural sources: implications for the implementation of the Nitrate Directive. *Journal of Hydrology*, 411: 155–168.
- Araya, A., Stroosnijder, L., Girmay, G., & Keesstra, S. D. (2011). Crop coefficient, yield response to water stress and water productivity of teff (*Eragrostis tef* Zucc.). *Agricultural Water Management*, 98(5): 775–783.
- Arbat, G., Roselló, A., Domingo, F., Puig, J., González, E., Durán, M., Pujol, J. & Ramirez, F. (2013). Soil water and nitrate distribution under drip irrigated corn receiving pig slurry. *Agricultural water management*. 120: 11 – 22.
- Arias, E., Sadeghian, S., Mejía, B. & Morales, S. (2009). Lixiviación de nitrógeno en algunos suelos de la zona cafetera y su relación con la textura. *Cenicafé*, 60(3): 239 – 252.
- Aristizabal, A.J. (2009). Efecto de altas saturaciones de Mg^{+2} y Ca^{+2} en las propiedades físicas de un suelo del Valle del Cauca. Trabajo de maestría. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. 96p.
- Azeem, B., KuShaari, K., Man, Z. B., Basit, A. & Thanh, T. H. (2014). Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. *Journal of Controlled Release* 181: 11–21.
- Azizi-Zohan, a., Kamgar-Haghighi, a. a., & Sepaskhah, a. R. (2008). Crop and pan coefficients for saffron in a semi-arid region of Iran. *Journal of Arid Environments*, 72(3): 270–278.
- Bai, Y., Liang, J., Liu, R., Hu, C. & Qu, J. (2014). Metagenomic analysis reveals microbial diversity and function in the rhizosphere soil of a constructed wetland. *Environmental Technology*, 35(20): 2521 – 2527.
- Baniaghil, N., Arzanesh, N.H., Ghorbanli, M. & Shanbazi, M. (2013). The effect of plant growth promoting rhizobacteria on growth parameters, antioxidant enzymes and microelements of canola under salt stress. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 3(1):17-27.
- Barnes, R.T., Gallagher, M.E., Masiello, C.A., Liu, Z. & Dugan, B., (2014). Biochar-induced changes in soil hydraulic conductivity and dissolved nutrient fluxes constrained by laboratory experiments. *PLoS One* 9 (9), e108340.
- Barrientos, J.C., Reina, M. L. & Chacón, M. I. (2012). Potencial económico de cuatro especies aromáticas promisorias para producir aceites esenciales en Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 6(2): 225-237.
- Barrios, M., García, J. & Basso, G. (2012). Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el contenido de nitrato y amonio en el suelo y en la planta de maíz. *Bioagro*, 24(3): 213 – 220.
- Barroso, M., Martins, N., Barros, L., Antonio, A., Rodríguez, M., Sousa, M.J., Santos, C. & Ferreira, I. (2018). Assessment of the nitrogen fertilization effect on bioactive compounds of frozen fresh and dried samples of *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Food Chemistry* 243: 208–213.
- Battilani, A., Prieto, M., Argerich, C. Campillo, C. & Cantore, V. (2012). Tomate. En: Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E. y Raes, D. (Eds). Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación FAO. Estudio Riego y Drenaje N° 66. 530 p.
- Bazzo, B. & Ritchie, J.T. (2005). Impact of compost, manure and inorganic fertilizer on nitrate leaching and yield for a 6-year maize-alfalfa rotation in Michigan. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 180: 329–341.
- Bekhradi, F., Luna, M. C., Delshad, M., Jordan, M. J., Sotomayor, J. a., Martínez-Conesa, C. & Gil, M. I. (2015). Effect of deficit irrigation on the postharvest quality of different genotypes of basil including purple and green Iranian cultivars and a Genovese variety. *Postharvest Biology and Technology*, 100: 127–135.
- Berti, M., Hevia, F., Wilckens, R., Joublan, J.P., Serri, H. & Allende, J. (2000). Fertilización nitrogenada del cultivo de hierba de san juan (*hypericum perforatum* L.) en Chillan, provincia de Ñuble, Chile. *Ciencia e Investigación Agraria*, 27(2): 107-115.
- Bertola N., Ruiz F., & Contreras E.M (2004). Efecto de las condiciones ambientales sobre la velocidad de respiración de microorganismos nitrificantes. XIV Congreso Argentino de Saneamiento y Medio Ambiente, Buenos Aires. Memorias.
- Blanco, J.O. (2003). Manejo integral de suelos con énfasis en el cultivo del arroz. PRONATTA OFFSET LA OPINIÓN S.A. disponible en: agronet.gov.co/www/docs_si2/Manejo%20del%20suelos%20para%20arroz.pdf. Fecha de consulta: Julio 19 de 2016.
- Blasco, M. & Burbano, H. (2015). La vida en el suelo: Notas sobre su bioquímica y microbiología. Primera edición. Ed. La Castellana. Pasto 216 – 228.
- Bochetti, M. (2010). Análisis comparativo de la evapotranspiración obtenida mediante distintas ecuaciones empíricas aplicadas a la zona agrícola de Chillan. Universidad Católica de la Santísima Concepción. Concepción (Chile).
- Boeira, R.C. (2009). Lixiviação de nitrogênio em Latossolo incubado com lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 33: 947 – 958.
- Bolaños, M. & Castilla, L.A. (2006). La rizósfera. En: Biofertilización: alternativa viable para la nutrición vegetal. L.M. Castilla (Ed). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. L & L impresores: Ibagué, (Col).
- Bonilla, C., Sánchez, M. & Perlaiza, D. (2007). Evaluación de métodos de propagación, fertilización nitrogenada y fenología de estevia en condiciones del Valle del Cauca. *Acta agronómica*, 56(3): 131 – 134.
- Bonilla, R. & Guerrero, M. (2010). Albahaca (*Ocimum basilicum* L.) producción y manejo poscosecha. Produmedios. Bogotá p 48 – 64.
- Borda-Molina, D., Pardo, J., Martínez, M. & Montaña, J. (2009). Producción de un biofertilizante a partir de un aislamiento de *azotobacter nigricans* obtenido en un cultivo de estevia *rebaudiana*. Bert. *Universitas Scientiarum*, 14(1): 71 – 78.
- Bowers, T.H., Reid, N.M. & Lloyd – Jones, G. (2008). Composition of nifH in a wastewater treatment system reliant on N_2 fixation. *Applied Genetics and Molecular Biotechnology*, 79: 811 – 818.
- Brandle, J. (2005). Stevia, nature's natural low calorie sweetener.[En línea]: <http://www.certifiedorganicfoodstevia.fao>. Fecha de consulta: octubre 12 de 2013.

- Broadbent, F. E. (1986). Empirical modeling of soil nitrogen mineralization. *Soil Science*, 141:208 – 213.
- Bruun, S., Luxhøi, J., Magid, J., De Neergaard, A & Jensen, L. (2006). A nitrogen mineralization model based on relationships for gross mineralization and immobilization. *Soil Biology and Biochemistry*, 38: 2712 – 2721.
- Burbano, H. (2006). La acción de los microorganismos del suelo a favor de las plantas: conceptos básicos y posibilidades. En: Biofertilización: alternativa viable para la nutrición vegetal. L.M. castilla (Ed). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. L & L impresores: Ibagué, (Col).
- Burbano, H. (1998). Las enmiendas orgánicas. En: Fertilización de cultivos de clima frío. Guerrero T. (Ed). Monómeros Colombo Venezolanos: Bogotá. 330 – 370p.
- Cabanillas, C., Ledesma, A. & Stobbia, D. (2009). Residuos sólidos agropecuarios y agro-industriales reutilizados como biofertilizantes alternativos a la aplicación de urea en la producción de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) variedad Catamarca Inta (Hoja Ancha). [En línea]: <http://www.ambiente-augm.ufscar.br/uploads/A2-149.pdf>. Fecha de consulta: Marzo 18 de 2014.
- Cabrera, M. L. (1993). Modeling the flush of nitrogen mineralization caused by drying and rewetting soils. *Soil Science Society of America Journal*, 57: 63-66.
- Calvelo, R., Kaal, J., Camps Arbustain, M., Pardo, R., Aitkenhead, W., Hedley, M., Macias, F., Hindmarsh, J & Maciá, J. (2011). Contribution to characterisation of biochar to estimate the labile fraction of carbón. *Org. Geochem.* 42: 1331 – 1342.
- Campos, B., Aguilár, J., Algarra, M., Gonçalves, M., Rodríguez, E., Esteves Da Silva, E. & Bobos, L. (2013). Adsorption of uranyl ion on kaolinite, montmorillonite, humic acid and composite clay material. *Appl. Clay Sci.*, 85: 53- 63.
- Camps Arbustain, M., Ibarogitia, M., Madinabeitia, Z., Gil, M., Virgel, S., Morán, A., Calvero, R. & Macias, F. (2009). Laboratory appraisal of organic carbón changes in mixtures made with different inorganic wastes. *Waste manage.*, 29: 2931 – 2938.
- Cárdenas, D., Garrido, M., Bonilla, R. & Baldani, V. (2010). Aislamiento e identificación de cepas de *Azospirillum* sp. en pasto guinea (*Panicum maximum* Jacq.) del Valle del Cesar. *Pastos y forrajes*, 33(3): 1 – 17.
- Casaccia, J. & Alvarez, E. (2006). Recomendaciones técnicas para una producción sustentable del ka'a He'e (*Stevia rebaudiana* Bertoni.) en el Paraguay. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Subsecretaría de Estado de Agricultura. Dirección de investigación agrícola. Manual técnico N° 8.
- Cassan, F. y Diaz, M. (2016). Azospirillum sp. in current agriculture: From the laboratory to the field. *Soil Biology and Biochemistry* 103: 117 – 130.
- Cassán F., Perrig D., Sgroi V., Masciarelli O., Penna C. & Luna V. (2009). *Azospirillum brasiliense* Az39 and *Bradyrhizobium japonicum* E109 inoculated singly or in combination, promote seed germination and early seedling growth in corn (*Zea mays* L.) and soybean (*Glycine max* L.). *European Journal of Soil Biology*, 45:28–35.
- Castilla, L.A., Moller, E.A., Barona, G.A. y Hernández, L. (2009). Avances en la respuesta del cultivo de caña de azúcar, a la biofertilización con bacterias fijadoras de nitrógeno y hongo solubilizador de fósforo, Riopaila-Castilla S.A. Valle del Cauca Colombia. [En línea]: <http://www.biocultivos.com.co/dctos/biofertilizacion-con-bacterias-fijadoras-de-nitrogeno-y-hongo-solubilizador-de-fosforo.pdf>. Fecha de consulta: noviembre 9 de 2013.
- Castilla, L.A. (2006a). La biofertilización en el manejo integrado de nutrimentos para la nutrición vegetal. En: Biofertilización: alternativa viable para la nutrición vegetal. L.M. castilla (Ed). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. L & L impresores: Ibagué, (Col).
- Castilla, L.A. (2006b). Fertilización bio-orgánica en el cultivo del arroz. En: Biofertilización: alternativa viable para la nutrición vegetal. L.M. castilla (Ed). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. L & L impresores: Ibagué, (Col).
- Causapé, J., Sidoró, I. D., Uilez, Q., D. & Ragüés, A.R. (2002). Water and nitrogen management in the irrigation district n° V of Bardenas (Zaragoza, Spain) and environmental impact on water resources. In: F.J. Villalobos & L. Testi (eds.), Proc. VII Congr. European Soc. Agron.: 69-70. Junta de Andalucía. Córdoba.
- Cavero, J., Beltrán, A. & Aragón, R. (2003). Nitrate exported in drainage waters of two sprinkler – irrigated watersheds. *Journal of Environmental Quality*, 32: 916-926.
- Cavero, J., Barros, R., Sellam, F., Topcu, S., Isidoro, D., Hartani, T., Lounis, A., Ibrikci, H., Cetin, M., Williams, J.R. & Aragón, R. (2012). APEX simulation of best irrigation and N management strategies for off-site N pollution control in three Mediterranean irrigated watersheds. *Agricultural Water Management*, 103: 88 – 99.
- Cenoz, P. & Burgos, A. (2000). Influencia de la fertilización nitrogenada en el rendimiento de albahaca (*Ocimum basilicum* L.). *Boletín Horticola*, 8: 4 – 7.
- Cenoz, P. J.; Burgos, A. M. & López, A. E. (2005). - Influencia de la Fertilización Nitrogenada en el Rendimiento de Albahaca (*Ocimum basilicum*, L.). *Revista Horticola Argentina*, 24(56/57):18 - 20.
- Cerisola, C., García, M. & Filgueira, M. (2005). Distribución de la porosidad de un suelo franco arcilloso (alfisol) en condiciones semiáridas después de 15 años bajo siembra directa. *Ciencia del suelo (Argentina)*, 23(2): 167 – 178.
- Chaves, B., De Neve, S., Hofman, G., Boeckx, P & Cleemput, O. (2004). Nitrogen mineralization of vegetable root residues and green manures as related to their (bio)chemical composition. *European Journal of Agronomy*, 21: 161 – 170.
- Chen, Y., Lan, S., Wang, L., Dong, S., Zhou, H., Tan, Z. & Li, X. (2017). A review: Driving factors and regulation strategies of microbial community structure and dynamics in wastewater treatment systems. *Chromosphere*, 174: 173 – 182.
- Chen, X., Song, B., Yao, Y., Wu, H., Hu, J. & Zhao, L. (2014). Aromatic plants play an important role in promoting soil biological activity related to nitrogen cycling in a orchard ecosystem. *Science of Total Environment*, 472: 939 – 946.
- Chen, C.R. & Xu, Z.H. (2006). On the nature and ecological functions of soil soluble organic nitrogen (SON) in forest ecosystems. *Journal of Soil and Sediments*, 6: 63 – 66.
- Civeira, G. & Rodríguez, M. (2011). Nitrógeno residual y lixiviado del fertilizante en el sistema suelo-planta-zeolitas. *Ciencia del suelo (Argentina)*, 29(2): 285 – 294.
- Clementelli, A. & Zevallos, R. (2009). Fertilización nitrogenada mineral y orgánica en el cultivo de estevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni). *Universidad, Ciencia y Sociedad*, 1(1): 47 – 50.
- Coelho, T. L. & Do Logo, A. (2015). Characterization and hydraulic conductivity of tropical soils and bentonite mixtures for CCL purposes. *Engineering Geology*, 196: 251–267
- Colombani, N., Mastrocico, N., Di Giuseppe, D., Faccini, B. & Coltorti, M. (2014). Variation of the hydraulic properties and solute transport mechanisms in a silty-clay soil amended with natural zeolites. *Catena*, 123: 195 – 204.
- Colombani, N., Mastrocico, N., Di Giuseppe, D., Faccini, B. & Coltorti, M. (2015). Batch and column experiments on nutrient leaching in soils amended with Italian natural zeolites. *Catena*, 127: 64 – 71.
- Contreras, A. & Gómez, C. (2008). Evaluación de tres variedades de albahaca y dos dosis de fertilización en producción hidropónica y en suelo. Tesis de grado. [En línea]: <http://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/855/1/T2569.pdf>. Fecha de consulta: marzo 18 de 2014.
- Corporación Colombia Internacional (CCI). (2007). Albahaca (*Ocimum basilicum*). pp. 223-232. En: 7. Canasta de productos del Plan Horticola Nacional. Plan Horticola Nacional – PHN. Corporación Colombia Internacional (CCI). Bogotá, D.C.
- Cortéz, J. (2012). Análisis de crecimiento de cultivo de estevia (*Stevia rebaudiana*) con proyección agroindustrial en el Valle del Cauca. Tesis de grado. Universidad de Buenaventura. Cali Valle del Cauca. 84p.
- Cristobal-Acevedo, D., Palacios, O., Nikolskii, I., Gavi, F., Palma, D., Carrillo, E. y Peña, J. (2002). Lixiviación del nitrógeno en función del espaciamiento entre drenes subterráneos en Tabasco. *Agrociencia*, 36(3): 291 – 304.
- Czaban, J., Siebielec, G., Czyz, E. & Niedzwiecki, J. (2013). Effects of bentonite addition on Sandy soil chemistry in a long- term plot experiment (I): Effect on organic carbon and total nitrogen. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22(6): 1661 – 1667.
- Dalal, R.C., Allen, D.E., Wang, W.J., Reeves, S. & Gibson, I. (2011). Organic carbon and total nitrogen stocks in a vertisol following 40 years of no-tillage, crop residue retention and nitrogen fertilization. *Soil Tillage Research*, 112: 133 – 139.
- DANE – Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2017). Boletín mensual. Insumos y factores asociados a la producción agropecuaria. [En línea]: <http://www.agroneg.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>. Fecha de consulta Mayo 25 de 2017.
- DANE – Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2015). Cría de aves de corral y su primer nivel de transformación industrial. [En línea]: https://www.dane.gov.co/files/.../Anexos_CSPA_avicola_2005_2014p.xls. Fecha de consulta: Junio 4 de 2018.
- Daneshnia, F., Amini, A., & Chaichi, M. R. (2015). Surfactant effect on forage yield and water use efficiency for berseem clover and basil in intercropping and limited irrigation treatments. *Agricultural Water Management*, 160: 57–63
- Dar, E. A., Brar, A.S. & Singh, K.B. (2017). Water use and productivity of drip irrigated wheat under variable climatic and soil moisture regimes in North-West, India. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 248: 9–19.
- Das, K., Dang, R., Shivananda, T. N. & Sekeroglu, N. (2007). Influence of bio-fertilizers on the biomass yield and nutrient content in *Stevia rebaudiana* Bert. grown in Indian subtropics. *Journal of Medicinal Plants Research*, 1(1):5-8.
- Das K, Dang R, Shivananda T. (2008). Influence of biofertilizers on the availability of nutrients (N, P & K) in soil, in relation to growth and yield of *Stevia rebaudiana* grown in South India. *International Journal of Applied Research Natural Production*, 1(1): 20-24.

- Datnoff L.E., Elmer W.H., Huber & D.M. (2007). Mineral Nutrition and plant disease. The American Phytopathological Society. Ed Amer Phytopathological Society. St. Paul, Minnesota U.S.A. 278p.
- Davies, P. (2004). Estudios en domesticación y cultivo de especies medicinales y aromáticas nativas. Uruguay: INIA. p.19.
- Daza, M., Jurado, J. & Torres, V. (2015). Efecto de aplicación de diferentes láminas de riego en estevia (*Stevia rebaudiana* Bert.) bajo invernadero. *Revista Temas Agrarios*, 20(1): 83 - 92.
- Delgado, G. & Daza, M.C. (2012). Determinación del coeficiente de la evapotranspiración y lámina de riego para albahaca. (*Ocimum basilicum*). En. Memorias del XVI Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. La ciencia del suelo al servicio de la sociedad y del ambiente. Riohacha (Colombia) CD-R. octubre 3 – 6.
- Delin, S., Lindén, B. & Berglund, K. (2005). Yield and protein response to fertilizer nitrogen in different parts of a cereal field: potential of site-specific fertilization. *European Journal of Agronomy*, 22: 325 – 336.
- Delin, S. & Stenberg, M. (2014). Effect of nitrogen fertilization on nitrate leaching in relation to grain yield response on loamy sand in Sweden. *European Journal of Agronomy*, 52: 291- 296.
- Dentener, F., Drevet, J., Lamarque, J.F., Bey, I., Eickhout, B., Fiore, A.M., Hauglustaine, D., Horowitz, L.W., Krol, M., Kulshrestha, U.C., Lawrence, M., Galy-Lacaux, C., Rast, S., Shindell, D., Stevenson, D., Van Noije, T., Atherton, C., Bell, N., Bergman, D., Butler, T., Cofala, J., Collins, B., Doherty, R., Ellingsen, K., Galloway, J., Gauss, M., Montanaro, V., Müller, J.F., Pitari, G., Rodriguez, J., Sanderson, M. Solmon, F., Strahan, S., Schultz, M., Sudo, K., Szopa, S. & Wild, O. (2006). Nitrogen and sulfur deposition on regional and global scales: A multimodel evaluation. *Global Biogeochemical Cycle*, 20 (4): 1-21.
- Di Paolo, E. & Rinaldi, M. (2008). Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment. *Field crops Research*, 105: 202 – 210.
- Díaz-Zorita, M., Fernández-Canigia, M.V., Bravo, O.A., Berger, A. & Satorre, E.H. (2015). Field evaluation of extensive crops inoculated with *Azospirillum* sp. In: Cassan, F.D., Okon, Y., Creus, C.M. (Eds.), *Handbook for Azospirillum*, Technical Issues and Protocols. Springer Int. Publishing, Switzerland, pp. 435 - 445.
- Díaz, J. A. (2003). Informe técnico. Caracterización del mercado colombiano de plantas medicinales y aromáticas. IAvH. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá. Colombia.
- Divito, G & Sadras, V. (2014). How do phosphorus, potassium and sulphur affect plant growth and biological nitrogen fixation in crop and pasture legumes? A meta-analysis. *Field Crop Research*, 156: 161 – 171.
- Divito, G., Sainz, H., Echeverría, H., Studdert, G. & Wyngaard, N. (2011). Long-term nitrogen fertilization: Soil property changes in an Argentinean Pampas soil under no tillage. *Soil Tillage Research*, 114: 117 – 126.
- DNP – Departamento Nacional de Planeación. (2009). Política nacional para la racionalización del componente de costos de producción asociado a los fertilizantes en el sector agropecuario. CONPES 3577. Bogotá. 33p.
- Dobermann, A. (2007). Nutrient use efficiency-measurement and management. Proc. Of International Fertilizer Industry Association (IFA) Workshop on Fertilizer Best Management Practices. Brussels, Belgium. March 7-9.
- Dushyant, S. M., Kumar, S., Maurya, A. K. & Meena, K. R. (2014). Efficacy of organic manures on growth, yield and biomolecules of stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni). *Journal of Crop and Weed*, 10(1):107-110.
- Ekren, S., Sönmez, Ç., Özçakal, E., Kurttaş, Y. S. K., Bayram, E., & Gürgülü, H. (2012). The effect of different irrigation water levels on yield and quality characteristics of purple basil (*Ocimum basilicum* L.). *Agricultural Water Management*, 109, 155–161
- Eprikashvili, L., Zautashvili, M., Kordzakhia, T., Pirtskhalava, N., Dzagania, M., Rubashvili, I. & Tsvitsishvili, V. (2016). Intensification of bioproductivity of agricultural cultures by adding natural zeolites and brown coals into soils. *Annals of Agrarian Sciences*, 14: 67 – 71.
- Faccini, G., Garzón, S., Martínez, M. & Varela, A. (2007). Evaluation of the effect of a dual inoculum of phosphate-solubilizing bacteria and *Azotobacter chroococcum*, in crops of creole potato (papa criolla), yema de huevo variety (*Solanum phureja*). *Development in Plants and Soil Science*, 102, 301–308.
- FAO–United Nations Food and Agricultural Organization (2018). *FAOSTAT Agricultural Database*. En línea: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Consulta: marzo 14 de 2018.
- FAO – United Nations Food and Agricultural Organization (2017). *Current world fertilizer trends and Outlook to 2020*. Roma. 43p.
- FAO–Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2002). *Los fertilizantes y su uso*. Asociación internacional de la industria de fertilizantes. Roma 77p.
- Feng, W., Plante, A.F., Aufdenkampe, A. K. & Six, J. (2014). Soil organic matter stability in organo-mineral complexes as a function of increasing C loading. *Soil Biology & Biochemistry*, 69: 398-405.
- Fernández-Pacheco, D. G., Escarabajal-Henarejos, D., Ruiz-Canales, A., Conesa, J., & Molina-Martínez, J. M. (2014). A digital image-processing-based method for determining the crop coefficient of lettuce crops in the southeast of Spain. *Biosystems Engineering*, 117(C): 23–34.
- Fernández, L.C., Rojas, N.G., Roldán, T.G., Ramírez, M.E., Zegarra, H.G., Uribe, R., Reyes, R.J., Flores, D. & Arce, J.M. (2006). Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. Instituto Mexicano del Petróleo. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 184p.
- Ferreira, S., De Moraes, M., Guilherme, L., Pastorio, M., Aline, V., Massahiro, R. & Achre, D. (2015). Influência da adubação nitrogenada e época de cultivo sobre o rendimento de folhas de manjeriço (*Ocimum basilicum* var. verde Toscana) para fins medicinais. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 20(4): 389 – 396.
- Ferrera Sánchez, O. (2016) & I. Insights into microbial diversity in wastewater treatment systems: How far have we come? *Biotechnology Advances*, 34: 790 -802.
- Ferretti, G., Keiblinger, K., Zimmermann, M., Di Giuseppe, D., Faccini, B., Colombani, N., Mentler, A., Zechmeister-Boltenstern, S., Coltorti, M. & Mastrociccio, M. (2017). High-resolution short-term investigation of soil CO₂, N₂O, NO_x and NH₃ emissions after different chabazite zeolite amendments. *Applied soil ecology*, 119: 138 – 144.
- Figueroa, A., Álvarez, J., Forero, A., Salamanca, C. & Pinzón, L. (2012). Determinación del nitrógeno potencialmente mineralizable y la tasa de mineralización de nitrógeno en materiales orgánicos. *Temas Agrarios*, 17(1): 32 – 43.
- Flores, F., Pérez García, S., Villafranca Sánchez, M. & Fernández Pérez M. (2013). Bentonite and anthracite in alginate-based controlled release formulations to reduce leaching of chloridazon and metribuzin in a calcareous soil. *Chemosphere*, 92: 918 – 924.
- Florez, J.P., Corral, B. & Sapién, G. (2007). Mineralización del nitrógeno de biosólidos estabilizados con cal en suelos agrícolas. *Terra Latinoamericana*, 25: 409-425.
- Florez, J., Ojeda, W., López, I., Rojano, A. & Salazar, I. (2007). Requerimiento de riego para tomate bajo invernadero. *Terra Latinoamericana*, 25(2): 127 – 134.
- Fonnegra G. & Jiménez R. (2007). Plantas medicinales aprobadas en Colombia. Universidad de Antioquia. Medellín p.35-38.
- Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M., Cape, J., Reis, S., Sheppard, L., Jenkins, A., Grizzetti, B., Galloway, J., Vitousek, P., Leach, A., Bouwman, A., Butterbach-Bahl, K., Centener, F., Stevenson, D., Amann, M. & Voss, M. (2013). The global nitrogen cycle in the twenty first century. *Philosophical transactions of the Royal Society*. 368: 20130164.
- Fronza, D., & Folegatti, M. V. (2003). Water consumption of the stevia (*Stevia rebaudiana* (Bert.) Bertoni) crop estimated through microlysimeter. *Scientia Agrícola*, 60, 595–599.
- Fuentes, W. & González, O. J. (2007). Estimación de la mineralización neta de nitrógeno del suelo en sistemas agroforestales y a pleno sol en el cultivo del Café (*Coffea arabica* L.), en el pacífico de Nicaragua, departamento de Carazo. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional Agraria. Managua. 79p.
- Galindo, T., Polania, J., Sánchez, J., Moreno, N., Vanegas, J. & Holguín, G. (2006). Efecto de inoculantes microbianos sobre la promoción de crecimiento de mangle y plantas de *Citrus vulgaris* San Andres isla colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 11 (1): 83 – 97.
- Galloway, J., Townsend, A., Erisman, J. W., Bekunda, M., Cai, Z., Fenev, J., Martinelli, L., Seitzinger, S. & Sutton, M. (2008). Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 320: 889 – 892.
- Galván, L., Guzman, J., Jarra, A. & Combatt, E. (2003). Determinación de los requerimientos nutricionales de *Stevia rebaudiana*, en el Medio Sinú. Memorias XXXIII Congreso Anual de Comalí. Montería, Colombia.
- Galvis, A. & Hernández, T. (2004). Cálculo del nitrógeno potencialmente mineralizable. *Interciencia*, 29(7): 377 – 383.
- García, A. 2009. Degradación de la fertilidad integral del suelo. En: Seminario Nacional Año de los Suelos en Colombia, El Suelo Importante Recurso para la Continuidad de nuestras generaciones. Bogotá 10p.
- Geisseler, D., Horwath, W., Joergensen, R. & Ludwig, B. (2010). Pathways of nitrogen utilization by soil microorganisms – a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 42: 2058 – 20167.
- Gholamhoseini, M., Aghaalkhani, M., Modarres, S.A.M. & Mirlafití, S.M. (2013). Interactions of irrigation, weed and nitrogen on corn yield, nitrogen use efficiency and nitrate leaching. *Agricultural Water Management*, 126: 9 – 18
- Giddey S. Badwal, S & Kulkarni, A. (2013). Review of electrochemical ammonia production technologies and materials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38: 14576 – 14594.
- Gil, M.V., Carballo, M.T. y Calvo, L.F. (2011). Modelling N mineralization from bovine manure and sewage sludge composts. *Bioresource Technology*, 102: 863 – 871.

- Giraldo, H. (2014). Ingredientes naturales, una alternativa de desarrollo rural sostenible. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Taller Nacional de Productos Forestales No Maderables PFNM. Villacencio, octubre 8.
- Głąb, T., Palmowska, J., Zaleski, T. & Gondek, K. (2016). Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil. *Geoderma*, 281: 11 – 20.
- González, V., Leal, M., Lillo, J., De Bustamante, I. & Palacios, P. (2015). Guía de caracterización edáfica para actividades de regeneración de aguas residuales en usos ambientales. Red Consolider Tragua. Gobierno de España. Disponible en: http://www.consolider-tragua.com/documentos/guia_caracterizacion_edafica.pdf. Fecha de consulta: febrero 18 de 2015.
- González, M.G. (2013). Efecto de la inoculación de aislados bacterianos sobre la producción de albahaca (*Ocimum basilicum*). Trabajo de grado. Universidad Autónoma de Querétaro. México. 64p.
- González, J.L., Rodríguez, M., Sanchez, P. & Gaitán, E. (2009). Relación amonio/nitrato en la producción de hierbas aromáticas en hidroponía. *Agricultura Técnica en México*, 35(1): 5-11.
- González, M., Hernández, M., Dupeyron, D., Rieumont, J., Rodríguez, C., Cuesta E. & Sardiña, C. (2007). Síntesis y comportamiento de un material polimérico aplicado como recubrimiento en un fertilizante de liberación controlada. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 8(4): 275 – 286.
- Gonzalez, R., Paniagua, J. & Mayeregger, E. (2002). Necesidad de agua para el cultivo de estevia (*Stevia rebaudiana* Bert.), calculado sobre la base de lectura de microlímetro. *Investigación Agraria*, 4(2): 19 – 24.
- Guerrero, L.A. (2008). Cultivo intensivo de aromáticas en hidroponía. Trabajo de maestría. Colegio de Postgraduados, México 147p disponible en: http://www.biblio.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/1475/Guerrero_Lagunes_LA_MC_Botanica_2008.pdf?sequence=1. Fecha de consulta: junio 15 de 2016.
- Guntiñas, M.E., Lairós, M.C., Trasar, C. & Gil, F. (2012). Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: a laboratory study. *European Journal of Soil Biology*, 48: 73 – 80.
- Gusqui, L., Huisha, C., Oña, V. & Alban, A. (2010). Evaluación de cuatro dosis de humus para la adaptación del cultivo no tradicional de yerba dulce (*Stevia rebaudiana*) en la zona de Santo Domingo de los Tsáchilas. XII Congreso ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Santo Domingo, Ecuador 17 – 19 de noviembre.
- Hadas, A., Agassi, M., Zhevelev, H., Kautsky, L., Levy, G.J., Fizik, E. & Gotesman, M. (2004). Mulching with composted municipal solid wastes in the Central Negev Israel. II Effect on available nitrogen and phosphorus and on organic matter in soil. *Soil Tillage Research*, 78: 115 – 128.
- Hadid, A. (2004). Proposal for Expanding the Crop Mandate of ICARDA to Include Horticultural Crops. ICARDA. Siria. Pp 17-19.
- Hazrati, S., Tahmasebi-Sarvestani, Z., Mokhtassi-Bidgoli, A., Modarres-Sanavy, S.A.M., Mohammadi, H. & Nicola, S. (2017). Effects of zeolite and water stress on growth, yield and chemical composition of *Aloe vera* L. *Agricultural Water Management*, 181: 66 – 72.
- Hernández, A., Rives, N., Acebo, Y., Díaz, A., Heydrich, M. & Verán, V. (2014). Potencialidades de las bacterias diazotróficas asociativas en la promoción del crecimiento vegetal y el control de *Pyricularia oryzae* (Sacc.) en el cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.). *Revista Protección vegetal*, 29(1): 1 – 10.
- Herridge, D., Peoples, M. & Boddey, R. (2008). Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant Soil*, 311: 1 – 18.
- Hirel, B., Tétu, T., Lea, P. & Dubois, F. (2011). Improving nitrogen use efficiency in crops for sustainable agriculture. *Sustainability*, 3: 1452 – 1485.
- Hizal, J. & Apak, R. (2006). Modeling of cadmium (II) adsorption on kaolinite-based clays in the absence and presence of humic acid. *Applied Clay Science*, 32: 232 – 244.
- Hodge, A., Robinson, D. & Fitter, A. (2000). Are microorganisms more effective than plants at competing for nitrogen? *Trends in plant Science*, 5(7): 304 – 308.
- Huito, L.D. (2016). Evaluación de dos variedades de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) con tres dosis de biofertilizante foliar en Walipini, en la zona de Ventilla - La Paz. Tesis de grado. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia. 170p.
- Humbert, S. (2011). Discovery of anammox bacteria in terrestrial ecosystems. Ph Thesis. University of Neuchâtel. Institute of Biology. 176p.
- IDAE – Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). Ahorro, eficiencia energética y fertilización nitrogenada. Ahorro y eficiencia energética en la agricultura. IDAE: Madrid. 44p.
- IFIA – International Fertilizer Industry Association. (2013). Fertilizer indicators. IFIA. Paris. 24p
- IGAC – INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. (2006). Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Sexta Edición. Bogotá, 674 p.
- Inubushi, K., Wada, H. & Takai, Y. (1985). Easily decomposable organic matter in paddy soil. VI kinetics of nitrogen mineralization in submerged soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 31: 563-572
- Iskander A. L., Khalid, E. M. & Sheta, A.S. (2011). Zinc and manganese sorption behavior by natural zeolite and bentonite. *Annals of Agricultural Science*, 56: 43 – 48.
- Jackson, L., Bowles, T., Hodson, A. & Lazcano, C. (2012). Soil microbial-root and microbial-rizosphere processes to increase nitrogen availability and retention in agroecosystems. *Environmental Sustainability*, 4: 517 – 522.
- Jácome, R., Peñarete, W. & Daza, M.C. (2013). Fertilización orgánica e inorgánica en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en suelo inceptisol con propiedades ándicas. *Revista Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 12: 59 – 67
- Jaramillo, D. (2014). El suelo, origen, propiedades, espacialidad. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 558p
- Jarma, A., Combatt, E.M. & Cleves, J. A. (2010). Aspectos nutricionales y metabolismo de *Stevia rebaudiana* (Bertoni): una revisión. *Agronomía colombiana*, 28(2): 199 – 208.
- Jarma-Orozco, A., Montoya, R. & Aramendiz, H. (2003). *Stevia rebaudiana*, alternativa de sustitución de cultivos ilícitos en el Caribe colombiano. Memorias XXXIII Congreso de Comalif. Montería, Colombia pp. 64-65.
- Jarma-Orozco, A. (2005). Estudios de adaptación y manejo integrado de estevia (*Stevia rebaudiana* Bert.): nueva alternativa agroindustrial del Caribe colombiano. SCCH: Montería. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 2(1): 110-113.
- Jégo, G., Sanchez-Pérez, J.M. & Justes, E. (2012). Predicting soil water and mineral nitrogen contents with the STICS model for estimating nitrate leaching under agricultural fields. *Agricultural Water Management*, 107: 54 – 65.
- Jerez, E. & Barroso, L. (2002). Comportamiento de la albahaca blanca (*Ocimum basilicum* L.) ante reducciones de las cantidades de agua aplicada por fases de desarrollo. *Cultivos tropicales*, 23(4): 39 – 46.
- Johnston, E., Poulton, P. & Coleman, K. (2009). Soil Organic Matter: Its Importance in Sustainable Agriculture and Carbon Dioxide Fluxes. Chapter 1. Review Article. *Advances In Agronomy*, 101: 1-57.
- Jones, A. (1984). Estimation of an active fraction soil nitrogen. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 5: 23-32.
- Ju, X., Kou, C. L., Christie, P., Dou, Z. X. & Zhang, F.S. (2007). Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China Plain. *Environmental Pollution*, 145 (2): 497-506.
- Juma, N.G.; Paul, E.A. & Mary, B. (1984). Kinetic analysis of net mineralization in soil. *Soil Science Society of America Journal*, 48: 753 -757.
- Kaleem Abbasi, M., Hina, M., Khaliq, A., & Razaq Khan, S. (2007). Mineralization of Three Organic Manures Used as Nitrogen Source in a Soil Incubated under Laboratory Conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38: 1691-1711.
- Karimi, M., Ahmadi, A., Hashemi, J., Abbasi, A., Tavarini, S., Guglielminetti, L., & Angelini, L. G. (2015). The effect of soil moisture depletion on *Stevia (Stevia rebaudiana Bertoni)* grown in greenhouse conditions: Growth, steviol glycosides content, soluble sugars and total antioxidant capacity. *Scientia Horticulturae*, 183, 93-99.
- Kaup, P. & Rao, B.K. (2014). Nitrogen mineralization and efficiency from co-applied animalmanures and mineral fertilizer in sweetpotato under humidtropical conditions. *Field Crops Research*, 168: 48 – 56.
- Kemmitt, S.J., Wright, D. & Jones, D.L. (2006). Soil acidification used as a management strategy to reduce nitrate losses from agricultural land. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(5): 898 – 911.
- Kennedy, I, Choudhury, A. & Kecskés, M. (2004). Non-symbiotic bacterial diazotrophs in crop farming systems: can their potential for plant growth promotion be better exploited? *Soil Biology and Biochemistry*, 36: 1229 – 1244.
- Khalid, K. A. (2006). Influence of water stress on growth, essential oil, and chemical composition of herbs (*Ocimum* sp.). *Interbational Agrophysics*, 20: 289-296.
- Klucaková, M. (2010). Adsorption of nitrate on humic acids studied by flow through coulometry. *Environmental Chemical Letters*, 8(2): 145 – 148.
- Koh, S. & Dixon, J. (2001). Preparation and application of organo-minerals as sorbents of phenol, benzene and toluene. *Applied Clay Science*, 18: 111 – 122
- Kraft, G. & Stites, W. (2003). Nitrate impacts on groundwater from irrigated-vegetables systems in a humid north central sand plain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 100: 63 – 74.
- Kraiser, T., Grass, D., Gutierrez, A., González, B. & Gutierrez, R. (2011). A holistic view of nitrogen acquisition in plants. *Journal of Experimental Botany*, 62(4): 1455 – 1466.
- Kumar Pal, P., Prasad, R. & Pathania, V. (2013). Effect of decapitation and nutrient applications on shoot branching, yield, and accumulation of secondary metabolites in leaves of *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Journal of plant physiology*, 170: 1526 - 1535.

- Lalande R, Bissonnette N, Coutlée D, Antoun H. (1989). Identification of rhizobacteria from maize and determination of their plant-growth promoting potential. *Plant and Soil*, 115:7–11.
- Lara, C., Villalba, M. y Oviedo, L. (2007). Bacterias fijadoras asimbióticas de nitrógeno de la zona agrícola de San Carlos Córdoba Colombia. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 9(2): 6 – 14.
- Largo, D.P. & Villamarín, K. (2013). Caracterización y activación química de arcilla tipo bentonita para su evaluación en la efectividad de remoción de fenoles presentes en aguas residuales. Trabajo de grado Universidad tecnológica de Pereira. 115p.
- Lavini, A., Riccardi, M., Pulventi, C., Luca, S. De, Scamosci, M., & Andria, R. (2008). Yield, quality and water consumption of *Stevia rebaudiana* Bertoni grown under different irrigation regimes in Southern Italy. *Italian Journal of Agronomy*, 135–143.
- Ledesma, A., Cabanillas, C., Stobbia, D., Viera, B. & Tablada, M. (2013). Crecimiento de albahaca a partir de residuos sólidos domiciliarios orgánicos inoculados. En: 4th International workshop Advances in Cleaner Production. Sao Paulo, Brasil. Mayo 22 – 24.
- Leggo, P. (2004). Method of sustaining plant growth in toxic substrates polluted with heavy metals elements. European patent N° 1208922 B1. Patent Bulletin 04/10 de Marzo de 2004.
- Leggo, P., Ledeser, B. & Christie, G. (2006). The role of clinoptilolite in organic-zeolitic-soil systems used for phytoremediation. *Science of Total Environment*, 363: 1 – 10.
- Li, R., Wang, J., Zhang, Z., Shen, F., Zhang, G., Qin, R., Li, X. & Xiao, R. (2012). Nutrient transformations during composting of pig manure with bentonite. *Bioresource Technology*, 121: 362–368
- López-Mtz, J.D., Díaz Estrada, A., Martínez Rubin, E. & Valdez Cepeda, R. D. (2001). Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento en maíz. *Terra Latinoamericana*, 19(4): 293 – 299.
- López, A. D. (2005). Prueba de adaptación y rendimiento de cuatro variedades de albahaca (*Ocimum basilicum*) manejadas orgánicamente con cuatro niveles de bokashi. Trabajo de grado. Escuela Politécnica del Ejército. Sangolquí, Ecuador. 116p.
- López, L. F., Mejía, D., Gómez, J. A. & Albarracín, C. (2009). Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena productiva de plantas aromáticas, medicinales, condimentarias y afines con énfasis en ingredientes naturales para la industria cosmética en Colombia. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Giro editor Ltda. Bogotá. 184p.
- López-Urrea, R., Martín de Santa Olalla, F., Montoro, A., & López-Fuster, P. (2009). Single and dual crop coefficients and water requirements for onion (*Allium cepa* L.) under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 96(6): 1031–1036.
- López-Urrea, R., Montoro, A., Mañas, F., López-Fuster, P. & Fereres, E. (2012). Evapotranspiration and crop coefficients from lysimeter measurements of mature 'Tempranillo' wine grapes. *Agricultural Water Management*, 112: 13 – 20.
- Lozano, M.D., Ramírez, M. & Martínez, M.M. (2006). Evaluación de microorganismos fijadores asimbióticos de nitrógeno para la producción de biofertilizantes de uso en suelos algodoneros del Valle cálido del Alto Magdalena. En: Biofertilización: alternativa viable para la nutrición vegetal. L.M. castilla (Ed). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. L & L impresores: Ibagué, (Col).
- Macías, F., Macías-García, F. & Camps, M. (2010). Aprendiendo de la naturaleza, aprendiendo de los suelos. Una alternativa ambiental de valorización de residuos, secuestro de carbono y recuperación de suelos degradados. XV Congreso Nacional de Suelos. Pereira.
- Madigan, T., Martinko, J., Parker, J. & Sánchez Pérez, M. (2003). Décima edición. Brock, Biología de los microorganismos. Ed Pearson Prentice Hall. 666 – 669.
- Malekian, R., Abedi-Koupai, J. & Eslamian, S. S. (2011). Influences of clinoptilolite and surfactant-modified clinoptilolite zeolite on nitrate leaching and plant growth. *Journal of Hazardous Materials*, 185: 970–976.
- Maniuzzaman M, Chowdhury, M. A. H., Mohiuddin, K. M. & Chowdhury, T. (2016). Nitrogen requirement and critical N content of stevia grown in two contrasting soils of Bangladesh. *Research of Agriculture, Livestock and Fishing*, 3 (1): 87-97.
- Mantilla, C. & Oviedo, L. (2007). Evaluación de bacterias nativas de la zona de Córdoba, con capacidad fijadora de nitrógeno y secretora de ácido indol acético, (aia), en pastos angleton (*dichanthium aristatum*). Informe de investigación [En línea]: web http://web.www3.unicordoba.edu.co/sites/default/files/Informe%20Final_FCB%2002-07%20Cecilia%20Lara%20Mantilla.pdf.
- Marín, W. (2004). Sondeo de Mercado de la estevia. Instituto de investigación de Recursos Biológicos. Alexander Von Humbolt. Bogotá.
- Marion, G.M., J. Kummerow, & P.C. Miller. (1981). Predicting nitrogen mineralization in chaparral soils. *Soil Science Society of America Journal*, 45: 956 - 961.
- Martins, M. R., Jantalia, C. P., Polidoro, J. C., Batista, J. N., Alves, B. J. R., Boddey, R. M. & Urquiaga, S. (2015). Nitrous oxide and ammonia emissions from N fertilization of maize crop under no-till in a Cerrado soil. *Soil and Tillage research*, 151: 75 – 85.
- Martínez, D., Rodríguez, M. & Daza, M. (2014). Uso de bacterias diazotrofas provenientes de sistemas de tratamiento de aguas residuales. En suelos salinos. Memorias en CD del XVII Congreso Colombiano de la Ciencia del suelo. Popayán, octubre 8 – 11.
- Martínez, L. (2010). Estudio de la calidad agronómica del agua de riego de las islas Baleares. Conselleria de Medio Ambiente y Movilidad – Dirección General de Recursos Hídricos, Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Madrid. P 7-9.
- McKenzie, B.A., Andrews, M. & Hill, G.D. (2007). Nutrient and irrigation management. In: Lentil: and ancient crop for modern times. Yadaf, S.S. *et al.* (eds). Springer. 145 – 158.
- Milosevic, T., Milosevic, N. & Glicic, I. (2013). Tree growth, yield, fruit quality attributes and leaf nutrient content of 'Roxana' apricot as influenced by natural zeolite, organic and inorganic fertilisers. *Scientia Horticulturae* 156: 131–139.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2017). Cadena de plantas aromáticas, medicinales, condimentarias y afines. Indicadores e instrumentos. <https://sioc.minagricultura.gov.co/PlantasAromaticas/Documentos/002 - Cifras Sectoriales/Cifras Sectoriales - 2017 Julio Plantas Aromaticas.pptx>. Fecha de consulta: julio 9 de 2018.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). Decreto 1323. Creación del Sistema de Información del Recurso Hídrico. República de Colombia. [En línea]: www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2007/dec_1323_2007.pdf. Fecha de consulta: noviembre 7 de 2017.
- Molden, D., Oweis, T., Steduto, P., Bindraban, P., Hanjra, M. A. & Kijine, J. (2010). Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. *Agricultural Water Management* 9: 528–535.
- Molina, J. A. E.; Clapp, C. E. & Larson, W.E. (1980). Potentially mineralizable nitrogen in soil: the simple exponential model does not apply for the first 12 weeks of incubation. *Soil Science Society of America Journal*, 44:442- 443.
- Moradi, M., Jafarian, S. & Keshavarz, H. (2017). Alleviation of water stress effects and improved oil yield in sunflower by application of soil and foliar amendments. *Rhizosphere*, 4:54 – 61.
- Moradzadeh, M., Moazed, H., Sayyad, G. & Khaledian, M. (2014). Transport of nitrate and ammonium ions in a sandy loam soil treated with potassium zeolite – Evaluating equilibrium and non-equilibrium equations. *Acta Ecologica Sinica*, 31:342 – 350.
- Moreno, G., López, M.L., Oliveira, F. & Cunha, M. (2007). Eficacia de los sistemas agroforestales en el control de la lixiviación de nitrato. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 22: 113-118.
- Mota, L. & Sánchez, D. (2013). Sustratos orgánicos como alternativa para la producción de albahaca (*Ocimum Selloi* Benth). *Revista Mexicana de Ciencias agrícolas*, 5: 1055 – 1061.
- NADP – National Atmospheric Deposition Program. (2000). El Nitrógeno en la lluvia nacional. Kingston, E., Bowersox, V, Claybrook, R y Zorrilla, G. (eds). Illinois State Water Survive.
- Naz, M.Y. & Sulaiman, S. A. (2016). Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: a review. *Journal of Controlled Release* 225: 109–120.
- Navarro, S & Navarro, G. (2003). Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Segunda edición. Ediciones Mundiprensa, Madrid España. 438p.
- Nielsen, S., Minchin, T., Kimber, S., Zwieten, L., Gilbert, J., Monroe, P., Joseph, S. & Thomas, T. (2014). Comparative analysis of the microbial communities in agricultural soil amended with enhanced biochars or traditional fertilisers. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 191: 73 – 82.
- Niño, J., Cuervo, J. & Villalobos, R. (2013). Efecto del potencial mátrico del suelo en el crecimiento del cultivo de estevia (*Stevia rebaudiana* Bert.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 7(2): 240-251.
- Novak, J.M., Busscher, W.J., Watts, D.W., Amonette, J.E., Ippolito, J.A., Lima, I.M., Gaskin, J., Das, K.C., Steiner, C., Ahmedna, M., Rehrah, D. & Schomberg, H. (2012). Biochars impact on soil-moisture storage in an ultisol and two aridisols. *Soil Science*, 177 (5), 310–320.
- NTC Norma Técnica Colombiana 5167. (2011). Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. ICONTEC.

- Obando, D., Burgos, L., Rivera, D., Rubiano, M., Divan, V & Bonilla, R. (2010). Caracterización de bacterias diazotróficas asociadas al eucalipto en Codazzi Cesar. *Acta Biológica Colombiana*, 15(3): 107 – 120.
- Obregón, N., Díaz, J., Daza, M. C. & Aristizabal, H.F. (2016). Efecto de la aplicación de zeolita en la recuperación de nitrógeno y el rendimiento de maíz. *Acta Agronómica*, 65 (1): 24 – 30.
- Ojeda, L., Toledo, L., Hernández, C., Machado, Y., & Furrázola, E. (2016). Influencia de la aplicación de Azospirillum lipoferum en *Megathyrus maximus* vc. guinea tobiatá en un suelo Pardo Grisáceo. *Revista pastos y forrajes*, 39(1): 27 – 32.
- Ojeda-Silvera, C. M., Nieto-garibay, A., Reynaldo-escobar, I. M., Troyo-diéguez, E., Higinio, F., & Bernardo, R. (2013). Tolerancia al estrés hídrico en variedades de albahaca *Ocimum basilicum* L. *Terra Latinoamericana*, 31: 145–154.
- Ornelas, A. (2016). Stevia ¿Milagro o pesadilla guaraní? Swissinfo. Disponible desde internet en: <http://www.swissinfo.ch/spa/economia/el-negocio-de-la-hierba-dulce-stevia--milagro-o-pesadilla-guarani%C3%AD-42144028> Fecha de consulta: Diciembre 12 de 2016).
- Orozco, F.H. (1999). Biología del nitrógeno. Conceptos básicos sobre sus transformaciones biológicas. Tomo I. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 231p.
- Ortega, L., Sánchez, J., Ocampo, J., Sandoval, E., Salcido, B. y Manzo, F. (2010). Efecto de diferentes sustratos en crecimiento y rendimiento de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) bajo condiciones de invernadero. *Ra Ximhai Revista de Sociedad, Cultura y desarrollo sustentable* 6(3): 339 – 346.
- Osorio, N.W. (2014). Manejo de nutrientes en suelos del trópico. Ed L Vieco S.A.S. Medellín, 416p.
- Ozturk, A., Caglar, O. & Sahin, F. (2003). Yield response of wheat and barley to inoculation of plant growth promoting rhizobacteria at various levels of nitrogen fertilization. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 166: 262 - 266.
- Pacheco, J., Pat Canul, R. & Cabrera, A. (2002). Análisis del ciclo del Nitrógeno en el medio ambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos. *Ingeniería* 6-3: 73 – 81.
- Páez, A., Paz, V. & López, J.C. (2000). Crecimiento y respuesta fisiológicas de plantas de tomate cv. Río grande en la época mayo- julio. Los efectos del sombreado. *Revista Facultad de Agronomía (LUZ)*, 17: 173 – 184.
- Pandey, V., Patul, A. & Patra, D. (2016). Integrated nutrient regimes ameliorate crop productivity, nutritive value, antioxidant activity and volatiles in basil (*Ocimum basilicum* L.). *Industrial crops and products*, 87: 124 – 131.
- Peñalzo, M.C. & Chavez, A. (2010). Propuesta de un plan de manejo de los fertilizantes nitrogenados y del agua remanente producida en el cultivo de helecho de cuero *Rumohra adiantiformis*. Estudio de caso de la finca Vista Bella. *Revista Gestión Integral en Ingeniería Neogranadina* 2(1) [En Línea]: <http://www.umng.edu.co/web/ingenieria-neogranadina/revista-volumen-2-n-1>. Fecha de consulta: marzo 14 de 2014.
- Peñarete, W., Silva, J., Urrutia, N., Daza, M. & Torres, P. (2013). Efecto de aplicación de biosólidos sobre las propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar. *Acta Agronómica*, 62(3): 251 – 260.
- Perakis, S.S. & Hedin, L.O., (2002). Nitrogen loss from unpolluted South American forests mainly via dissolved organic compounds. *Nature*, 415: 416–419.
- Pereyra, M. (2001). Asimilación de nitrógeno en plantas. Universidad de la Pampa. Facultad de agronomía. 30p {En línea}: <http://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Asimilacion%20del%20nitrogeno.pdf>. Fecha de consulta: Abril 22 de 2013.
- Pérez Montaña, F., Alias Villegas, C., Bellogin, R.A., Del Cerro, P., Espuny, M. R., Jimenez Guerrero, I., López Baena, F.J., Ollero, F.J. & Cubo, T. (2014). Plant grow promotion in cereal y leguminous agricultural important plants: from microorganism capacities to crop production. *Microbiology Research*, 169: 325 – 336.
- Pérez, M. A., Peña, M. R., & Álvarez, P. (2011). Agro Industria Cañera y uso del agua: Análisis crítico en el contexto de la política de agrocombustibles en Colombia. *Ambiente & Sociedad*, 14(2): 153–178.
- Pérez, N., Peña, M. & Sanabria J. (2011). Comunidades bacterianas involucradas en el ciclo del nitrógeno en humedales construidos. *Revista Ingeniería y Competitividad*, 13 (2): 83 – 92.
- Poly, F., Monrozier, L., & Bally, R. (2001). Improvement in the RFLP procedure for studying the diversity of nifH genes in communities of nitrogen fixers in soil. *Research in Microbiology*, 152(1), 95–103.
- Posso, P. S. (2002). Cadena productiva de plantas aromáticas, medicinales, condimentarias y aceites esenciales. Cali (Valle del Cauca) Secretaria de Agricultura y Pesca, Gobernación del Valle del Cauca. [en línea]: www.valledelcauca.gov.co/secretarias/agricultura.asp. Fecha de consulta: noviembre 16 de 2013.
- Posso, P. S. (2007a). Consideraciones sobre la cadena de plantas medicinales. En Línea: <http://www.valledelcauca.gov.co/agricultura/publicaciones.php?id=1969>. Fecha de consulta: diciembre 4 de 2013.
- Posso, P. S. (2007b). Las plantas aromáticas y medicinales una alternativa viable. En Línea: <http://www.valledelcauca.gov.co/agricultura/publicaciones.php?id=1971>. Fecha de consulta: diciembre 4 de 2013.
- Pronk, G. J., Heister, K., Ding, G., Smalla, K. & Kogel Knabner, I. (2012). Development of biogeochemical interfaces in an artificial soil incubation experiment; aggregation and formation of órgano-mineral associations. *Geoderma*, (189 – 190): 585 – 594.
- Pueppke S.G. (2005) Nitrogen Fixation by Soybean in North America. In: Werner D., Newton W.E. (eds) Nitrogen Fixation in Agriculture, Forestry, Ecology, and the Environment. Nitrogen Fixation: Origins, Applications, and Research Progress, vol 4. Springer, Dordrecht.
- Quemada, M & Menacho, E. (1999). Emisión de CO₂ y mineralización de nitrógeno en un suelo previamente tratado con lodos de depuradora. *Revista de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo*, 6: 59 – 71.
- Quintanilla, F. N., Yanes, C. C. & Monge, C. B. (2013). Incidencia del Bocashi, gallinaza y su combinación con fertilizantes químicos en la mejora de la fertilidad del suelo y en los rendimientos de maíz (*Zea mays*) san Juan Opico La Libertad. Trabajo de grado. Universidad de El Salvador. Facultad de Ciencias Agronómicas. 102p.
- Quiroz, R & Chijoy, E. (2012). Papa o Patata. En: Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E. y Raes, D. (Eds). Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación FAO. Estudio Riego y Drenaje N° 66. 530 p.
- Rahman, M.T., Zhu, Q.H., Zhang, Z.B., Zhou, H. & Peng, X. (2017). The roles of organic amendments and microbial community in the improvement of soil structure of a Vertisol. *Applied Soil Ecology*, 111: 84–93
- Ramírez, G. (2011). Paquete tecnológico estevia (*Stevia rebaudiana*) establecimiento y mantenimiento. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias – INIFAP. Mocochoá, México. Pp 7-9.
- Rascio, N., & La Rocca, N. (2013). Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier.
- Reis, M., Coelho, L., Santos, G., Kienle, U., & Beltrão, J. (2015). Yield response of stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) to the salinity of irrigation water. *Agricultural Water Management*, 152, 217–221.
- Reta S., D. G., U. Figueroa V., R. Faz C., G. Núñez H., A. Gaytán M., J. S. Serrato C. & J. A. Payán G. (2010) Sistemas de producción de forraje para incrementar la productividad del agua. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33 (4):83-87.
- Reyes, A., Figueroa, U., Ochoa, E., Verastegui, J. áñez, J.I. & Núñez, G. (2012). Lixiviación de nitratos provenientes de estiércol y fertilizante en forrajes cultivados en lisímetros de volumen. *Explotación Racional y Monitoreo de Ecosistemas – Agrofaz* 12 (4): 95 – 101.
- Reynolds, J., Fraile, J. & Hirata, R. (2006). Trends in Nitrate Concentrations and Determination of its Origin Using Stable Isotopes (18O and 15N) in Groundwater of the Western Central Valley, Costa Rica. *Journal of the Human Environment*, 35(5): 229 – 236.
- Ribó, M., Canet, R., Albiach, M. R. & Pomares, F. (2003). Mineralización del nitrógeno del suelo. En: Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos: Medidas de actividades enzimáticas y biomasa microbiana. García, C., Gil, F., Hernández, T. & Trasar, C. (eds). Mundiprensa: Barcelona. 347 – 367.
- Rivacoba, L., Vázquez, N., Suso, M.L. & Pardo, A. (2013). Efecto del nitrógeno disponible sobre los compuestos del balance de nitrógeno en un cultivo de coliflor (*Brassica oleracea* var Botrytis). VII Congreso Ibérico de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas. Madrid agosto 26 – 29.
- Roberts, T. (2008). Improving nutrient use efficiency. *Turkey Journal of Agriculture and Forest*, 32: 177 – 182.
- Rodríguez, A., Gomes, J., Bonifacio, A. & Barreto, M. (2013). Metabolism of nitrogen and carbón: optimization of biological nitrogen fixation and cowpea development. *Soil Biology and Biochemistry*, 67: 226 – 234.
- Roy, R.N., Finck, A., Blair, G.J. & Tandon, H.S. (2006). Plant Nutrition for food security. A guide to integrated nutrient management. FAO fertilizer and plant nutrition Bull N° 16. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- Sahin, U., Kuslu, Y., Tunc, T., & Kiziloglu, F. M. (2009). Determining Crop and Pan Coefficients for Cauliflower and Red Cabbage Crops Under Cool Season Semiarid Climatic Conditions. *Agricultural Sciences in China*, 8(2): 167–171
- Salazar, T. (2014). Caracterización de los sitios de cultivo potenciales en Costa Rica para la especie *Stevia rebaudiana* Bertoni. Tesis de maestría. Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

- Salgado L.E. (2013). Requerimiento de nitrógeno en la producción de *Stevia rebaudiana* Bertoni en hidroponía e invernadero. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados Montecillo, México.
- Sanabria, J. (2014). Environmental biotechnology research: Challenges and opportunities in Latin America. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 27(4): 681–694.
- Sanchez, J. (2017). Mercado de productos agrícolas ecológicos en Colombia. Suma de negocios 8: 156 – 163.
- Sánchez, J., Melgarejo, L.M., Vanegas, J., Sosa, T. & Fuentes, C. (2006). Diazótrofos de vida libre: perspectivas de aplicación. En: Biofertilización: alternativa viable para la nutrición vegetal. L.M. castilla (Ed). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. L & L impresores: Ibagué, (Col).
- Sánchez, D., Gutierrez, J., Campo, J. & Herrera, J.P. (2013). Estudio sobre el sector de fertilizantes en Colombia. Grupo de Estudios Económicos Sectoriales. Superintendencia de Industria y Comercio. Bogotá. 198p.
- Sander, J & Win G.M. (2004). Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agriculture Water Management*, 69(2): 115 – 133.
- Sarathambal, C., Ilamurugu K., Balachandar D., Chinnadurai C. & Gharde, Y. (2015). Characterization and crop production efficiency of diazotrophic isolates from the rhizosphere of semi-arid tropical grasses of India. *Applied Soil Ecology*, 87: 1 – 10.
- Schenk, M.K. (2006). Nutrient efficiency of vegetable crops. *Acta Horticulturae*, 700: 21–33.
- Schimel, J.P. & Bennett, J. (2004). Nitrogen mineralization: Challenges of changing paradigm. *Ecology*, 85(3): 591 – 602.
- Schmidt, M. W., Torn, M., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I., Kleber, L., Kogel Knabner, I., Lehman, J., Manning, D., Nannipieri, P., Rasse, D., Weiner, S. & Trumbore, S. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478: 49 – 56.
- Secretaría de Agricultura del Valle del Cauca. (2016). Evaluaciones agrícolas 2015. [En línea]: <http://www.valledelcauca.gov.co/agricultura/publicaciones.php?id=1966>. Fecha de consulta: octubre 25 de 2017.
- Secretaría de Agricultura del Valle del Cauca. (2010). El Valle del Cauca exportará Stevia a Chile y Té a Estados Unidos. Gobernación del Valle. En línea: <http://www.valledelcauca.gov.co/agricultura/publicaciones.php?id=12056>.
- Sepaskhah, A. R. & Barzegar, M. (2010). Yield, water and nitrogen-use response of rice to zeolite and nitrogen fertilization in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management* 98:38 – 44.
- Serfaty, M., Ibdah, M., Fischer, R., Chaimovitch, D., Saranga, Y. & Dudai, N. (2013). Dynamics of yield components and stevioside production in *Stevia rebaudiana* grown under different planting times, plant stands and harvest regime. *Industrial Crops and Products*, 50: 731–736.
- Shukla, S., Shrestha, N. K., Jaber, F. H., Srivastava, S., Obreja, T. a. & Boman, B. J. (2014). Evapotranspiration and crop coefficient for watermelon grown under plastic mulched conditions in sub-tropical Florida. *Agricultural Water Management*, 132: 1–9.
- Sifola, M. I., & Barbieri, G. (2006). Growth, yield and essential oil content of three cultivars of basil grown under different levels of nitrogen in the field. *Scientia Horticulturae*, 108(4), 408–413. <http://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.02.002>
- Silva, J., Torres, P. & Mosquera, J. (2013). Evaluación de la mineralización de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(4): 434 – 442.
- Smil, V. (2011). Nitrogen cycle and world food production. *World Agriculture*, 2:9-1.
- Soca, M. & Daza, M. C. (2015). La zeolita y su efecto en la eficiencia del nitrógeno en arroz y maíz. *Revista De Ciencias Agrícolas*, 32(2): 46 – 55.
- Song, X.Z., Zhao, C. X., Wang, X.L. & Li, J. (2009). Study of nitrate leaching and nitrogen fate under intensive vegetable production pattern in northern China. *Comptes Rendus Biologies*, 332: 385 – 392.
- Stanford, G. & Smith, S. J. (1972). Nitrogen mineralization potentials of soil. *Soil Science Society of America Journal*, 36:465-471.
- Stark, C. & Richards, K. (2008). The continuing challenge of agricultural nitrogen loss to the environment in the context of global change and advancing research. *Dynamic Soil and Dynamic Plant*, 2(1): 1 – 12.
- Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E. & Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación FAO. Estudio Riego y Drenaje N° 66. 530 p.
- Steward, W. M. (2007). Consideraciones en el uso eficiente de nutrientes. *Informaciones Agronómicas*, 67:1–6.
- Stuart, D., Schewe, R.L. & Mcdesmott, M. (2014). Reducing nitrogen fertilizer application as a climate change mitigation strategy: understanding farmer decision-making and potential barriers to change in the US. *Land Use Policy*, 36: 210-218.
- Sun, Y., Sun, G., Xu, Y., Liu, W., Liang, X. & Wang, L. (2016). Evaluation of the effectiveness of sepiolite, bentonite, and phosphate amendments on the stabilization remediation of cadmium-contaminated soils. *Journal of Environmental Management*, 166: 204 – 210.
- Sun, S., Zhang, C. F., Li, X., Zhou, T., Wang, Y. Wu, P. & Cai, H. (2017). Sensitivity of crop water productivity to the variation of agricultural and climatic factors: A study of Hetao irrigation district, China. *Journal of Cleaner Production*, 142: 2562 – 2569.
- Swarnalakhmi, K., Prassana, R., Kumar, A., Pattnaik, S., Chakravarty, K., Shivay, Y.S., Singh, R. & Saxena, A.K. (2013). Evaluating the influence of novel cyanobacterial biofilm fertilizers on soil fertility and plant nutrition in wheat. *European Journal of Soil Biology*, 55: 107 – 116.
- Szymanska, R., Ślesak, I., Orzechowska, A. & Kruk, J. (2017). Physiological and biochemical responses to high light and temperature stress in plants. *Environmental and Experimental Botany*, 139:165–177.
- Tapia, L.M., Larios, A., Contreras, J., Vidales, I. & Barradas, V. 2012. Lixiviación de nitratos y condición nutrimental en dos sistemas de manejo de riego y nutricional de aguacate (Persea americana MILL). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(3): 251 – 258.
- Talbot, J.M. & Treseder, K.K. (2010). Controls over mycorrhizal uptake of organic nitrogen. *Pedobiología*, 53: 169–179.
- Tartowski, S. & Howarth, R. (2013). Nitrogen, Nitrogen Cycle. In: *Encyclopedia of Biodiversity* (Second Edition). Academic Press. Pp 537-546.
- Tavarini, S., Pagano, I., Guidi, L., Angelini, L.G. (2016). Impact of nitrogen supply on growth, steviol glycosides and photosynthesis in *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Plant Biosystems – An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 150: 953–962.
- Thomason, W. (2012). Nitrogen Management in simple terms. Virginia cripes. Research, analysis, advisories. [En línea]: <http://www.virginiacrops.com/2012/03/18/wheat-nitrogen-management-in-simple-terms/> Fecha de consulta: Febrero de 2014.
- Tilman, D., Cassman K.G., Matson P.A., Naylor R. & Polasky S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418: 671–677.
- Townsend, A.R., Howarth, R.W., Bazzaz, F.A., Booth, M.S., Cleveland, C.C., Collinge, S. K., Dobson, A.P., Epstein, P.R., Holland, E.A., Keeney, D.R., Mallin, M.A., Rogers, C.A., Wayne, P. & Wolfe, A.H. (2003). Human health effects of a changing global nitrogen cycle. *Frontiers in Ecology and Environment*, 1(5): 240 – 246.
- Turner, S., Meyer-Stüve, S., Schippers, A., Guggenberger, G., Schaarschmidt, F., Wild, B., Richter, A., Dohrmann, R. & Mikutta, R. (2017). Microbial utilization of mineral-associated nitrogen in soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 104: 185 – 196.
- Unkovich, M & Baldock, J. (2008). Measurement of asymbiotic N₂ fixation in Australian agricultura. *Soil Biology and Biochemistry*, 40: 2915 – 2921.
- Urrutia, N. & Daza, M.C. (2015). Efecto de la aplicación de abonos de liberación lenta de nitrógeno en la lixiviación de nitratos en un cultivo de estevia (*Stevia rebaudiana* B.) usando lísímetros de drenaje. Informe de investigación CI 2740. Universidad del Valle.
- Vallejo, M., Bonilla, R. & Castilla, L. (2008). Evaluación de la asociación de bacterias – líneas interespecíficas de arroz – nitrógeno en typic haplustalf Ibagué Colombia. *Acta Agronómica*, 57 (1): 43 – 49.
- Vargas, J. & Daza, M. (2014). Curvas de actividad microbiana bajo la aplicación de abonos orgánicos en dos órdenes de suelos. XVII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. Memorias CD- ROOM. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Popayán, octubre 8-11.
- Vega, G. (2015). Estevia, una tendencia mundial. *Revista Énfasis alimentación*, 21(3):8-10.
- Velazco, K., Noguera, N., Jimenez, L., Larreal, M. & Ettiene, G. (2009). Evaluación de nitratos y nitritos lixiviados en un sistema de pastoreo intensivo usando fertilizantes nitrogenados. *Revista Facultad de Agronomía (LUZ)*, 26: 26 – 38.
- Velázquez, J.A., Rodríguez, H. N., Ferreira, M. A., Vega, G. D., Lesmo, N. D. & Alvarenga, J. D. (2016). Efecto de diferentes dosis de estiércol bovino en el cultivo orgánico de *Stevia rebaudiana* (Bertoni) Bertoni bajo sistema de riego por goteo. *Investigación Agraria*, 18(2): 101 – 110.
- Videla, C., Pazos, A., Trivelin, P., Echeverría, H.E., & Studdert, G.A. (2005). Mineralización bruta de nitrógeno bajo labranza convencional, siembra directa y pastura. *Ciencia del Suelo (Argentina)*, 23(2): 1-12.
- Villafaña, G., C. Basso y R. Villafaña. (2016). Evapotranspiración y coeficientes del cultivo (Kc) de stevia (*Stevia rebaudiana* (Bertoni) Bertoni) Bajo condiciones parcialmente protegidas. *Bioagro*, 28(2): 131 – 136.
- Vogel, C., Heister, K., Buegger, F., Tanuwidjaja, I., Haug, S., Schloter, M. & Kögel-Knabner, I. (2015). Clay mineral composition modifies decomposition and sequestration of organic carbon and nitrogen in fine soil fractions. *Biology and Fertility of Soils*, 51(4): 427 – 442.

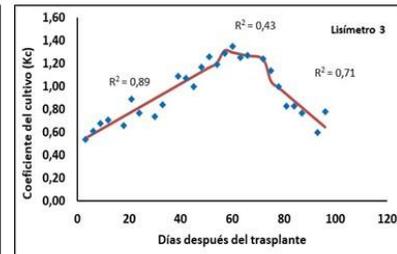
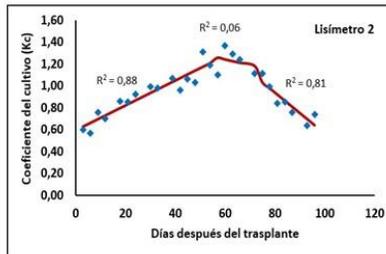
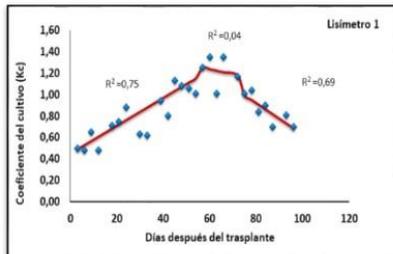
- Wang, D.J., Liu, Q., Lin, J.H. & Sun, R.J. (2004). Optimum nitrogen use and reduce nitrogen loss for production of rice and wheat in the Yangtse Delta Region. *Environmental Geochemistry and Health*, 26: 221 – 227.
- Wang, Q., Li, R., Cai, H., Awasthi, M. K., Zhang, Z., Wang, J. J., Ali, A. & Amanullah, M. (2016). Improving pig manure composting efficiency employing Ca-bentonite. *Ecological Engineering*, 87: 157–161.
- WHO-World Health Organization. (2011). Guidelines for drinking water quality. Fourth edition. Geneva, Switzerland. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&rcf=i&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEWITt5GC--nXAhUBhyYKHc4zDPoQFggzMAE&url=http%3A%2F%2Fwhqlibdoc.who.int%2Fpublications%2F2011%2F9789241548151_eng.pdf&usq=A0vVaw3RT0bvlrV7H2PvRuDLCl4. Fecha de consulta: diciembre 1 de 2017.
- Wild, A. (1992). Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russel. Tercera edición. Madrid: Mundiprensa. pp 595 – 732.
- Wong, K.H., Hynes, M. J. & Davis, M. A. (2008). Recent advances in nitrogen regulation: a comparison between *Saccharomyces cerevisiae* and filamentous fungi. *Eukaryotic Cell*, 7: 917 – 925.
- Wyszkowski, M. & Ziólkowska, A. (2009). Role of compost, bentonite and calcium oxide in restricting the effect of soil contamination with petrol and diesel oil on plants. *Chemosphere*, 74:860-865.
- Xiaoyu, N., Yuejin, W., Zhengyan, W., Qiu Guannan, W. L. & Lixiang, Y. (2013). A novel slow-release urea fertiliser: Physical and chemical analysis of its structure and study of its release mechanism. *Biosystems Engineering*, 115: 274 – 282.
- Xie, L., Liu, M., Ni, B., Zhang, X. & Wang, Y. (2011). Slow release nitrogen and boron fertilizer from a functional superabsorbent formulation base on wheat straw and attapulgit. *Chemical Engineering Journal*, 167: 342 – 348.
- Xu, Y., Liang, X., Xu Y., Qin, X., Huang, Q., Wang, L. & Sun, Y. (2017). Remediation of Heavy Metal-Polluted Agricultural Soils Using Clay Minerals: A Review. *Pedosphere*, 27(2): 193 – 204.
- Xue, J., Guan, H., Huo, Z., Wang, F., Huang, G. & Boll, J. (2017). Water saving practices enhance regional efficiency of water consumption and water productivity in an arid agricultural area with shallow groundwater. *Agricultural Water Management* 194: 78–89.
- Yang, W., Ryals, R., Cusack, D. & Silver, W. (2017). Cross-biome assessment of gross soil nitrogen cycling in California. *Soil Biology and Biochemistry*, 107: 144 – 155.
- Yang, J. Liu, X. & Shi, Y. (2013). Effect of Different Mixed Fertilizer on Yield, Quality and Economic Benefits in *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Journal of Food Science and Technology*, 5(5): 588-591.
- Yao, Ch., Joseph, S., Li L., Pan, G., Y., Lin, P., Munroe, B., Pace, S., Taherymoosavi, L., Van Zwieten, T., Thomas, S., Nielsen, J., Ye, J. & Donne, S. (2015). Developing more effective enhanced biochar fertilisers for improvement of pepper yield and quality. *Pedosphere*, 25(5): 703 – 712.
- Yepes, F., Ferrera, R., Alarcón, A., Delgadillo, J., Mendoza, M. & García, O. (2016). Fertilización nitrogenada en el crecimiento, contenido de compuestos fenólicos y actividad antioxidante de albahaca. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39(1): 33 – 40.
- Zaidi, A., Ahmad, E. Khan, M., Saif, S. & Rizvi, A. (2015). Role of plant growth promoting rhizobacteria in sustainable production of vegetables: Current perspective. *Scientiae Hortoculturae*, 193: 231 – 239.
- Zalom, F., Goodell, P., Wilson, L., Barnett, W. & Bentley, W. (1983). Degree-days: The calculation and use of heat units in pest management. University of California Division of agriculture and natural resources leaflet 21373. Berkeley, California.
- Zaman, M. & Nguyen, M.L. (2010). Effect of lime or zeolite on N₂O and N₂ emissions from a pastoral soil treated with urine or nitrate-N fertilizer under field conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 136: 254–261.
- Zaman, M., Chowdhury, M. A. H. & Chowdhury, T. (2015). Growth parameters and leaf biomass yield of stevia (*Stevia rebaudiana*, Bertoni) as influenced by different soil types of Bangladesh. *Journal of the Bangladesh Agricultural University*, 13(1): 31–37.
- Zeliger, H. (2011). Soil Pollution. In: Human Toxicology of Chemical Mixtures (Second Edition). El Sevier. pp 97-103.
- Zetina, R., Vázquez, A. & Meneses, I. (2014). Aplicación de N-P-K para el establecimiento de *Stevia rebaudiana* Bertoni en suelos del centro de Veracruz. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 2(3): 201 – 206.
- Zhang, W., Chen, X., Zhou, J., Liu, D., Wang, H. & Du, C. (2013). Influence of humic acid on interaction of ammonium and potassium ion son clay minerals. *Pedosphere*, 23(4): 493 – 502.
- Zhang, L. & Sun, X. (2017). Addition of seaweed and bentonite accelerates the two-stage composting of green waste. *Bioresource Technology*, 243:154–162.
- Zheng, H., Wang, Z., Deng, X., Herbert, S. & Xing, B. (2013). Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil. *Geoderma*, 206: 32 – 39.
- Zhu, W & Wang, W. (2011). Does soil organic matter variation affect the retention of 15NH₄⁺ and 15NO₃⁻ in forest ecosystems? *Forest ecology Management*, 261: 675 – 682.
- Zupanc, V., Sturm, M., Lojen, S., Marsic-Kacjan, N., Adu-Gyamfi, J. Bracic-Zeleznik, B., Urbanc, J. & Pintar, M. (2011). Nitrate leaching under vegetable field above a shallow aquifer in Slovenia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 144: 167 – 174.

9. ANEXOS

Anexo 1 Necesidades hídricas del cultivo de estevia en milímetros determinada por medio de LD en el Valle geográfico del río Cauca (Colombia).

DDT	ETc (mm día ⁻¹)				DDT	ETc (mm día ⁻¹)			
	Lisímetro 1	Lisímetro 2	Lisímetro 3	Promedio		Lisímetro 1	Lisímetro 2	Lisímetro 3	Promedio
3	3,52	4,25	3,85	4,32	54	4,00	4,72	4,72	4,91
6	4,03	4,83	5,19	4,74	57	5,80	5,12	6,02	5,17
9	5,11	5,99	5,36	4,72	60	4,60	4,68	4,60	5,84
12	2,06	2,98	3,06	2,08	63	9,75	9,00	8,24	7,79
18	1,27	1,55	1,19	3,35	66	4,93	4,51	4,61	6,48
21	6,02	6,90	7,22	5,65	72	9,44	8,96	10,00	9,01
24	4,60	4,82	4,04	3,59	75	7,65	8,43	8,64	8,04
30	1,16	1,82	1,36	2,09	78	8,42	8,02	8,05	6,41
33	2,43	3,85	3,29	4,77	81	2,83	2,84	2,80	2,92
39	6,87	7,87	8,03	6,45	84	3,33	3,17	3,09	3,42
42	3,44	4,12	4,60	3,95	87	3,42	3,72	3,76	3,12
45	4,84	4,56	4,30	6,00	93	2,99	2,35	2,23	2,80
48	7,88	7,56	8,60	6,78	96	2,42	2,90	3,06	3,44
51	4,14	5,10	4,90	4,65	Promedio (mm día ⁻¹)	4,70 ± 0,99	4,99 ± 0,86	4,99 ± 0,93	4,91 ± 0,72
					Total consumo (mm)	451,20	479,04	479,04	471,36

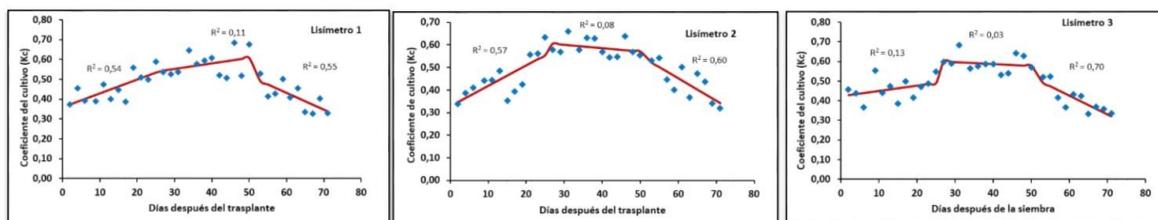
Anexo 2. Valores del coeficiente del cultivo de estevia para cada lisímetro



Anexo 3 Consumo de agua del cultivo de albahaca en milímetros determinada por medio de LD en el Valle geográfico del río Cauca (Colombia).

DDT	ETc (mm día ⁻¹)				DDT	ETc (mm día ⁻¹)			
	Lisímetro 1	Lisímetro 2	Lisímetro 3	Promedio		Lisímetro 1	Lisímetro 2	Lisímetro 3	Promedio
2	3,00	2,72	3,69	3,14	40	4,59	4,30	4,45	4,45
4	2,28	1,94	2,19	2,14	42	4,48	4,68	4,56	4,57
6	3,39	3,56	3,16	3,37	44	4,24	4,57	4,50	4,43
9	3,85	4,39	5,48	4,57	46	5,85	5,46	5,50	5,60
11	2,12	1,99	1,98	2,03	48	3,60	3,95	4,35	3,97
13	2,61	3,15	3,08	2,95	50	4,33	3,56	3,66	3,85
15	2,39	1,89	2,06	2,11	53	6,06	6,09	5,97	6,04
17	2,23	2,30	2,90	2,49	55	3,17	4,14	4,00	3,77
19	4,43	3,36	3,30	3,70	57	3,29	4,44	3,20	3,31
21	3,66	4,01	3,38	3,68	59	3,83	3,06	2,80	3,23
23	4,14	4,68	4,05	4,29	61	2,83	3,45	2,98	3,09
25	4,58	4,92	4,26	4,59	63	2,20	1,78	2,05	2,01
27	4,18	4,50	4,64	4,44	65	2,53	3,56	2,51	2,87
29	4,61	4,97	5,16	4,91	67	2,39	3,20	2,70	2,76
31	3,77	4,64	4,79	4,40	69	2,99	2,52	2,65	2,72
34	8,58	7,66	7,50	7,91	71	2,21	2,15	2,25	2,20
36	4,85	5,29	4,83	4,99	Promedio ETc diario	3,75 ± 0,44	3,84 ± 0,45	3,79 ± 0,44	3,79 ± 0,44
38	4,37	4,62	4,31	4,43	Consumo total (mm)	266,55	272,45	269,15	269,38

Anexo 4. Valores del coeficiente del cultivo de albahaca para cada lisímetro



Anexo 5. ANOVA de medidas repetidas para el estudio del efecto de la DN en la lixiviación de amonio, nitrato y total en los dos tiempos de muestreo en el cultivo de estevia

Pruebas de contrastes intra-sujetos

Medida: amonio

Origen	tiempo	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
tiempo	Lineal	32,240	1	32,240	9,996	,010
	Cuadrático	23,429	1	23,429	3,083	,110
tiempo * tratamiento	Lineal	39,761	4	9,940	3,082	,068
	Cuadrático	8,184	4	2,046	,269	,891
Error(tiempo)	Lineal	32,255	10	3,225		
	Cuadrático	75,991	10	7,599		

Pruebas de efectos inter-sujetos

Medida: amonio

Variable transformada: Promedio

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Intersección	548,384	1	548,384	106,098	,000
tratamiento	34,852	4	8,713	1,686	,229
Error	51,687	10	5,169		

Pruebas de contrastes intra-sujetos

Medida: nitrato

Origen	tiempo	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
tiempo	Lineal	1052,695	1	1052,695	40,257	,000
	Cuadrático	15,170	1	15,170	,522	,487
tiempo * tratamiento	Lineal	607,411	4	151,853	5,807	,011
	Cuadrático	121,488	4	30,372	1,044	,432
Error(tiempo)	Lineal	261,494	10	26,149		
	Cuadrático	290,856	10	29,086		

Pruebas de efectos inter-sujetos

Medida: nitrato

Variable transformada: Promedio

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Intersección	4538,080	1	4538,080	141,645	,000
tratamiento	859,873	4	214,968	6,710	,007
Error	320,385	10	32,038		

Pruebas de contrastes intra-sujetos

Medida: NT

Origen	tiempo	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
tiempo	Lineal	1453,387	1	1453,387	37,610	,000
	Cuadrático	76,305	1	76,305	1,588	,236
tiempo * tratamiento	Lineal	538,174	4	134,543	3,482	,050
	Cuadrático	106,893	4	26,723	,556	,700

Error(tiempo)	Lineal	386,441	10	38,644	
	Cuadrático	480,620	10	48,062	

Pruebas de efectos inter-sujetos

Medida: NT

Variable transformada: Promedio

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Intersección	8241,529	1	8241,529	162,353	,000
tratamiento	874,113	4	218,528	4,305	,028
Error	507,629	10	50,763		

Anexo 6. ANOVA de medidas repetidas para el estudio del efecto de la DN en la lixiviación de amonio, nitrato y total en los dos tiempos de muestreo en el cultivo de albahaca.

Pruebas de contrastes intra-sujetos

Medida: amonio

Origen	tiempo	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
tiempo	Lineal	,063	1	,063	,323	,582
tiempo * tratamiento	Lineal	36,466	4	9,116	46,407	,000
Error(tiempo)	Lineal	1,964	10	,196		

Pruebas de efectos inter-sujetos

Medida: amonio

Variable transformada: Promedio

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Intersección	296,416	1	296,416	428,001	,000
tratamiento	10,801	4	2,700	3,899	,037
Error	6,926	10	,693		

Pruebas de contrastes intra-sujetos

Medida: nitrato

Origen	tiempo	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
tiempo	Lineal	2731,684	1	2731,684	113,521	,000
tiempo * tratamiento	Lineal	247,858	4	61,964	2,575	,103
Error(tiempo)	Lineal	240,632	10	24,063		

Pruebas de efectos inter-sujetos

Medida: nitrato

Variable transformada: Promedio

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Intersección	14314,373	1	14314,373	322,149	,000
tratamiento	1313,158	4	328,289	7,388	,005
Error	444,340	10	44,434		

Pruebas de contrastes intra-sujetos

Medida: volumen

Origen	tiempo	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
tiempo	Lineal	952372,101	1	952372,101	60,710	,000
tiempo * tratamiento	Lineal	49017,539	4	12254,385	,781	,562
Error(tiempo)	Lineal	156872,530	10	15687,253		

Pruebas de efectos inter-sujetos

Medida: volumen

Variable transformada: Promedio

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Intersección	2887217,541	1	2887217,541	170,494	,000
tratamiento	74399,832	4	18599,958	1,098	,409
Error	169344,597	10	16934,460		

Pruebas de contrastes intra-sujetos

Medida: NT

Origen	tiempo	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
tiempo	Lineal	1894,962	1	1894,962	78,419	,000
tiempo * tratamiento	Lineal	213,212	4	53,303	2,206	,141

Error(tiempo)	Lineal	241,647	10	24,165	
---------------	--------	---------	----	--------	--

Pruebas de efectos inter-sujetos

Medida: NT

Variable transformada: Promedio

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Intersección	16480,664	1	16480,664	359,174	,000
tratamiento	1418,055	4	354,514	7,726	,004
Error	458,849	10	45,885		

Anexo 7. Promedios de amonio, nitrato, nitrógeno total y nitrógeno neto encontrados semanalmente producto de la mineralización de amonio y nitrato

Promedios de amonio (NH₄⁺) en mg·kg⁻¹·semana⁻¹ durante la mineralización de lombricompost y gallinaza.

Semanas	Lombricompost (kg·ha ⁻¹ de N)			Gallinaza (kg·ha ⁻¹ de N)			p	F
	200	250	300	200	250	300		
1 ¹	40,9±2,0 a	56,9±8,0 a	69,1±13,0 a	40,0±15,4 a	90,8±17,1 a	42,5±1,6 a	0,05	3,19
2 ²	133,9±8,3 a	118,8±15,0 a	129,4±20,1 a	176,0±62,6 a	137,9±38,5 a	64,6±10,0 b	0,34	1,27
3 ¹	71,0±6,4c	71,7±6,4c	57,6±10,8c	381,6±20,3 a	299,0±14,5b	91,2±5,8c	<0,001	139,4
4 ¹	117,8±7,3 a	93,4±11,0 ab	76,0±11,7 b	88,8±7,0 ab	52,0±13,5 b	124,9±13,3 a	<0,005	6,0
5 ¹	56,5±0,1c	61,1±6,0bc	101,7±5,2 a	70,5±6,4 abc	67,5±8,7 bc	90,9±9,2 ab	0,003	7,10
6 ²	78,1±0,5 a	84,7±7,4 a	71,8±2,4 a	74,0±1,5a	63,6±5,8 a	85,1±5,3 a	0,04	3,24
8 ¹	119,5±3,1 a	68,9±5,0 b	92,8±9,9 ab	91,9±7,0 ab	75,3±8,7 b	70,1±10,8 b	0,005	6,00
10 ¹	131,8±9,2 ab	82,7±12,8 bc	76,6±9,6 c	145,6±6,8 a	131,5±11,2 ab	112,6±12,5 abc	0,003	7,16
12 ¹	60,0±0,1 a	77,2±11,3a	84,0±13,3 a	70,2±10,9 a	92,6±21,5 a	89,2±17,0 a	0,51	0,89
14 ³	153,0±6,5 a	118,6±11,4 a	152,5±24,6 a	147,5±7,8 a	177,6±1,0 a	140,7±0,8 a	0,08	2,62
16 ²	144,4±4,1 a	163,8±4,7 a	120,2±12,1 a	152,0±0,3 a	140,7±12,5 a	136,5±10,0 a	0,06	2,95

Promedio de tres repeticiones ± error estándar. (1) Comparación de medias por test de Tukey (95%). (2) Comparación de medias por test de Dunnet (95%). Las comparaciones se hicieron entre tratamientos para una misma semana.

Promedios de nitrato (NO₃⁻) en mg·kg⁻¹ durante la mineralización de DN de lombricompost y gallinaza.

Semanas	Lombricompost (kg·ha ⁻¹ de N)			Gallinaza (kg·ha ⁻¹ de N)			p	F
	200	250	300	200	250	300		
1 ¹	57,1±19,7 a	33,0±7,9 a	41,3±12,9 a	60,0±21,4 a	38,0±3,3 a	42,6±5,8 a	0,68	0,63
2 ¹	73,4±8,8 c	241,2±44,5 b	141,4±31,0 bc	398,1±50,8 a	104,8±16,2 bc	119,2±8,0 bc	0,001	14,90
3 ¹	92,5±5,4 cd	124,7±8,8 cd	139,6±17,0 cd	489,6±13,8 a	422,5±15,9 b	165,1±15,7 c	0,001	161,90
4 ²	172,3±16,7 a	169,8±12,5 a	126,5±3,6a	104,2±9,2 a	142,9±18,9 a	202,9±46,1 a	0,09	2,52
5 ²	151,5±6,6 a	157,9±6,8 a	152,4±7,7ab	154,8±12,1 a	205,3±28,4 a	130,6±9,1 a	0,05	3,11
6 ¹	136,0±7,0a	147,0±13,3 a	141,6±7,4 a	132,1±17,1 a	175,1±2,4 a	174,2±23,4 a	0,16	1,92
8 ¹	171,6±6,4 a	154,0±12,4 a	167,8±7,8 a	224,0±27,6 a	212,5±19,6 a	186,8±14,7 a	0,07	2,76
10 ²	186,5±27,5 a	195,5±27,7 a	261,3±87,6 a	165,1±43,0 a	211,1±11,2 a	201,8±16,5 a	0,74	0,55
12 ¹	114,9±9,9 a	152,2±16,4 a	144,8±17,1 a	166,7±12,0 a	156,7±13,8 a	135,3±5,6 a	0,16	1,94
14 ¹	172,6±22,0 a	158,3±6,8 a	170,9±17,3 a	195,3±17,3 a	206,3±11,1 a	230,3±30,1 a	0,15	1,99
16 ¹	219,2±12,5 ab	178,3±6,8 bc	157,2±6,5 bc	192,1±16,8 abc	230,2±5,5 a	202,6±0,0 abc	0,002	7,69

Promedio de tres repeticiones ± error estándar. (1) Comparación de medias por test de Tukey (95%) (2) Comparación de medias por test de Dunnet (95%). Las comparaciones se hicieron entre tratamientos para una misma semana.

Promedios de nitrógeno total en mg·kg⁻¹ durante la mineralización de DN de lombricompost y gallinaza.

Semanas	Lombricompost (kg·ha ⁻¹ de N)			Gallinaza (kg·ha ⁻¹ de N)			p	F
	200	250	300	200	250	300		
1	98±18,4a	89,9±11,5a	110,4±25,9a	100,0±32,1a	128,8±20,4a	85,1±4,5a	0,72	0,57
2	207,3±8,2c	360±29,5b	270,8±11,0bc	574,1±29,5a	242,7±46,8bc	183,8±14,3c	<0,001	29,1
3	163,5±10,4d	196,4±11,1cd	197,2±13,2cd	871,2±21,4a	721,5±14,5b	256,3±11,0c	<0,001	475,3
4	290,1±11,3ab	263,2±21,4ab	202,5±11,9b	193,0±15,8b	194,9±11,0b	327,8±6,1a	0,004	6,48
5	208±6,7a	219±10,6a	254,1±12,3a	225,3±18,4a	272,8±37,1a	221,5±14,3a	0,23	1,63
6	214,1±7,5a	231,7±11,6a	213,4±9,8a	206,1±18,0a	238,7±6,1a	259,3±27,8a	0,21	1,68
8	291,1±5,6a	222,9±17,3a	260,6±17,2a	315,9±31,76a	287,8±28,2a	256,9±4,4a	0,08	2,61
10	318,3±20,3a	264,4±31,4a	337,9±95,1a	310,7±37,79a	342,6±22,2a	314,4±36,8a	0,94	0,24
12	174,9±9,7a	234,9±22,6a	228,8±29,8a	236,9±37,79a	249,3±24,9a	224,5±17,6a	0,23	1,60
14	325,7±26,5a	235,5±14,9a	323,4±40,0a	342,8±16,08a	383,9±11,2a	371,0±30,5a	0,11	2,26
16	363,6±16,5a	342,2±7,0a	277,4±8,4b	344,1±17,07a	370,9±7,2a	339,1±10,0a	0,002	7,82

Promedio de tres repeticiones ± error estándar. Comparación de medias por test de Tukey (95%). Las comparaciones se hicieron entre tratamientos para una misma semana.

Promedios de nitrógeno total neto en mg·kg⁻¹ durante la mineralización de DN de lombricompost y gallinaza.

Semanas	Lombricompost (kg·ha ⁻¹ de N)			Gallinaza (kg·ha ⁻¹ de N)			p	F
	200	250	300	200	250	300		
1	32,5±18,4a	24,4±11,5a	44,9±25,9a	34,5±32,1a	63,3±20,4a	19,6±4,5a	0,57	0,52
2	34,7±8,2c	187,4±29,5b	98,2±11,0bc	401,5±29,5a	70,1±46,8bc	11,2±14,3c	<0,001	29,9
3	39,7±10,4d	72,6±11,1cd	73,4±13,2cd	747,4±21,4a	597,7±14,5b	132,5±12,2c	<0,001	475,3
4	41,1±11,3ab	14,2±21,4ab	-46,5±11,9b	-56,03±15,8b	-54,1±11,0b	78,8±43,7a	0,004	6,5
5	-5,7±6,7a	5,3±10,6a	40,4±12,3a	11,59±18,4a	59,09±37,1a	7,79±14,7a	0,23	1,63
6	95,0±7,5a	112,5±11,6a	94,3±9,8a	87±18,0a	119,6±6,1a	140,2±27,8a	0,21	1,68
8	55,7±5,6a	-12,5±17,3a	25,3±17,2a	80,7±31,8a	52,6±28,2a	21,6±4,4a	0,08	2,60
10	83,0±20,3a	42,9±31,4a	102,6±95,1a	75,4±37,8a	107,3±22,2a	79,1±26,8a	0,94	0,24
12	48,1±9,7a	105,6±22,6a	105,0±29,8a	113,1±16,1a	125,5±24,9a	100,7±17,6a	0,23	1,60
14	64,8±26,5a	15,8±14,9a	62,4±40,0a	81,7±17,0a	122,8±11,2a	109,9±30,5a	0,11	2,26
16	144,3±16,5a	122,8±7,0a	58,1±8,4b	124,8±17,1a	151,6±7,2a	119,8±10,0a	0,002	7,82

Promedio de tres repeticiones ± error estándar. Comparación de medias por test de Tukey (95%). Las comparaciones se hicieron entre tratamientos para una misma semana.

Anexo 8. ANOVA de medidas repetidas de tres factores para el estudio de la mineralización del nitrógeno de lombricompost y gallinaza

Pruebas de contrastes intra-sujetos

Medida: AMONIO

Origen	SEMANA	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
SEMANA	Lineal	10147,328	1	10147,328	47,071	,000
	Cuadrático	20527,458	1	20527,458	66,136	,000
	Cúbico	63332,898	1	63332,898	79,549	,000
	Orden 4	76214,263	1	76214,263	123,937	,000
	Orden 5	17965,798	1	17965,798	20,724	,001
	Orden 6	853,216	1	853,216	,545	,474
	Orden 7	43050,087	1	43050,087	25,144	,000
	Orden 8	2,095	1	2,095	,001	,976
	Orden 9	20469,628	1	20469,628	22,669	,000
	Orden 10	152,136	1	152,136	,750	,404
SEMANA * tipo	Lineal	9541,745	1	9541,745	44,262	,000
	Cuadrático	71,613	1	71,613	,231	,640
	Cúbico	8061,180	1	8061,180	10,125	,008
	Orden 4	28828,864	1	28828,864	46,880	,000
	Orden 5	2700,972	1	2700,972	3,116	,103
	Orden 6	7673,854	1	7673,854	4,903	,047
	Orden 7	22483,320	1	22483,320	13,132	,003
	Orden 8	14698,540	1	14698,540	6,716	,024
	Orden 9	21303,675	1	21303,675	23,593	,000
	Orden 10	176,970	1	176,970	,872	,369
SEMANA * dosis	Lineal	10094,446	1	5047,223	23,413	,000
	Cuadrático	5702,937	2	2851,469	9,187	,004
	Cúbico	13262,151	2	6631,076	8,329	,005
	Orden 4	24780,550	2	12390,275	20,149	,000
	Orden 5	24854,566	2	12427,283	14,335	,001
	Orden 6	2532,622	2	1266,311	,809	,468
	Orden 7	27681,043	2	13840,522	8,084	,006
	Orden 8	8786,570	2	4393,285	2,007	,177
	Orden 9	9075,838	2	4537,919	5,026	,026
	Orden 10	25,162	2	12,581	,062	,940
SEMANA * tipo * dosis	Lineal	14817,643	2	7408,821	34,368	,000
	Cuadrático	3338,122	2	1669,061	5,377	,022
	Cúbico	4617,118	2	2308,559	2,900	,094
	Orden 4	15381,176	2	7690,588	12,506	,001
	Orden 5	7785,378	2	3892,689	4,490	,035
	Orden 6	2397,101	2	1198,550	,766	,486
	Orden 7	7110,959	2	3555,480	2,077	,168
	Orden 8	6355,607	2	3177,803	1,452	,272
	Orden 9	8033,117	2	4016,559	4,448	,036

Error(SEMANA)	Orden 10	5508,129	2	2754,065	13,570	,001
	Lineal	2586,891	12	215,574		
	Cuadrático	3724,562	12	310,380		
	Cúbico	9553,824	12	796,152		
	Orden 4	7379,344	12	614,945		
	Orden 5	10402,986	12	866,916		
	Orden 6	18780,246	12	1565,021		
	Orden 7	20545,942	12	1712,162		
	Orden 8	26263,657	12	2188,638		
	Orden 9	10835,585	12	902,965		
Orden 10	2435,460	12	202,955			

Pruebas de contrastes intra-sujetos

Medida: nitrato

Origen	semana	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
semana	Lineal	67045,354	1	67045,354	58,573	,000
	Cuadrático	35274,441	1	35274,441	31,392	,000
	Cúbico	105149,245	1	105149,245	87,501	,000
	Orden 4	81295,673	1	81295,673	94,705	,000
	Orden 5	74446,137	1	74446,137	61,422	,000
	Orden 6	113,545	1	113,545	,043	,840
	Orden 7	43414,123	1	43414,123	42,755	,000
	Orden 8	312,293	1	312,293	,285	,603
	Orden 9	25782,563	1	25782,563	13,020	,004
	Orden 10	2859,517	1	2859,517	2,177	,166
semana * dosis	Lineal	22450,410	2	11225,205	9,807	,003
	Cuadrático	9731,359	2	4865,679	4,330	,038
	Cúbico	19581,850	2	9790,925	8,148	,006
	Orden 4	11629,652	2	5814,826	6,774	,011
	Orden 5	12893,003	2	6446,501	5,319	,022
	Orden 6	2502,533	2	1251,266	,469	,637
	Orden 7	2207,485	2	1103,742	1,087	,368
	Orden 8	18476,750	2	9238,375	8,417	,005
	Orden 9	2587,964	2	1293,982	,653	,538
	Orden 10	13336,315	2	6668,158	5,076	,025
semana * tipo	Lineal	15624,782	1	15624,782	13,650	,003
	Cuadrático	289,469	1	289,469	,258	,621
	Cúbico	31829,615	1	31829,615	26,487	,000
	Orden 4	41010,502	1	41010,502	47,775	,000
	Orden 5	5344,740	1	5344,740	4,410	,058
	Orden 6	184,652	1	184,652	,069	,797
	Orden 7	58419,935	1	58419,935	57,533	,000
	Orden 8	55064,452	1	55064,452	50,170	,000
	Orden 9	6626,397	1	6626,397	3,346	,092
	Orden 10	9975,283	1	9975,283	7,593	,017
semana * dosis * tipo	Lineal	54670,519	2	27335,260	23,881	,000
	Cuadrático	5620,587	2	2810,293	2,501	,124
	Cúbico	1185,204	2	592,602	,493	,623
	Orden 4	72272,025	2	36136,012	42,096	,000
	Orden 5	59261,096	2	29630,548	24,447	,000
	Orden 6	24428,135	2	12214,067	4,578	,033
	Orden 7	18347,618	2	9173,809	9,034	,004
	Orden 8	23392,504	2	11696,252	10,657	,002
	Orden 9	26439,526	2	13219,763	6,676	,011
	Orden 10	11816,114	2	5908,057	4,497	,035
Error(semana)	Lineal	13735,751	12	1144,646		
	Cuadrático	13484,243	12	1123,687		
	Cúbico	14420,341	12	1201,695		
	Orden 4	10300,938	12	858,411		
	Orden 5	14544,509	12	1212,042		
	Orden 6	32013,768	12	2667,814		
	Orden 7	12185,088	12	1015,424		
	Orden 8	13170,584	12	1097,549		
	Orden 9	23763,369	12	1980,281		

Orden 10	15764,441	12	1313,703
----------	-----------	----	----------

Anexo 9. Analisis de varianza de medidas repetidas para uso de abonos nitrogenados de liberación lenta en la lixiviación de nitrato durante el periodo experimental de estevia.

Pruebas de contrastes intra-sujetos

Medida: Nlixiv

Origen	tiempo	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
tiempo	Lineal	395,548	1	395,548	12,049	,002
tiempo * tratamiento	Lineal	619,140	13	47,626	1,451	,198
Error(tiempo)	Lineal	919,229	28	32,830		

Pruebas de efectos inter-sujetos

Medida: Nlixiv

Variable transformada: Promedio

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Intersección	2255,165	1	2255,165	48,419	,000
tratamiento	3307,231	13	254,402	5,462	,000
Error	1304,141	28	46,576		

Pruebas de contrastes intra-sujetos

Medida: volu

Origen	tiempo	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
tiempo	Lineal	88205,762	1	88205,762	3,377	,077
tiempo * tratamiento	Lineal	364855,238	13	28065,788	1,074	,418
Error(tiempo)	Lineal	731434,000	28	26122,643		

Pruebas de efectos inter-sujetos

Medida: volu

Variable transformada: Promedio

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Intersección	4753337,190	1	4753337,190	176,911	,000
tratamiento	680549,143	13	52349,934	1,948	,068
Error	752316,667	28	26868,452		

Anexo 10. Analisis de varianza de medidas repetidas para uso de abonos orgánicos en la lixiviación de nitrógeno durante el periodo experimental de estevia.

Variable	Valor de F		
	Tratamiento (T)	Muestreo (M)	T*M
Nitrógeno lixiviado	1,896 (ND)	0,072 (ND)	0,529 (ND)
Volumen lixiviado	1,390 (ND)	3,289 (ND)	0,349 (ND)

Con $p < 0,05$ (*), $0,01$ (**), $0,001$ (***)

Anexo 11. Analisis de varianza de medidas repetidas para uso de abonos orgánicos en propiedades agronómicas durante el periodo experimental de estevia.

	AP	Variables agronómicas			
		Diámetro de tallo (mm)	MS (g/planta)	Rendimiento (Mg·ha ⁻¹)	NF (%)
Valor de F	1,56 (ND)	0,86 (ND)	5,60**	1,2 (ND)	0,18 (ND)

Con $p < 0,05$ (*), $0,01$ (**), $0,001$ (***)

MS

HSD Tukey ^{a,b}	tratamiento	N	Subconjunto	
			1	2
	G250	3	12,0667	
	G200	3	13,5667	
	L300	3	13,7333	
	T	3	14,7000	
	L250	3	18,4000	18,4000
	L200	3	20,4667	20,4667
	G300	3		24,7333
	Sig.		,091	,301

Anexo 12. Analisis de varianza de medidas repetidas para uso de abonos orgánicos en propiedades del suelo durante el periodo experimental de estevia.

	Propiedades del suelo			
	pH	CE	MOS	NTS
Valor de F	6,47 **	0,27 (ND)	11,79***	0,31 (ND)

Con p< 0,05 (*), 0,01 (**), 0,001 (***)

		pH final del suelo					
		tratamiento	N	Subconjunto			
				1	2	3	
HSD Tukey ^{a,b}	testigo		3	6,0633			
	lombricompost 300		3	6,2167	6,2167		
	gallinaza 300		3	6,2467	6,2467		
	gallinaza 200		3	6,3867	6,3867	6,3867	
	gallinaza 250		3	6,5567	6,5567	6,5567	
	lombricompost200		3		6,7767	6,7767	
	lombricompost 250		3			6,8467	
	Sig.				,103	,051	,144

		Materia orgánica				
		tratamiento	N	Subconjunto		
				1	2	
HSD Tukey ^{a,b}	testigo		3	4,1323		
	lombricompost200		3	4,8865		
	gallinaza 200		3		7,1717	
	lombricompost 300		3		7,1720	
	gallinaza 250		3		7,3110	
	gallinaza 300		3		7,7287	
	lombricompost 250		3		7,8217	
	Sig.				,864	,926

Anexo 13. Analisis de varianza de medidas repetidas para urea recubierta y SA en la lixiviación de nitrógeno durante el periodo experimental de estevia.

Variable	Valor de F		
	Tratamiento (T)	Muestreo (M)	T*M
Nitrógeno lixiviado	6,294**	11,145**	3,438*
Volumen lixiviado	1,620 (ND)	0,156 (ND)	2,179 (ND)

Con p< 0,05 (*), 0,01 (**), 0,001 (***)

		NLIX				
		tratamiento	N	Subconjunto		
				1	2	
HSD Tukey ^{a,b}	U150		3	2,1700		
	U200		3	2,3767		
	SA150		3	2,6867		
	Testigo		3	2,6867		
	U100		3	3,3067		
	SA100		3	4,7533		
	SA200		3		21,7000	
	Sig.				,994	1,000

Anexo 14. Analisis de varianza de medidas repetidas para uso de urea recubierta y SA en propiedades agronómicas durante el periodo experimental de estevia.

	Variables agronómicas				
	AP	Diámetro de tallo (mm)	MS (g/planta)	Rendimiento (Mg·ha ⁻¹)	NF (%)
Valor de F	0,524 (ND)	0,864 (ND)	0,508 (ND)	0,602 (ND)	0,977 (ND)

Con p< 0,05 (*), 0,01 (**), 0,001 (***)

Anexo 15. Analisis de varianza de medidas repetidas para uso de urea recubierta y SA en propiedades del suelo durante el periodo experimental de estevia.

	Propiedades del suelo			
	pH	CE	MOS	NTS
Valor de F	5,794 **	0,474 (ND)	1,231 (ND)	0,612 (ND)

Con $p < 0,05$ (*), $0,01$ (**), $0,001$ (***)

pH final del suelo

	pH final del suelo			
	tratamiento	N	Subconjunto	
			1	2
HSD Tukey ^{a,b}	sulfato de amonio100	3	5,7433	
	sulfato de amonio 150	3	5,9867	5,9867
	urea200	3	6,0100	6,0100
	testigo	3	6,0633	6,0633
	urea100	3		6,1567
	urea150	3		6,1700
	sulfato de amonio 200	3		6,3567
	Sig.		,129	,060

Anexo 16. Analisis de varianza de medidas repetidas para uso de abonos orgánicos en propiedades agronómicas durante el periodo experimental de albahaca.

	Variables agronómicas							
	AP	Diámetro de tallo (mm)	MF (g/planta)	MS (g/planta)	% MS	Rendimiento MF (Mg·ha ⁻¹)	Rendimiento MS (Mg·ha ⁻¹)	NF (%)
Valor de F	0,728 (ND)	0,687 (ND)	2,872*	4,889**	1,938 (ND)	2,871*	4,911**	5,803**

Con $p < 0,05$ (*), $0,01$ (**), $0,001$ (***)

Masa fresca

	Masa fresca			
	tratamiento	N	Subconjunto	
			1	2
HSD Tukey ^{a,b}	L300	3	27,7000	
	L200	3	40,1000	40,1000
	T	3	40,3333	40,3333
	G300	3	41,0000	41,0000
	L250	3	44,9667	44,9667
	G200	3	49,1333	49,1333
	G250	3		54,0000
	Sig.		,088	,453

Masa seca

	Masa seca			
	tratamiento	N	Subconjunto	
			1	2
HSD Tukey ^{a,b}	L300	3	8,1000	
	T	3	10,0333	
	L200	3	10,3333	10,3333
	L250	3	11,4333	11,4333
	G200	3	11,9667	11,9667
	G300	3	12,1667	12,1667
	G250	3		14,3333
	Sig.		,068	,075

Rendimiento hoja fresca

	Rendimiento hoja fresca			
	tratamiento	N	Subconjunto	
			1	2
HSD Tukey ^{a,b}	L300	3	6,2967	
	L200	3	9,1133	9,1133
	T	3	9,1667	9,1667
	G300	3	9,3200	9,3200
	L250	3	10,2200	10,2200
	G200	3	11,1667	11,1667

G250	3		12,2733
Sig.		,088	,452

rendimiento hoja seca en kg/ha

	tratamiento	N	Subconjunto	
			1	2
HSD Tukey ^{a,b}	L300	3	1,8400	
	T	3	2,2800	
	L200	3	2,3467	2,3467
	L250	3	2,6000	2,6000
	G200	3	2,7200	2,7200
	G300	3	2,7667	2,7667
	G250	3		3,2567
	Sig.		,067	,074

NITROGENO FOLIAR

	tratamiento	N	Subconjunto	
			1	2
HSD Tukey ^{a,b}	T	3	,1367	
	L250	3	,3267	
	G200	3	,4867	
	L300	3	,5800	
	L200	3	,6467	,6467
	G300	3	,8667	,8667
	G250	3		1,4267
	Sig.		,108	,076

Anexo 17. Analisis de varianza de medidas repetidas para uso de abonos orgánicos en propiedades del suelo durante el periodo experimental de albahaca.

	Propiedades del suelo			
	pH	CE	MOS	NTS
Valor de F	0,702 (ND)	5,777*	2,725 (ND)	1,912 (ND)

Con p < 0,05 (*), 0,01 (**), 0,001 (***)

conductividad electrica

	tratamiento	N	Subconjunto	
			1	2
HSD Tukey ^{a,b}	L250	3	,4867	
	T	3	,5067	
	L300	3	,6033	,6033
	G200	3	,6267	,6267
	L200	3	,6867	,6867
	G300	3		,7833
	G250	3		,8167
	Sig.		,175	,131

Anexo 18. Analisis de varianza de medidas repetidas para uso de U y SA en propiedades agronómicas durante el periodo experimental de albahaca.

	Variables agronómicas							
	AP	Diámetro de tallo (mm)	MF (g/planta)	MS (g/planta)	% MS	Rendimiento MF (Mg·ha ⁻¹)	Rendimiento MS (Mg·ha ⁻¹)	NF (%)
Valor de F	1,053 (ND)	1,475 (ND)	0,807 (ND)	2,226 (ND)	3,219*	0,808 (ND)	2,218 (ND)	19,344***

Con p < 0,05 (*), 0,01 (**), 0,001 (***)

porcentaje de masa seca

	tratamiento	N	Subconjunto	
			1	2
HSD Tukey ^{a,b}	T	3	25,0667	
	U200	3	29,3800	29,3800
	SA100	3	30,8233	30,8233
	U150	3	31,1400	31,1400
	U100	3	36,6400	36,6400
	SA150	3	38,7233	38,7233
	SA200	3		42,9633
	Sig.		,141	,144

NITROGENO FOLIAR

	tratamiento	N	Subconjunto		
			1	2	
HSD Tukey ^{a,b}	T	3	,1367		
	U200	3	,3500		
	U100	3		2,7067	
	SA100	3		2,7367	
	U150	3		2,8033	
	SA200	3		2,9967	
	SA150	3		3,4933	
	Sig.			,999	,559

Anexo 19. Analisis de varianza de medidas repetidas para U y SA en propiedades del suelo durante el periodo experimental de albahaca.

	Propiedades del suelo			
	pH	CE	MOS	NTS
Valor de F	1,690 (ND)	25,948***	0,294 (ND)	2,953*

Con p< 0,05 (*), 0,01 (**), 0,001 (***)

conductividad electrica

	tratamiento	N	Subconjunto					
			1	2	3	4	5	
HSD Tukey ^{a,b}	T	3	,5067					
	U100	3	,6367	,6367				
	U150	3		,8733	,8733			
	U200	3			,9633			
	SA100	3			1,0800	1,0800		
	SA150	3				1,3467	1,3467	
	SA200	3					1,4367	
	Sig.			,811	,236	,368	,144	,958

Nitrógeno total

	tratamiento	N	Subconjunto		
			1	2	
HSD Tukey ^{a,b}	SA150	3	,0567		
	U150	3	,1033	,1033	
	U200	3	,1333	,1333	
	SA100	3	,1367	,1367	
	U100	3	,1733	,1733	
	SA200	3	,2100	,2100	
	T	3		,2233	
	Sig.			,078	,240

Anexo 20. Referencias utilizadas para el análisis de estrategias usadas para aumentar la eficiencia de la fertilización nitrogenada y disminuir la lixiviación de nitrato.

- Köhl, L. & Van der Heijden, M.G.A. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungal species differ in their effect on nutrient leaching. *Soil Biology and Biochemistry*, 94: 191 – 199.
- Köhl, L. & Van der Heijden, M.G.A. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungal species differ in their effect on nutrient leaching. *Soil Biology and Biochemistry*, 94: 191 – 199.
- Kanthle, A. K., Lenka, N. K., Lenka, S. & Tedia, K. (2016). Biochar impact on nitrate leaching as influenced by native soil organic carbon in an Inceptisol of central India. *Soil and Tillage Research*, 157: 65 – 72.
- Plaza-Bonilla, D., Nolot, J. M., Raffaillac, D. & Justes, E. (2015). Cover crops mitigate nitrate leaching in cropping systems including grain legumes: Field evidence and model simulations. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 212: 1–12.
- Zhang, Y., Wang, H., Liu, S., Lei, Q., Liu, J., He, J., Zhai, L., Ren, T. & Liu, H. (2015). Identifying critical nitrogen application rate for maize yield and nitrate leaching in a Haplic Luvisol soil using the DNDC model. *Science of the Total Environment*, 514: 388–398.
- Wang, H., Guo, Z., Shi, Y., Zhang, Y. & Yu, Z. (2015). Impact of tillage practices on nitrogen accumulation and translocation in wheat and soil nitrate-nitrogen leaching in drylands. *Soil and Tillage Research*, 153: 20 – 27.
- Eriksen, J., Askegaard, M., Rasmussen, J. & Sørensen, K. (2015). Nitrate leaching and residual effect in dairy crop rotations with grass– clover leys as influenced by sward age, grazing, cutting and fertilizer regimes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 212: 75–84.
- Hansen, E.M. & Eriksen, J. (2016). Nitrate leaching in maize after cultivation of differently managed grass-clover leys on coarse sand in Denmark. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 216: 309–313.
- Wang, J., Wang, D., Zhang, G., Wang, Y., Wang, C., Teng, Y., Christie, P. (2014). Nitrogen and phosphorus leaching losses from intensively managed paddy fields with straw retention. *Agricultural Water Management*, 141: 66–73.
- Benoit, M., Garnier, J., Billen, G., Tournebise J., Gréhan, E. & Mary, B. (2015). Nitrous oxide emissions and nitrate leaching in an organic and a conventional cropping system (Seine basin, France). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 213: 131–141.
- Jamali, H., Quayle, W.C. & Baldock, J. (2015). Reducing nitrous oxide emissions and nitrogen leaching losses from irrigated arable cropping in Australia through optimized irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 208: 32–39.
- Marhan, S., Auber, J. & Poll, C. (2015). Additive effects of earthworms, nitrogen-rich litter and elevated soil temperature on N₂O emission and nitrate leaching from an arable soil. *Applied Soil Ecology*, 86: 55–61.
- Tafteh, A. & Sepaskhah, A. R. (2012). Application of HYDRUS-1D model for simulating water and nitrate leaching from continuous and alternate furrow irrigated rapeseed and maize fields. *Agricultural Water Management*, 113: 19– 29.
- Colombani, N., Mastrociccio, M., Di Giuseppe, D., Faccini, B. & Coltorti, M. (2015). Batch and column experiments on nutrient leaching in soils amended with Italian natural zeolites. *Catena*, 127: 64–71.

15. Richards K.G., Jahangir, M.M.R., Drennan, M., Lenehan, J.J., Connolly, J., Brophy, C., Carton, O.T. (2015). Effect of an agri-environmental measure on nitrate leaching from a beef farming system in Ireland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 202: 17–24.
16. Jia, X., Shao, L., Liu, P., Zhao, B., Gu, L., Dong, S., Hwat Bing, S., Zhang, J. & Zhao, B. (2014). Effect of different nitrogen and irrigation treatments on yield and nitrate leaching of summer maize (*Zea mays* L.) under lysimeter conditions. *Agricultural Water Management*, 137: 92–103.
17. Delin, S. & Stenberg, M. (2014). Effect of nitrogen fertilization on nitrate leaching in relation to grain yield response on loamy sand in Sweden. *European Journal of Agronomy*, 52: 291–296.
18. Yagioka, A., Komatsuzaki, M., Kaneko, N. & Ueno, H. (2015). Effect of no-tillage with weed cover mulching versus conventional tillage on global warming potential and nitrate leaching. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 200: 42–53.
19. Jabloun, M., Schelde, K., Tao, F. & Olesen, J. E. (2015). Effect of temperature and precipitation on nitrate leaching from organic cereal cropping systems in Denmark. *European Journal of Agronomy*, 62: 55–64.
20. Meisinger, J. J., Palmer, R. E. & Timlin, D. J. (2015). Effects of tillage practices on drainage and nitrate leaching from winter wheat in the Northern Atlantic Coastal-Plain USA. *Soil & Tillage Research*, 151: 18–27.
21. Cao, Y., Tian, Y., Yin, B. & Zhu, Z. (2014). Improving agronomic practices to reduce nitrate leaching from the rice–wheat rotation system. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 195: 61–67.
22. Gholamhosseini, M., AghaAlikhani M., Modarres Sanavy, S.A.M. & Mirjalili, S.M. (2013). Interactions of irrigation, weed and nitrogen on corn yield, nitrogen use efficiency and nitrate leaching. *Agricultural Water Management*, 126: 9–18.
23. Poch-Massegúa, R., Jiménez-Martínez, J., Wallis, K.J., Ramirez de Cartagena, F. & Candela, L. (2014). Irrigation return flow and nitrate leaching under different crops and irrigation methods in Western Mediterranean weather conditions. *Agricultural Water Management*, 134: 1–13.
24. Cicek, H., Martens, J. R. T., Bamford, K. C. & Entz, M. H. (2015). Late-season catch crops reduce nitrate-leaching risk after grazed green manures but release N slower than wheat demand. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 202: 31–41.
25. Gu, L.M., Liu, T. N., Zhao, J., Dong, S.T., Liu, P., Zhang, J. W. & Zhao, B. (2015). Nitrate leaching of winter wheat grown in lysimeters as affected by fertilizers and irrigation on the North China Plain. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(2): 374–388.
26. Perego, A., Basile, A., Bonfante, A., De Mascellis, R., Terribile, F., Brenna, S. & Acutis, M. (2012). Nitrate leaching under maize cropping systems in Po Valley (Italy). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 147: 57–65.
27. Zupanc, V., Sturm, M., Lojen, S., Marsic-Kacjan, N., Adu-Gyamfi, J., Bracic-Zeleznik, B., Urbanc, J. & Pintar, M. (2011). Nitrate leaching under vegetable field above a shallow aquifer in Slovenia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 144: 167–174.
28. Min, J., Zhang, H. & Shi, W. (2012). Optimizing nitrogen input to reduce nitrate-leaching loss in greenhouse vegetable production. *Agricultural Water Management*, 111: 53–59.
29. Jamali, H., Quayle, W.C. & Baldock, J. (2015). Reducing nitrous oxide emissions and nitrogen leaching losses from irrigated arable cropping in Australia through optimized irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 208: 32–39.
30. Phogat, V., Skewes, M.A., Cox, J.W., Sanderson, G., Alam, J. & Šimunek, J. (2014). Seasonal simulation of water, salinity and nitrate dynamics under drip-irrigated mandarin (*Citrus reticulata*) and assessing management options for drainage and nitrate leaching. *Journal of Hydrology*, 513: 504–516.
31. Monaghan, R. M., Smith, L. C. & De Klein C.A.M. (2013). The effectiveness of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) in reducing nitrate leaching and nitrous oxide emissions from a grazed winter forage crop in southern New Zealand. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 175: 29–38.
32. Ruidisch, M., Bartsch, S., Kettering, L., Huwe, B. & Frei, S. (2013). The effect of fertilizer best management practices on nitrate leaching in a plastic mulched ridge cultivation system. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 169: 21–32.
33. Buckthought, L.E., Clough, T.J., Cameron, K.C., Di, H.J. & Shepherd, M.A. (2015). Urine patch and fertiliser N interaction: Effects of fertiliser rate and season of urine application on nitrate leaching and pasture N uptake. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 203: 19–28.
34. Soto, F., Gallardo, M., Thompson, R. B., Peña-Fleitas, M. T. & Padilla, F. M. (2015). Consideration of total available N supply reduces N fertilizer requirement and potential for nitrate leaching loss in tomato production. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 200: 62–70.
35. Vázquez, N., Pardo, A., Suso, M.L. & Quemada, M. (2006). Drainage and nitrate leaching under processing tomato growth with drip irrigation and plastic mulching. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 112: 313–323.
36. Thompson, R.B., Gallardo, M., Rodríguez, J.S., Sánchez, J.A., & Magán, J.J. (2013). Effect of N uptake concentration on nitrate leaching from tomato grown in free-draining soilless culture under Mediterranean conditions. *Scientia Horticulturae*, 150: 387–398.
37. Li, X., Hu, C., Delgado, J.A., Zhang, Y. & Ouyang, Z. (2007). Increased nitrogen use efficiencies as a key mitigation alternative to reduce nitrate leaching in north china plain. *Agricultural Water Management*, 89: 137–147.
38. Liang, X. Q., Xu L., Li H., He, M. M., Qian, Y. C., Liu, J., Nie, Z.Y., Ye, Y.S. & Chen, Y. (2011). Influence of N fertilization rates, rainfall, and temperature on nitrate leaching from a rainfed winter wheat field in Taihu watershed. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36: 395–400.
39. Whitmore, A.P. & Schroder J.J. (2007). Intercropping reduces nitrate leaching from under field crops without loss of yield: A modelling study. *European Journal of Agronomy*, 27: 81–88.
40. Soyal, A. A., Bristow, K. L. & Šimunek, J. (2012). Minimizing nitrogen leaching from furrow irrigation through novel fertilizer placement and soil surface management strategies. *Agricultural Water Management*, 115: 242–251.
41. Xiong, Z., Huang, T.Q., Ma, Y.C., Xing, G. X. & Zhu, Z. L. (2010). Nitrate and Ammonium Leaching in Variable- and Permanent-Charge Paddy Soils. *Pedosphere*, 20(2): 209–216.
42. Carneiro, J.P., Coutinho, J. & Trindade, H. (2012). Nitrate leaching from a maize x oats double-cropping forage system fertilized with organic residues under Mediterranean conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 160: 29–39.
43. Neumann, A., Torstensson, G. & Aronsson, H. (2012). Nitrogen and phosphorus leaching losses from potatoes with different harvest times and following crops. *Field Crops Research*, 133: 130–138.
44. Svoboda, N., Taube, F., Wienforth, B., Klus, C., Kage, H. & Herrmann, A. (2013). Nitrogen leaching losses after biogas residue application to maize. *Soil & Tillage Research*, 130: 69–80.
45. Long, G. & Sun, B. (2012). Nitrogen leaching under corn cultivation stabilized after four years application of pig manure to red soil in subtropical China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 146: 73–80.
46. Pappa, V. A., Rees, R. M., Walker, R. L., Baddeley, J. A. & Watson, C. A. (2011). Nitrous oxide emissions and nitrate leaching in an arable rotation resulting from the presence of an intercrop. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 141: 153–161.
47. Hu B., Fan, M. S., Hao, Y. F. & Zhang, J. H. (2012). Potato-Cabbage Double Cropping Effect on Nitrate Leaching and Resource-Use Efficiencies in an Irrigated Area. *Pedosphere*, 22(6): 842–847.
48. Qiao, J., Yang, L., Yan, T., Xue, F. & Zhao, D. (2013). Rice dry matter and nitrogen accumulation, soil mineral N around root and N leaching, with increasing application rates of fertilizer. *European Journal of Agronomy*, 49: 93–103.
49. Fuller, K.D., Gordon, R., Grimmett, M., Fillmore, S., Madani, A., VanRoestel, J., Stratton, G.W., MacLeod, J., Embree, C. & St. George, E. (2010). Seasonal and crop rotational effects of manure management on nitrate–nitrogen leaching in Nova Scotia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 137: 267–275.
50. Wang, H., Ju, X., We, Y., Li, B., Zhao, L. & Hu, K. (2010). Simulation of bromide and nitrate leaching under heavy rainfall and high-intensity irrigation rates in North China Plain. *Agricultural Water Management*, 97: 1646–1654.
51. Hu, K., Li, B., Chen, D., Zhang, Y. & Edis, R. (2008). Simulation of nitrate leaching under irrigated maize on sandy soil in desert oasis in Inner Mongolia, China. *Agricultural Water Management*, 95: 1180–1188.
52. Nguyen, T. T., Ruidisch, M., Koellner, T. & Tenhunen, J. (2014). Synergies and tradeoffs between nitrate leaching and net farm income: The case of nitrogen best management practices in South Korea. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 186: 160–169.
53. Gholamhosseini, M., Ghalavand, A., Khodaei-Joghani, A., Dolatabadian, A., Zakikhani, H. & Farmanbar, E. (2013). Zeolite-amended cattle manure effects on sunflower yield, seed quality, water use efficiency and nutrient leaching. *Soil & Tillage Research*, 126: 193–202.
54. Bolado-Rodríguez, S., García-Sinovas, D. & Álvarez-Benedí, J. (2010). Application of pig slurry to soils. Effect of air stripping treatment on nitrogen and TOC leaching. *Journal of Environmental Management*, 91: 2594–2598.
55. Hansen, E.M., Munkholm, L.J., Melander, B. & Olesen, J.E. (2010). Can non-inversion tillage and straw retention reduce N leaching in cereal-based crop rotations? *Soil & Tillage Research*, 109: 1–8.
56. Gabriel, J. L., Garrido, A. & Quemada, M. (2013). Cover crops effect on farm benefits and nitrate leaching: Linking economic and environmental analysis. *Agricultural Systems*, 121: 23–32.
57. Yao, Y., Gao, B., Zhang, M., Inyang, M. & Zimmerman, A.R. (2012). Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. *Chemosphere*, 89: 1467–1471.
58. Malekian, R., Abedi-Koupai, J. & Eslamian, S. S. (2011). Influences of clinoptilolite and surfactant-modified clinoptilolite zeolite on nitrate leaching and plant growth. *Journal of Hazardous Materials*, 185: 970–976.
59. Nie, S., A. E. E., Chen, Y., Sui, P., Huang, J. & Huang, S. (2012). Nitrate Leaching from Maize Intercropping Systems with N Fertilizer Over- Dose. *Journal of Integrative Agriculture*, 11(9): 1555–1565.
60. Gheysari, M., Mirjalili, S. M., Homaei, M., Asadi, M. E. & Hoogenboom, G. (2009). Nitrate leaching in a silage maize field under different irrigation and nitrogen fertilizer rates. *Agricultural Water Management*, 96: 946–954.
61. Yuan, H., Lu, T., Wang, Y., Chen, Y. & Lei, T. (2016). Sewage sludge biochar: Nutrient composition and its effect on the leaching of soil nutrients. *Geoderma*, 267: 17–23.
62. Constantin, J., Mary, B., Laurent, F., Aubriou, G., Fontaine, A., Kervilliant, P. & Beaudoin, N. (2010). Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 135: 268–278.
63. Waddell J.T. & Weil, R.R. (2006). Effects of fertilizer placement on solute leaching under ridge tillage and no tillage. *Soil & Tillage Research*, 90: 194–204.
64. Yu, Q., Chen, Y., Ye, X., Zhang, Q., Zhang, Z. & Tian, P. (2007). Evaluation of nitrification inhibitor 3,4-dimethyl pyrazole phosphate on nitrogen leaching in undisturbed soil columns. *Chemosphere*, 67: 872–878.
65. Mkhabela, M.S., Madani, A., Gordon, R., Burton, D., Cudmore, D., Elmi, A. & Hart, W. (2008). Gaseous and leaching nitrogen losses from no-tillage and conventional tillage systems following surface application of cattle manure. *Soil & Tillage Research*, 98: 187–199.
66. Fangueiro, D., Surgu, S., Napier, V., Menaia, J., Vasconcelos, E. & Coutinho, J. (2014). Impact of slurry management strategies on potential leaching of nutrients and pathogens in a sandy soil amended with cattle slurry. *Journal of Environmental Management*, 146: 198–205.
67. Zhou, J.B., Xi, J. G., Chen, Z. J. & Li, S. X. (2006). Leaching and transformation of nitrogen fertilizers in soil after application of n with irrigation: a soil column method. *Pedosphere*, 16(2): 245–252.
68. Sieling, K. & Kage, H. (2006). N balance as an indicator of N leaching in an oilseed rape – winter wheat – winter barley rotation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 115: 261–269.

69. Esteller, M.V., Martínez-Valdés, H., Garrido, S. & Uribe, Q. (2009). Nitrate and phosphate leaching in a Phaeozem soil treated with biosolids, composted biosolids and inorganic fertilizers. *Waste Management*, 29: 1936–1944.
70. Mantovi, P., Fumagalli, L., Beretta, G. P. & Guermandi, M. (2006). Nitrate leaching through the unsaturated zone following pig slurry applications. *Journal of Hydrology*, 316: 195–212.
71. Jaynes, D.B. (2013). Nitrate loss in subsurface drainage and corn yield as affected by timing of sidedress nitrogen. *Agricultural Water Management*, 130: 52–60.
72. Blum, J., Melfi, A. J., Montes, C. R. & Gomes, T. M. (2013). Nitrogen and phosphorus leaching in a tropical Brazilian soil cropped with sugarcane and irrigated with treated sewage effluent. *Agricultural Water Management*, 117: 115–122.
73. Armour, J.D., Nelson, P.N., Daniells, J.W., Rasiah, V. & Inman-Bamber, N.G. (2013). Nitrogen leaching from the root zone of sugarcane and bananas in the humidtropics of Australia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 180: 68–78.
74. Ghiberto, P.J., Libardi, P.L. & Trivelin, P.C.O. (2015). Nutrient leaching in an Ultisol cultivated with sugarcane. *Agricultural Water Management*, 148: 141–149.
75. Arbat, G., Roselló, A., Domingo Olivé, F., Puig-Bargués, J., González Llinás, E., Duran-Ros, M., Pujó, J. & Ramírez de Cartagena, F. (2013). Soil water and nitrate distribution under drip irrigated corn receiving pig slurry. *Agricultural Water Management*, 120: 11–22.
76. Zhou, S. L., Wu, Y. C., Wang, Z. M., Lu, L. Q. & Wang, R. Z. (2008). The nitrate leached below maize root zone is available for deep-rooted wheat in winter wheat summer maize rotation in the North China Plain. *Environmental Pollution*, 152: 723–730.
77. Steenwerth, K. L. & Belina, K.M. (2010). Vineyard weed management practices influence nitrate leaching and nitrous oxide emissions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 138: 127–131.
78. Mardomingo, I. J., Jiménez-Hernández, M. E., Moreno, L., De la Losa, A., De la Cruz, M. T. & Casermeiro, M. A. (2015). Application of high doses of organic amendments in a Mediterranean agricultural soil: An approach for assessing the risk of groundwater contamination. *Catena*, 131: 74–83.
79. Wang, Z., Miao, Y. & Li, S. (2015). Effect of ammonium and nitrate nitrogen fertilizers on wheat yield in relation to accumulated nitrate at different depths of soil in drylands of China. *Field Crops Research*, 183: 211–224.
80. Louro, A., Sawamoto, T., Chadwick, D., Pezzolla, D., Bol, R., Báez, D. & Cardenas, L. (2013). Effect of slurry and ammonium nitrate application on greenhouse gas fluxes of a grassland soil under atypical South West England weather conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 181:1–11.
81. Yang, R. & Wang, X. (2011). Effects of nitrogen fertilizer and irrigation rate on nitrate present in the profile of a sandy farmland in Northwest China. *Procedia Environmental Sciences*, 11: 726-732.
82. Kadiyala, M.D.M., Jones, J.W., Mylavarapu, R.S., Li, Y.C. & Reddy, M.D. (2015). Identifying irrigation and nitrogen best management practices for aerobic rice–maize cropping system for semi-arid tropics using CERES-rice and maize models. *Agricultural Water Management*, 149: 23–32.
83. Sun, Y., Hu, K., Zhang, K., Jiang, L. & Xu, Y. (2012). Simulation of nitrogen fate for greenhouse cucumber grown under different water and fertilizer management using the EU-Rotate N model. *Agricultural Water Management*, 112: 21–32.
84. Moradzadeh, M., Moazed, H., Sayyad, G. & Khaledian, M. (2014). Transport of nitrate and ammonium ions in a sandy loam soil treated with potassium zeolite – Evaluating equilibrium and non-equilibrium equations. *Acta Ecologica Sinica*, 34: 342–350.
85. Wen, Z., Shen, J., M. Blackwell, Li H., Zhao B. & Yuan, H. (2016). Combined Applications of Nitrogen and Phosphorus Fertilizers with Manure Increase Maize Yield and Nutrient Uptake via Stimulating Root Growth in a Long-Term Experiment. *Pedosphere*, 26(1): 62–73.
86. Fan, Z., Lin, S., Zhang, X., Jiang, Z., Yang, K., Jian, D., Chen, Y., Li, J., Chen, Q. & Wang, J. (2014). Conventional flooding irrigation causes an overuse of nitrogen fertilizer and low nitrogen use efficiency in intensively used solargreenhouse vegetable production. *Agricultural Water Management*, 144: 11–19.
87. Maltas, A., Charles, R., Jeangros, B. & Sinaj, S. (2013). Effect of organic fertilizers and reduced-tillage on soil properties, crop nitrogen response and crop yield: Results of a 12-year experiment in Changins, Switzerland. *Soil & Tillage Research*, 126: 11–18.
88. Guo, L., Wu, G., Li, Y., Li, C., Liu, W., Meng, J., Liu, H., Yu, X. & Jiang, G. (2016). Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat–maize rotation system in Eastern China. *Soil & Tillage Research*, 156: 140–147.
89. Zhao, J., Ni, T., Li, J., Lu, Q., Fang, Z., Huang, Q., Zhang, R., Li, R., Shen, B. & Shen, Q. (2016). Effects of organic–inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields, soil biological activity and bacterial community structure in a rice–wheat cropping system. *Applied Soil Ecology*, 99: 1–12.
90. Bruno, I. P., Unkovich, M. J., Bortolotto, R. P., Bacchi, S. O. S., Dourado-Neto, D. & Reichardt, K. (2011). Fertilizer nitrogen in fertigated coffee crop: Absorption changes in plant compartments over time. *Field Crops Research*, 124: 369–377.
91. Bai, J., Cao, W., Xiong, J., Zeng, N., Gao, S. & Shimizu, K. (2015). Integrated application of February Orchid (*Orychophragmus violaceus*) as green manure with chemical fertilizer for improving grain yield and reducing nitrogen losses in spring maize system in northern China. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(12): 2490–2499.
92. Grant, C. A., Derksen, D. A., McLaren, D. & Byron Irvine, R. (2011). Nitrogen fertilizer and urease inhibitor effects on canola seed quality in a one-pass seeding and fertilizing system. *Field Crops Research*, 121: 201–208.
93. Pawlett, M., Deeks, L.K. & Sakrabani, R. (2015). Nutrient potential of biosolids and urea derived organo-mineral fertilisers in a field scale experiment using ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Field Crops Research*, 175: 56–63.
94. Abdel-Mageed, T. A. & Semida, W. M. (2015). Organo mineral fertilizer can mitigate water stress for cucumber production (*Cucumis sativus* L.). *Agricultural Water Management*, 159: 1–10.
95. Bedada, W., Lemenih, M. & Karltun, E. (2016). Soil nutrient build-up, input interaction effects and plot level N and P balances under long-term addition of compost and NP fertilizer. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 218: 220–231.
96. Mete, F. Z., Mia, S., Dijkstra, F. A., Abuysuf, M. & Hossain, A. S. (2015). Synergistic Effects of Biochar and NPK Fertilizer on Soybean Yield in an Alkaline Soil. *Pedosphere*, 25(5): 713–719.
97. Guan, G., Tu, S., Yang, J., Zhang, J. & Yang, L. (2011). A Field Study on Effects of Nitrogen Fertilization Modes on Nutrient Uptake, Crop Yield and Soil Biological Properties in Rice-Wheat Rotation System. *Agricultural Sciences in China*, 10(8): 1254-1261.
98. Xie, K., Li, X., He, F., Zhang, Y., Wan, L., David, B. H., Wang, D., Qin, Y. & Fadul, G.M. (2015). Effect of nitrogen fertilization on yield, N content, and nitrogen fixation of alfalfa and smooth brome grass grown alone or in mixture in greenhouse pots. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(9): 1864–1876.
99. Li, S.X., Wang, Z.H., Li, S.Q. & Gao, Y.J. (2015). Effect of nitrogen fertilization under plastic mulched and non-plastic mulched conditions on water use by maize plants in dryland areas of China. *Agricultural Water Management* 162 (2015) 15–32.
100. Zhou, X., Fornara, D., Wasson, E. A., Wang, D., Ren, G., Christie, P. & Jia, Z. (2015). Effects of 44 years of chronic nitrogen fertilization on the soil nitrifying community of permanent grassland. *Soil Biology & Biochemistry*, 91: 76-83.
101. Li, Y., Chen, X., Shamsi, I. H., Fang, P. & Lin X. (2012). Effects of Irrigation Patterns and Nitrogen Fertilization on Rice Yield and Microbial Community Structure in Paddy Soil. *Pedosphere*, 22(5): 661–672.
102. Dong, H., Kong, X., Li, W., Tang, W. & Zhang, D. (2010). Effects of plant density and nitrogen and potassium fertilization on cotton yield and uptake of major nutrients in two fields with varying fertility. *Field Crops Research*, 119: 106–113.
103. Yuan, H., Blackwell, M., Rahm, C. & Chen, Q. (2015). Fertilization and Catch Crop Strategies for Improving Tomato Production in North China. *Pedosphere*, 25(3): 364–371, 2015.
104. Adams, C. B., Erickson, J. E. & Singh, M. P. (2015). Investigation and synthesis of sweet sorghum crop responses to nitrogen and potassium fertilization. *Field Crops Research*, 178: 1–7.
105. Stamatiadis, S., Tsadilas, C., Samaras, V., Schepers, J.S. & Eskridge, K. (2016). Nitrogen uptake and N-use efficiency of Mediterranean cotton under varied deficit irrigation and N fertilization. *European Journal of Agronomy*, 73: 144–151.
106. Bufalo, J., Cantrell, C. L., Astakie, T., Zheljazkov, V.D., Gawde, A. & Fernandes Boaro, C. S. (2015). Organic versus conventional fertilization effects on sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) growth in a greenhouse system. *Industrial Crops and Products*, 74: 249–254.
107. Dossou-Yovo, E. R., Brüggemann, N., Jesse, N., Huat, J., Ago, E. E. & Agbossou, E. K. (2016). Reducing soil CO₂ emission and improving upland rice yield with no-tillage, straw mulch and nitrogen fertilization in northern Benin. *Soil & Tillage Research*, 156: 44–53.
108. Tian, W., Wang, L., Li, Y., Zhuang, K., Li, G., Zhang, J., Xiao, X. & Xi, Y. (2015). Responses of microbial activity, abundance, and community in wheat soil after three years of heavy fertilization with manure-based compost and inorganic nitrogen. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 213: 219–227.
109. Zhao, S., Qiu, S., Cao, C., Zheng, C., Zhou, W. & He, P. (2014). Responses of microbial community and crop yields to various rates of nitrogen fertilization in a wheat–maize cropping system in north-central China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 194: 29–37.
110. Caires, E.F., Haliski, A., Bini, A.R. & Scharr, D.A. (2015). Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. *European Journal of Agronomy*, 66: 41–53.
111. Skovby Rasmussen, I., Dresbøll, D. & Thorup-Kristensen, K. (2015). Winter wheat cultivars and nitrogen (N) fertilization—Effects on root growth, N uptake efficiency and N use efficiency. *European Journal of Agronomy*, 68: 38–49.
112. Verma, J.P., Yadav, J., Nath Tiwari, K. & Kumar, A. (2013). Effect of indigenous Mesorhizobium spp. and plant growth promoting rhizobacteria on yields and nutrients uptake of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under sustainable agriculture. *Ecological Engineering*, 51: 282–286.
113. Alami, S. A. & Mostafa, Y. S. (2009). Effect of nitrogen supply and *Azospirillum brasilense* Sp-248 on the response of wheat to seawater irrigation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 16: 101–107.
114. Lenka, S., Singh, A. K. & Lenka, N. K. (2013). Soil water and nitrogen interaction effect on residual soil nitrate and crop nitrogen recovery under maize–wheat cropping system in the semi-arid region of northern India. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 179: 108–115.
115. Sharma, S. D., Kumar, P., Bhardwaj, S. K. & Chandel, A. (2011). Symbiotic effectiveness of arbuscular mycorrhizal technology and Azotobacterization in citrus nursery production under soil disinfection and moisture conservation practices. *Scientia Horticulturae*, 132: 27–36.
116. Babu, S., Prasanna, R., Bidiyarni, N., Nain, L. & Shivay, Y. S. (2015). Synergistic action of PGP agents and *Rhizobium* spp. for improved plant growth, nutrient mobilization and yields in different leguminous crops. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 4: 456–464.
117. Bilal, M., Ayub, M., Tariq, M., Tahir, M. & Nadeem M.A. (2015). Dry matter yield and forage quality traits of oat (*Avena sativa* L.) under integrative use of microbial and synthetic source of nitrogen. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* <http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2015.08.002>.
118. Del Amor F.M., Serrano-Martínez, A., Fortea, M.I., Legua, P. & Núñez-Delgado E. (2008). The effect of plant-associative bacteria (*Azospirillum* and *Pantoea*) on the fruit quality of sweet pepper under limited nitrogen supply. *Scientia Horticulturae*, 117: 191–196.
119. Ruiz-Sánchez, M., Armada, E., Muñoz, Y., García de Salamone, I., Arco, R., Ruiz-Lozano, J. M. & Azcón, R. (2011). *Azospirillum* and arbuscular mycorrhizal colonization enhance rice growth and physiological traits under well watered and drought conditions. *Journal of Plant Physiology*, 168: 1031–1037.
120. Dardanelli, M. S., Fernández de Córdoba, F. J., Espuny, M. R., Rodríguez Carvajal, M. A., Soria Díaz, M., Gil Serrano, A. M., Okon, Y. & Megías, M. (2008). Effect of *Azospirillum brasilense* coinoculated with *Rhizobium* on *Phaseolus vulgaris* flavonoids and Nod factor production under salt stress. *Soil Biology & Biochemistry*, 40: 2713–2721.

121. Piromyou, P., Buranabanyat, B., Tantasawat, P., Tittabutr, P., Boonkerd, N. & Teaumroong, N. (2011). Effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) inoculation on microbial community structure in rhizosphere of forage corn cultivated in Thailand. *European Journal of Soil Biology*, 47: 44-54.
122. Colás Sánchez, A., Torres Gutiérrez, R., Cupull Santana, R., Rodríguez Urrutia, A., Fauvart, M., Michiels, J. & Vanderleyden, J. (2014). Effects of co-inoculation of native Rhizobium and Pseudomonas strains on growth parameters and yield of two contrasting *Phaseolus vulgaris* L. genotypes under Cuban soil conditions. *European Journal of Soil Biology*, 62: 105-112.
123. Dinesh, R., Srinivasan, V., Hamza, S. & Manjusha, A. (2010). Short-term incorporation of organic manures and biofertilizers influences biochemical and microbial characteristics of soils under an annual crop [*Turmeric (Curcuma longa* L.)]. *Bioresource Technology*, 101: 4697-4702.
124. Felici, C., Vettori, L., Giraldi, E., Costantina Forino, L. M., Toffanin, A., Tagliasacchi, A.M. & Nuti, M. (2008). Single and co-inoculation of *Bacillus subtilis* and *Azospirillum brasilense* on *Lycopersicon esculentum*: Effects on plant growth and rhizosphere microbial community. *Applied Soil Ecology*, 40: 260 - 270.
125. Argüello-Navarro, A. Z. & Moreno-Rozo, L. Y. (2014). Evaluación del potencial biofertilizante de bacterias diazotrofas aisladas de suelos con cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Acta Agronómica*, 63 (3): 238-245.
126. Barbieri, P.A., Echeverría, H. E., Sainz Rozas, H. R. & Maringolo, M. (2010). Fertilización de maíz con urea de liberación lenta: pérdida por volatilización y eficiencia de uso de nitrógeno. *Ciencia Del Suelo (Argentina)*, 28(1): 57-66.
127. Bautista-Cruz, A., Cruz Domínguez, G. & Rodríguez-Mendoza, M. N. (2015). Efecto de bocashi y fertilizantes de liberación lenta en algunas propiedades de suelos con maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(1): 217-222.
128. Carrillo Romo, R., Esqueda Coronado, M. H., Báez González, A. D., Reyes López, G., Royo Márquez, M. H. & Ibave González, J. L. (2010). Uso de inoculante y fertilización nitrogenada en la producción de forraje de avena, ballico y trigo. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 1(2): 131 - 143.
129. Chavarría, A. (2013). Eficiencia de tres fuentes fertilizantes sobre la producción de chile dulce (*Capsicum annuum*) c.v. Natali y sus curvas de absorción, en la producción de chile dulce en invernadero. *Revista Ingeniería Agrícola*, 3(1): 29-39.
130. Civeira, G. & Rodríguez, M. B. (2011). Nitrógeno residual y lixiviado del fertilizante en el sistema suelo-planta zeolitas. *Ciencia del Suelo (Argentina)*, 29(2): 285-294.
131. Cristóbal-Acevedo, D., Álvarez-Sánchez, M. E., Hernández-Acosta, E. & Améndola-Massiotti, R. (2011). Concentración de nitrógeno en suelo por efecto de manejo orgánico y convencional. *Terra Latinoamericana*, 29(3): 325-332.
132. Díaz Valdés, T., Partidas Ruvalcaba, L., Suárez Fernández, Y. E., Lizárraga Jiménez, R. & López López, A. (2014). Uso eficiente del agua y producción óptima en maíz, con el uso de cuatro dosis de nitrógeno. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(1): 32-36.
133. Dorado Guerra, D., Grajales, L. C. & Ríos Rojas, L. (2015). Efecto del riego y la fertilización sobre el rendimiento y la calidad de la fruta de lima ácida Tahiti *Citrus latifolia* Tanaka (Rutaceae). *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 16(1): 87-93.
134. Escalante-Estrada, L. E., Escalante-Estrada, Y. I. & Linzaga-Elizalde, C. (2007). La fertilización nitrogenada en el rendimiento del girasol en México. *Agronomía Costarricense*, 31(2): 95-100.
135. Estrada-Botello, M. A., Nikolskii-Gavrilov, I., Mendoza-Palacios, J. D., Cristóbal-Acevedo, D., De La Cruz-Lázaro, E., Brito-Manzano, N. P., Gómez-Vázquez, A. & Bakhlaeva-Egorova, O. (2007). Lixiviación de nitrógeno inorgánico en un suelo agrícola bajo diferentes tipos de drenaje en el trópico húmedo. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo*, 23 (1):1-14.
136. Espinosa Flores, J., Carrillo Avila, E., Palma López, D. J., Peña Cabrales, J. J. & Salgado García, S. (2002). Eficiencia de la fertilización nitrogenada en sorgo con la técnica isotópica 15N, en un Vertisol con drenaje subsuperficial. *Terra Latinoamericana*, 20(2):129-139.
137. Flores Félix, E., Moreno Casillas, H., Figueroa Viramontes, U. & Potisek Talavera, M. C. (2014). Disponibilidad de nitrógeno y desarrollo de avena forrajera (*Avena sativa* L.) con aplicación de biosólidos. *Terra Latinoamericana*, 32(2): 99 - 105.
138. Arévalo-Galarza, G., Hernández-Mendoza, T. M., Salcedo-Pérez, E. & Galvis-Spinola, A. (2007). Aplicación de fertilizantes sintéticos o abonos verdes y su efecto sobre la cantidad de nitrato residual en el suelo. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 13(2): 58-90.
139. García-Centeno, L., Tellez-Obregón, O. & Carl Mason, S. (2007). Efecto del nitrógeno en sorgo, en Nicaragua. *Agronomía Mesoamericana*, 18(2):185-196.
140. García-Olivares, J. G., Mendoza-Herrera, A. & Mayek-Pérez, N. (2012). Efecto de *Azospirillum brasilense* en el rendimiento del maíz en el norte de Tamaulipas, México. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo*, 28 (1):79-84.
141. González Osorio, H. & Sadeghian Khalajabadi, S. (2012). Lixiviación de nitrógeno en suelos de la zona cafetera a partir de diferentes fuentes fertilizantes. *Revista Cenicafé*, 63 (1): 111-119.
142. Lara Mantilla, C., García Tamara, L. P. & Oviedo Zumaqué, L. E. (2011). Efecto biofertilizante del preparado: residuos vegetales-bacteria nativa diazotrofa, sobre las variables biométricas en plántulas de *Rhapanus sativus*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 12(1): 156-162.
143. Millán, G., Agosto, F., Vázquez, M., Botto, L., Lombardi, L. & Juan, L. (2008). Uso de clinoptilolita como un vehículo de fertilizantes nitrogenados en un suelo de la región Pampeana de Argentina. *Ciencia e Investigación Agraria*, 35(3): 293-302.
144. Mora Ravelo, S. G., Gavi Reyes, F., Tijerina Chávez, L. Pérez Moreno, J. & Peña Cabrales, J. J. (2014). Evaluación de la recuperación del nitrógeno y fósforo de diferentes fuentes de fertilizantes por el cultivo de trigo irrigado con aguas residuales y de pozo. *Acta Agronómica*, 63 (1): 25-30.
145. Morales Morales, J., Morales-Rosales, E. J., Díaz-López, E., Cruz-Luna, A. J., Medina-Arias, N. & Guerrero-De la Cruz, M. (2015). Tasa de asimilación neta y rendimiento de girasol en función de urea y urea de liberación lenta. *Agrociencia*, 49: 163-176.
146. Osuna-Ceja, E. S., María-Ramírez, A., Paredes-Melesio, R., Padilla Ramírez, J. S. & Báez-González, A. D. (2012). Eficiencia de la zeolita como aditivo de la urea e inoculación micorrizica en el cultivo de trigo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(6): 1101-1113.
147. Quezada, C., Vidal, I., Lemus, L. & Sánchez, H. (2007). Efecto de la fertilización nitrogenada sobre rendimiento y calidad de fruta en frambueso (*Rubus idaeus* L.) bajo dos programas de fertirrigación. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 7(3): 1-15.
148. Ramírez, O., Cabrera, A. & Corbera, J. (2004). Fertilización nitrogenada de la papa (*Solanum tuberosum* L.) En la provincia de holguín. Dosis óptima de nitrógeno. *Cultivos Tropicales*, 25(2): 75-80.
149. Rodríguez, B. & López, M. (2009). Evaluación de la fertilización biológica del frijol con cepas nativas de *Rhizobium* aisladas de un ultisol de la altiplanicie del estado Guarico. *Agronomía Tropical*, 59(4): 381-386.
150. Tapia Vargas, L. M., Larios Guzmán, A., Contreras, J. A., Vidales Fernández, I. & Barradas, V. L. (2012). Lixiviación de nitratos y condición nutrimental en dos sistemas de manejo de riego y nutrimental de aguacate (*Persea americana* MILL.). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(3): 251-258.