



ESCUELA DE DOCTORADO
INTERNACIONAL DE LA USC

José Valdemar
Andrade Cadena

Tesis doctoral

EFECTO DE LA FECHA DE SIEMBRA
Y FORMA DE CULTIVO SOBRE LA
PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE
DISTINTAS VARIETADES DE MAÍZ
GRANO EN EL NEOTRÓPICO
ECUATORIANO: MODELACIÓN
PRODUCTIVA Y SECUESTRO DE
CARBONO

Lugo, 2022



TESIS DE DOCTORADO

**EFECTO DE LA FECHA DE SIEMBRA Y
FORMA DE CULTIVO SOBRE LA
PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE DISTINTAS
VARIEDADES DE MAÍZ GRANO EN EL
NEOTRÓPICO ECUATORIANO:
MODELACIÓN PRODUCTIVA Y SECUESTRO
DE CARBONO**

José Valdemar Andrade Cadena

ESCUELA DE DOCTORADO INTERNACIONAL DE LA UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INVESTIGACIÓN AGRARIA Y FORESTAL

SANTIAGO DE COMPOSTELA / LUGO



2022

D./Dña. **José Valdemar Andrade Cadena**

Efecto de la fecha de siembra y forma de cultivo sobre la producción y calidad
Título de la tesis: de distintas variedades de maíz grano en el neotrópico ecuatoriano: modelación productiva y secuestro de carbono

Presento mi tesis, siguiendo el procedimiento adecuado al Reglamento y declaro que:

- 1) La tesis abarca los resultados de la elaboración de mi trabajo.
- 2) De ser el caso, en la tesis se hace referencia a las colaboraciones que tuvo este trabajo.
- 3) Confirmando que la tesis no incurre en ningún tipo de plagio de otros autores ni de trabajos presentados por mí para la obtención de otros títulos.
- 4) La tesis es la versión definitiva presentada para su defensa y coincide la versión impresa con la presentada en formato electrónico.

Y me comprometo a presentar el Compromiso Documental de Supervisión en el caso que el original no esté depositado en la Escuela.

En **Ibarra, 28 de enero de 2022.**

Firma electrónica

D./Dña. **María Rosa Mosquera Losada, Nuria Ferreiro Domínguez, Benigno Ruiz Nogueiras**

En condición de: **Director/a**

Efecto de la fecha de siembra y forma de cultivo sobre la producción y calidad

Título de la tesis: de distintas variedades de maíz grano en el neotrópico ecuatoriano: modelación productiva y secuestro de carbono

INFORMA:

Que la presente tesis, se corresponde con el trabajo realizado por D/Dña **José Valdemar Andrade Cadena**, bajo mi dirección/tutorización, y autorizo su presentación, considerando que reúne los requisitos exigidos en el Reglamento de Estudios de Doctorado de la USC, y que como director/tutor de esta no incurre en las causas de abstención establecidas en la Ley 40/2015.

En Lugo, **7 de febrero de 2022**

Firma electrónica

AGRADECIMIENTOS

Durante los años de estudio e investigación han sido muchas las personas que han participado en este trabajo y a quienes quiero expresar mi gratitud por el apoyo que me han prestado de forma desinteresada. En primer lugar, quiero agradecer a mis directores Rosa Mosquera Losada, Nuria Ferreiro Domínguez y Benigno Ruiz Nogeiras todo el tiempo y el esfuerzo que me han dedicado sin los cuales no hubiese sido posible realizar esta tesis.

A las autoridades de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Ibarra principalmente a María José Rubio, Fannery Suárez Berrio por haber confiado en mi y haberme motivado a iniciar los estudios de doctorado, a Jesús Muñoz Diez, que me han permitido la culminación de los mismos. A los compañeros de la granja experimental ECAA, Raul, Ricardo, Elias, Eduardo, que sin su apoyo y colaboración a la hora del desarrollo de los experimentos no se habría podido levantar esta importante información.

Agradezco a Divina toda la colaboración que me ha prestado, con los trámites administrativos para ayudarme con el desplazamiento a fin de realizar la estancia en el Campus Terra en Lugo.

Agradezco a Diego León por sus consejos, revisiones y aportes en la redacción de este trabajo de investigación.

A mi familia por su apoyo en todo momento, en especial en aquellos que me daba por derrotado, y siempre me supieron animar para la culminación de los estudios de doctorado.

A ti por ser pilar y soporte en todo momento.

Gracias a todos los que de algún modo habéis hecho posible este trabajo.

Valdemar Andrade Cadena



INDICE

1.	INTRODUCCIÓN	11
1.1.	Importancia del maíz en el mundo	11
1.2.	Importancia del maíz en Latinoamérica	13
1.3.	Importancia del maíz en Ecuador	15
1.4.	Descripción y ecofisiología del maíz	22
1.5.	Condiciones edafoclimáticas	24
1.6.	Desarrollo fenológico e interacción climática	25
1.7.	Variedades de maíz local	26
1.8.	Asociación de maíz con leguminosa	26
1.9.	Modelos de simulación	27
1.9.1.	Los modelos de simulación como herramientas de apoyo al productor	28
1.9.2.	Uso de modelos de simulación en sistemas agrícolas	29
1.9.3.	Modelos de rendimiento en maíz	30
2.	OBJETIVOS	32
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	33
3.1.	Caracterización de la zona de estudio	33
3.1.1.	Localización del ensayo	33
3.1.2.	Geología	34
3.1.3.	Suelos	34
3.1.4.	Uso de suelo	36
3.1.5.	Hidrografía	37
3.1.6.	Clima	37
3.2.	Diseño Experimental	42
3.3.	Manejo específico del experimento	43
3.3.1.	Preparación del terreno	43
3.3.2.	Siembra	43
3.3.3.	Fertilización	45
3.3.4.	Riego	45
3.3.5.	Escarda	47
3.3.6.	Control fitosanitario	47
3.4.	Determinaciones en campo	47
3.4.1.	Muestreo en suelo	47
3.4.2.	Muestreo de vegetación	48
3.5.	Determinaciones en laboratorio	49
3.5.1.	Análisis de suelo	49
3.5.2.	Materia Orgánica	49
3.5.3.	Nitrógeno total	49
3.5.4.	Fósforo asimilable	50
3.5.5.	Capacidad de intercambio catiónico	50
3.5.6.	Análisis de Planta	50
3.5.7.	Rendimiento	50
3.5.8.	Peso de 1000 granos	51
3.5.9.	Proteína	51
3.6.	Procesado y Análisis de datos	51
3.6.1.	ANOVA	51
3.6.2.	Modelización	53
4.	RESULTADOS y DISCUSIÓN	54
4.1.	Suelo	54
4.1.1.	pH	54
4.1.2.	Carbono	57

4.1.3.	Nitrógeno	59
4.1.4.	Fosforo Olsen	62
4.1.5.	Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	64
4.1.6.	Potasio	66
4.1.7.	Calcio	68
4.1.8.	Magnesio	70
4.1.9.	Sodio	72
4.2.	Biomasa	74
4.2.1.	Producción	74
4.2.1.1.	Producción de planta de maíz	74
4.2.1.2.	Producción combinada de grano de maíz y frijol	76
4.2.1.3.	Peso de 1000 semillas de maíz	77
4.2.2.	Calidad nutritiva del maíz	78
4.2.2.1.	Proteína	78
4.3.	Modelización	80
5.	CONCLUSIONES	83
6.	BIBLIOGRAFÍA	84
7.	ANEXO I	107

Índice de tablas

<i>Tabla 1 Producción de maíz, en el Ecuador, para consumo en mazorca tierna. Fuente: (INEC, 2017)</i>	17
<i>Tabla 2 Producción de maíz, en el Ecuador, pra consumo en grano seco. Fuente: INEC 2017</i>	18
<i>Tabla 3 Tipos de modelo por su función y grado de extracción del fenómeno Fuente: De Souza y González (2001) citado por Candelaria y col (2011)</i>	29
<i>Tabla 4 Cobertura de suelo en la provincia de Imbabura</i>	37
<i>Tabla 5 Descripción de los tratamientos</i>	42
<i>Tabla 6 Características de las Unidades Experimentales (Parcelas)</i>	43
<i>Tabla 7 Épocas de siembra y cosecha de maíz</i>	43
<i>Tabla 8 Necesidad del cultivo por Mg de grano cosechado</i>	45
<i>Tabla 9 Necesidades de fertilizantes a las parcelas experimentales.</i>	45
<i>Tabla 10 Programación del riego de acuerdo al método Blaney-Cridle o de temperaturas</i>	46
<i>Tabla 11 Principales plagas y enfermedades que afectan al cultivo de maíz en el Ecuador (Rogg 2000)</i>	47
<i>Tabla 12 Diagrama del proceso de muestreo de suelos considerando la siembra y la cosecha en 4 épocas de producción de maíz año 2015 y 2016.</i>	48
<i>Tabla 13 Fechas de muestreo del suelo antes de la siembra y a los 90 días de la incorporación de los residuos de la cosecha</i>	48
<i>Tabla 14 Esquema del ANOVA Analíticas del Suelo</i>	52
<i>Tabla 15 Esquema del ANOVA Crecimiento</i>	52
<i>Tabla 16 Esquema del ANOVA Producción de Biomasa</i>	52
<i>Tabla 17 Esquema del ANOVA Producción de grano</i>	53
<i>Tabla 18 Bioparámetros utilizados en la calibración del modelo Yield-SAFE para la producción de biomasa de maíz grano.</i>	80

Índice de Figuras

<i>Figura 1 Evolución de los principales productores de maíz en el mundo (FIRA, 2016).</i>	12
<i>Figura 2 Tendencia de la producción mundial de Maíz (Santana y col., 2018).</i>	13
<i>Figura 3 Posible ruta de dispersión del maíz hacia Suramérica Colombia-Ecuador (Zizumbo y Colunga, 2017). Sitios arqueológicos de Centroamérica-Panamá (1. Arenal, 2. Turrialba, 3. Talamanca, 4. Cañazas, 5. Nieto, 6. La Mula, 7. Aguadulce, 8. Vapiros, 9. Corona A)</i>	15
<i>Figura 4 Superficie sembrada de maíz suave para consumo (mazorca tierna y grano seco) a nivel de Ecuador (INEC.2017).</i>	19
<i>Figura 5 Superficie sembrada en monocultivo y asociación de maíz suave para consumo (mazorca tierna y grano seco) en la provincia de Imbabura (INEC, 2017).</i>	20
<i>Figura 6 Rendimiento del maíz suave para consumo (mazorca tierna y grano seco) a nivel nacional en el Ecuador (INEC, 2017),</i>	21
<i>Figura 7 Esquema del proceso de modelación con el modelo Yield-SAFE (Graves y col 2010).</i>	31
<i>Figura 8 Ubicación de la zona de Estudio de la provincia de Imbabura en Ecuador</i>	33
<i>Figura 9 Mapa Litológico de la provincia de Imbabura en Ecuador</i>	34
<i>Figura 10 Mapa Taxonomía de suelos de la provincia de Imbabura en Ecuador</i>	35
<i>Figura 11 Mapa General de uso y cobertura de suelo de la provincia de Imbabura en Ecuador.</i>	36
<i>Figura 12 Mapa de subcuencas hidrográficas de la provincia de Imbabura en Ecuador</i>	37
<i>Figura 13 Mapa de isotermas de la provincia de Imbabura en Ecuador</i>	38
<i>Figura 14 Mapa de isoyetas de la provincia de Imbabura en Ecuador</i>	39
<i>Figura 15 Mapa de intensidad de lluvia de la provincia de Imbabura en Ecuador</i>	39
<i>Figura 16 Mapa de déficit hídrico de la provincia de Imbabura en Ecuador</i>	40
<i>Figura 17 Mapa de meses secos de la provincia de Imbabura en Ecuador</i>	41
<i>Figura 18 Diagrama ombrotérmico de la ciudad de Ibarra del periodo comprendido entre 2009-2017</i>	42
<i>Figura 19 Diagrama de distribución de tratamientos, épocas de siembra y plantas en parcela. Época 1 y 5: enero 2015 y 2016; 2 y 6: abril 2015 y 2016; 3 y 7: julio 2015 y 2016; 4 y 8: octubre 2015 y 2016</i>	44
<i>Figura 20 pH en suelo por tratamientos. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos por año. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestro antes de siembra; DC: muestreo 90 días después de la cosecha.</i>	55
<i>Figura 21 pH en suelo. Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestreo antes siembra; DC: muestreo 90 días tras cosecha. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa.</i>	56
<i>Figura 22 Carbono en suelo por tratamientos. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos por año. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestro antes de siembra; DC: muestreo 90 días después de la cosecha.</i>	58
<i>Figura 23 Carbono en suelo. Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestreo antes siembra; DC: muestreo 90 días tras cosecha. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa</i>	59
<i>Figura 24 Nitrógeno en suelo por tratamientos. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos por año. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestro antes de siembra; DC: muestreo 90 días después de la cosecha.</i>	60
<i>Figura 25 Nitrógeno en suelo. Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestreo antes siembra; DC: muestreo 90 días tras cosecha. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa</i>	61
<i>Figura 26 Fósforo Olsen en suelo por tratamientos. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos por año. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestro antes de siembra; DC: muestreo 90 días después de la cosecha.</i>	63
<i>Figura 27 Fósforo Olsen en suelo. Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestreo antes siembra; DC: muestreo 90 días tras cosecha. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa</i>	64
<i>Figura 28 CIC en suelo por tratamientos. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos por año. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestro antes de siembra; DC: muestreo 90 días después de la cosecha.</i>	65
<i>Figura 29 CIC en suelo. Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestreo antes siembra; DC: muestreo 90 días tras cosecha. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa</i>	66

<i>Figura 30 Potasio de cambio en suelo por tratamientos. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos por año. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestro antes de siembra; DC: muestreo 90 días después de la cosecha.</i>	67
<i>Figura 31 Potasio de cambio en suelo. Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestreo antes siembra; DC: muestreo 90 días tras cosecha. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa</i>	68
<i>Figura 32 Calcio de cambio en suelo por tratamientos. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos por año. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestro antes de siembra; DC: muestreo 90 días después de la cosecha.</i>	69
<i>Figura 33 Calcio de cambio en suelo. Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestreo antes siembra; DC: muestreo 90 días tras cosecha. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa</i>	70
<i>Figura 34 Magnesio de cambio en suelo por tratamientos. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos por año. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestro antes de siembra; DC: muestreo 90 días después de la cosecha.</i>	71
<i>Figura 35 Magnesio de cambio en suelo. Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestreo antes siembra; DC: muestreo 90 días tras cosecha. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa</i>	72
<i>Figura 36 Sodio de cambio en suelo por tratamientos. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos por año. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestro antes de siembra; DC: muestreo 90 días después de la cosecha.</i>	73
<i>Figura 37 Sodio de cambio en suelo. Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestreo antes siembra; DC: muestreo 90 días tras cosecha. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa</i>	74
<i>Figura 38 Producción de maíz planta (superior) y maíz grano (inferior) en cada cosecha (enero, abril julio y octubre de 2015 y 2016). Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa</i>	76
<i>Figura 39 Producción de grano en cada cosecha (enero, abril julio y octubre de 2015 y 2016).</i>	77
<i>Figura 40 Peso mil semillas de maíz (enero, abril julio y octubre de 2015 y 2016). Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa</i>	78
<i>Figura 41 Contenido en proteína de maíz en cada cosecha (enero, abril julio y octubre de 2015 y 2016).</i>	79
<i>Figura 42 Resultados de la calibración del modelo Yield-SAFE para la producción de biomasa del maíz grano de la variedad Chauncho en tres cosechas del año 2015</i>	81
<i>Figura 43 Resultados de la validación del modelo Yield-SAFE para la biomasa del maíz grano de la variedad Huandango en tres cosechas del año 2015</i>	82

Resumen

Los procesos agrícolas derivados de la revolución verde, tienen como objetivo incrementar la productividad y rentabilidad dejando de lado los métodos tradicionales y sostenibles de producción de alimentos; así como también al abandono de variedades nativas con cualidades organolépticas diferenciadas. Latinoamérica es una de las eco-regiones del mundo, en la que aún conserva germoplasma indígena de maíces (*Zea mays* L) y frijoles (*Phaseolus vulgaris* L.), así como prácticas y saberes de manejo de policultivo, en los cuáles cada uno cumple una función específica generando resiliencia ante posibles alteraciones externas. El policultivo es un sistema tradicional de asociación de varias especies que permite obtener a tiempo y con el mismo esfuerzo más de un alimento. Esta práctica ha caído en desuso con el paso de los años, resultando el monocultivo una forma extendida de producción, que no ha evolucionado acorde a las necesidades de las personas y no siempre está adaptada a las condiciones agroecológicas locales, haciendo necesaria una elevada cantidad de insumos, maquinaria y agua que contribuyen al aumento de los problemas ambientales. En este contexto, la presente tesis doctoral, caracteriza las condiciones físico químicas del suelo y el rendimiento de los cultivos en 8 fechas de siembra de maíces nativos (*Chaucho* y *Huandango*) con y sin asociación a una leguminosa (frijol *canario voluble*) en los años 2015 y 2016 que incorporan el barbecho como práctica. Con los resultados obtenidos se utilizó el modelo Yield-SAFE, que permite estimar la producción de biomasa y grano en las condiciones edafoclimáticas del Ecuador. Los resultados indican que el contenido de carbono en el suelo luego del barbecho en años consecutivos tiene un ligero incremento, al igual que sucede con el contenido de nitrógeno en el suelo que se incrementa cuando se realiza la siembra asociada de gramínea con leguminosa. En el caso del fósforo Olsen, los valores determinados están en el orden de medio a altos, debido a la dinámica de este nutriente y por el pH neutro del suelo que facilita la disponibilidad de este elemento. La mayor parte de los cationes de cambio se ven beneficiados tras la incorporación del rastrojo en el suelo, que repercute en una mejora de la capacidad de intercambio catiónica en los años venideros. En relación a la producción de maíz tiene un rendimiento comparable con los promedios nacionales para variedades criollas o nativas; con un incremento en el segundo año con respecto al primero debido a la mejora del nivel de fertilidad asociados a un mayor contenido de materia orgánica en el suelo. Los resultados obtenidos muestran una menor producción de maíz cuando se siembra con leguminosa probablemente debido a que la leguminosa no aporta la cantidad suficiente de nitrógeno, que se aporta en mayor medida cuando el maíz se siembra sin leguminosa. En todo caso, la producción de grano de maíz y frijol es significativamente superior cuando se computa de forma conjunta el grano del maíz y el frijol en las parcelas en las que se sembró maíz y frijol que cuando se evalúa la producción de maíz grano en las parcelas en las que se sembraba maíz de forma exclusiva. Finalmente, la calibración del modelo Yield-SAFE para las dos variedades de maíz *Chaucho* y *Huandango*, se ajusta muy bien a la producción de maíz en la mayoría de las cosechas, principalmente debido a la similitud de las variedades.



Palabras claves: Cultivo asociado, maíz legumbre, modelo de producción.

1.INTRODUCCIÓN

La seguridad alimentaria se ha convertido en un término cada vez más importante pero controvertido desde el aumento global de los precios de los alimentos en 2008, ya que una gama de factores causales ha elevado las apuestas en la formulación de soluciones para alimentar a un mundo de 9 mil millones de personas para 2050. El propósito de la seguridad alimentaria es el acceso físico y económico a alimentos suficientes, seguros y nutritivos, para satisfacer las necesidades dietéticas y preferencias alimenticias de los humanos en el marco de una vida activa y saludable (Sage, 2017).

La seguridad alimentaria es particularmente grave en el África subsahariana rural, donde reside un tercio de las personas desnutridas del mundo.

En los países latinoamericanos los problemas de seguridad alimentaria son algo menores, y, al igual que en el resto del mundo, se hace necesario optimizar el uso racional de los recursos naturales para garantizarla. El liderazgo de los nuevos actores en el comercio mundial con el incremento en la demanda de los países asiáticos y particularmente de China; y el aumento en los precios de los productos básicos podría considerarse como parte de las estrategias en la optimización del uso de los recursos a escala local y nacional para garantizar la seguridad alimentaria (Gorenstein y Ortiz, 2018).

El aumento de las exportaciones de bienes primarios vinculados a la agricultura, se asoció en gran parte con el aumento en la demanda de China, seguido por India y otros países como Indonesia. En este contexto, América Latina se convirtió en un importante proveedor de soja, que sirve como fuente principal de proteína para la producción de carne además de otros 'cultivos flexibles' o 'cultivos silvestres' como el maíz, caña de azúcar y la palma, que también tiene una triple función como provisión de combustible, alimento y forraje (Gorenstein y Ortiz, 2018).

América Latina cada vez más se constituye como fuente de alimento para el mundo ya que en ella se cultivan 14 grupos de alimentos de importancia para la FAO: cereales (excluida la cerveza), azúcar, jarabes, legumbres, frutos secos, oleaginosas, vegetales productores de aceites, verduras, frutas (excluido el vino), raíces, tubérculos, estimulantes y especias entre otras (Falconí y col., 2017).

Es esperable que la huella global de la agricultura crezca en las próximas décadas, con una creciente población humana y cambios de dietas, lo que obliga a la adopción de técnicas asociadas a la economía, economía circular y a potenciar actividades como la del kilómetro cero. Teniendo en cuenta los efectos negativos vinculados a una agricultura intensiva, por lo que urge desarrollar estrategias para equilibrar la producción agrícola, con la conservación de la biodiversidad y la protección del medio ambiente (Schulte y col., 2017).

1.1. IMPORTANCIA DEL MAÍZ EN EL MUNDO

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos agrícolas que más se emplea en el mundo. Gracias a sus cualidades alimenticias de nutrición humana, animal y uso industrial (producción de etanol), superando su relevancia económica y social a otros cultivos. De ahí la importancia de fomentar el incremento de la productividad, y por ende generar más empleo a escala mundial (Pirasteh-Anosheh, y col., 2013). Por esta razón, es necesario que todos los esfuerzos orientados a aumentar la producción de maíz se incluya estrategias vinculadas a la mejora de políticas,

tecnología y acciones multi-actor dirigidas tanto a productores como a consumidores (Santana y col., 2018).

La demanda de maíz a nivel mundial en los últimos años se incrementó de forma acelerada. En el año 1995 esta demanda alcanzó los 558 millones de Mega gramos, cifra que casi se duplica a 1007 millones de Mega gramos en el año 2014; debido a que este tipo de alimento es la base de alimentación de la población a nivel mundial. Es más, se espera un incremento anual de 3,2% en el consumo mundial y con ello la tendencia de un incremento significativo en las exportaciones (FIRA, 2016)

En el periodo 2016/17, el 66% de la producción mundial se concentró en tres países: Estados Unidos (37%), China (21%), Brasil (8%) y con una menor participación la Unión Europea y Argentina (FIRA, 2016) tal y como se aprecia en la Figura 1

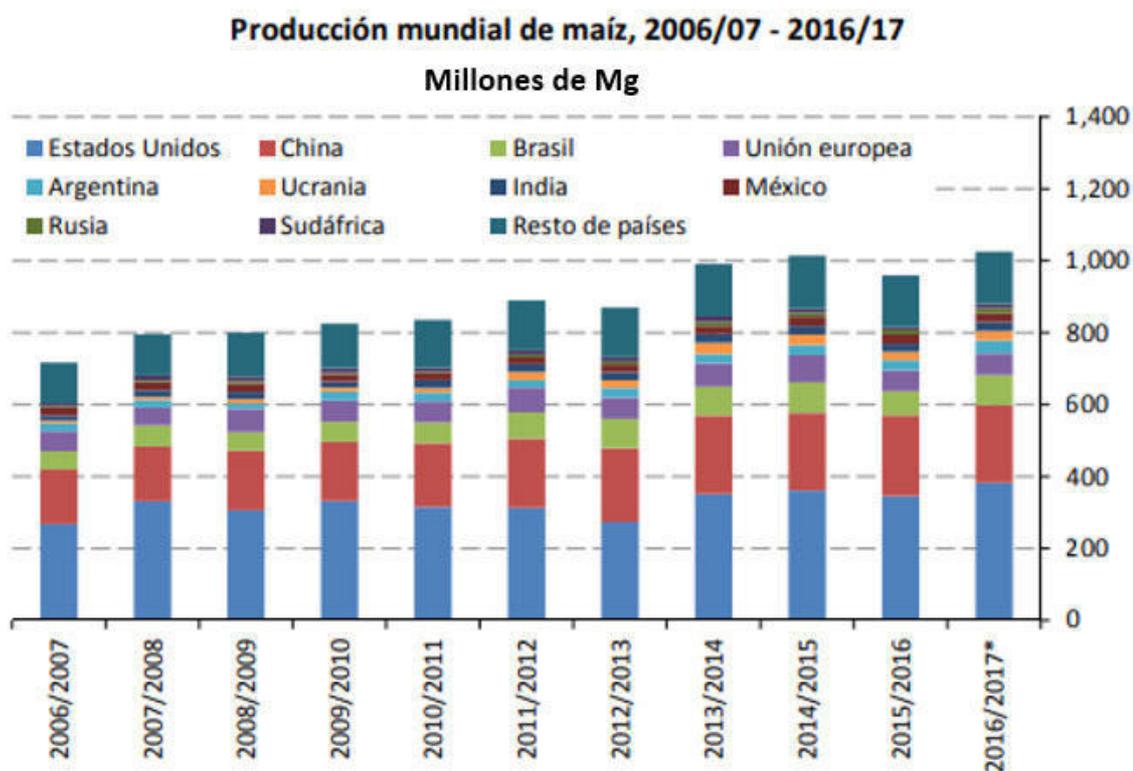


Figura 1 Evolución de los principales productores de maíz en el mundo (FIRA, 2016).

Estados Unidos, principal productor mundial de maíz con 382,4 millones de Mega gramos sigue mostrando un incremento que fue de 10,7% en relación al período 2015/16. En cambio, China segundo país productor a nivel mundial, disminuyó su producción en un 3,8% en relación al período anterior. Esta reducción se debe, fundamentalmente, al cambio en su política agrícola. (Santana y col., 2018). En todo caso, la tendencia internacional es al crecimiento de este cultivo tal y como se aprecia en la Figura 2.

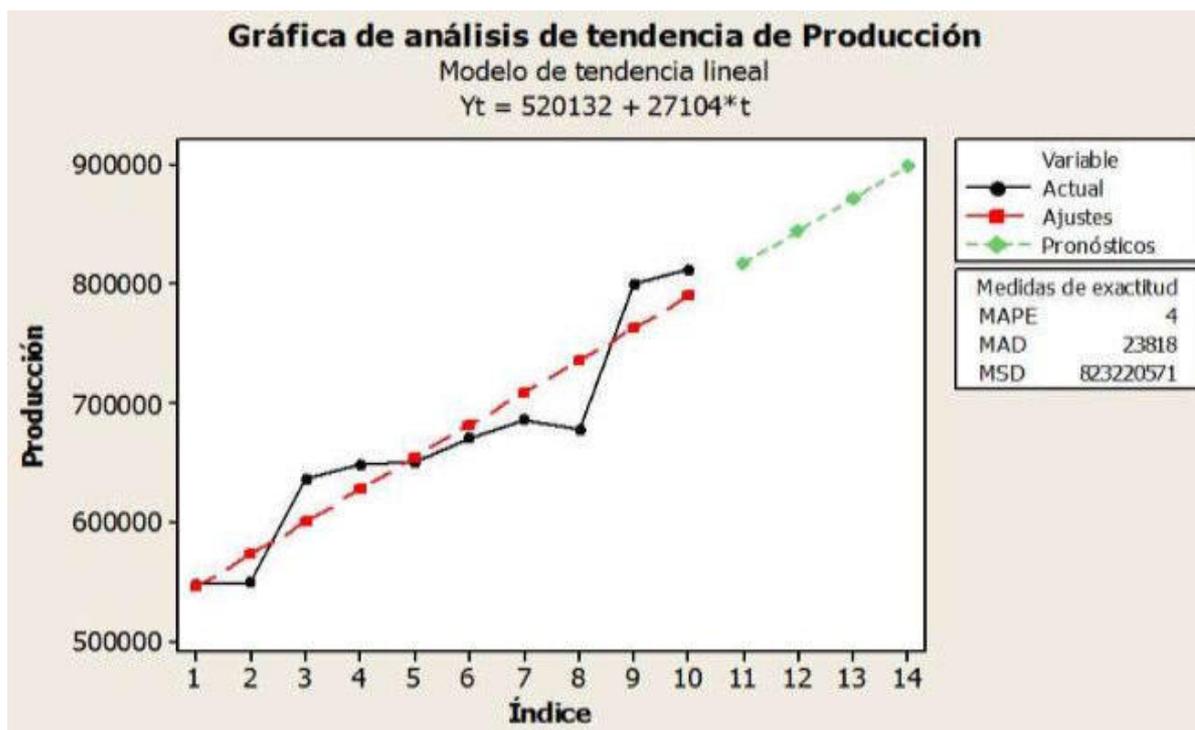


Figura 2 Tendencia de la producción mundial de Maíz (Santana y col., 2018).

1.2. IMPORTANCIA DEL MAÍZ EN LATINOAMÉRICA

Mesoamérica es considerado uno de los sitios de domesticación de plantas de mayor relevancia, sobre todo por el maíz, alrededor del cual crecieron diferentes sociedades que han ocupado esta zona a lo largo de la historia. El acervo cultural de los primeros agricultores de esta región proviene de aquellos grupos de cazadores-recolectores que pisaron esta parte del planeta aproximadamente hace 35 mil años (Carrillo, 2009)

Para los pueblos indígenas, el maíz representa un alimento imprescindible por la estrecha relación que guarda con su cultura e identidad, ya que involucra aspectos que van desde la historia, la organización social, al sistema ceremonial y la cosmovisión. La importancia de este cereal pronto fue advertida por los cronistas españoles de la época colonial, quienes destacaron abundantes testimonios sobre la relación con ceremonias y ofrendas que los pueblos originarios realizaban en torno al maíz, entre otros usos (Mayorga, 2016). El maíz es aún es un elemento primordial de identidad, cada generación ha cultivado el saber ancestral de la siembra de este producto y con el pasar del tiempo, aparecen diferentes tipos de productos alimenticios surgidos por la transformación de dicho grano como parte de la cultura andina. El maíz es además un cultivo de subsistencia para los pequeños agricultores, caracterizados por un bajo ingreso económico donde se constituye además la base de la dieta de la población rural andina (INIAP, 2011).

La identificación del maíz como elemento simbólico de los pueblos indígenas, sirve como unidad analítica de las realidades campesinas. Las variedades Chaucho, Complejo Chillo-Huandango, Complejo Mishca-Huandango, Cónico Dentado, Montaña Ecuatoriana y Sabanero Ecuatoriano son particularmente vulnerables, no solo por su baja presencia, sino también por el color del grano (similares a la mayoría de las variedades comunes) y carece de nombres y usos específicos (Tapia, 2015).

El maíz es un alimento básico de los pueblos de América, fue una de las plantas domesticadas en Mesoamérica, precedido por: aguacates, camotes, calabazas, frijoles, entre otros. Este proceso se realizó durante muchos milenios y se logró transformar las pequeñas mazorcas de pocos granos en las que conocemos actualmente, aspectos bien documentados en las excavaciones arqueológicas (Vargas, 2014).

En los últimos 100 años, arqueólogos y antropólogos han descubierto un tesoro oculto vinculado a las prácticas de subsistencia y cómo los humanos producen alimentos. Estos descubrimientos van desde desenterrar los orígenes del trigo y el ganado en el Medio Oriente hace 11.000 años hasta desentrañar el complejo sistema de cultivo de Milpa utilizado por los mayas modernos en América Central (Hart, 2016).

El núcleo del sistema alimentario pre-cerámico en el occidente de Mesoamérica se logró integrar con las poblaciones silvestres ancestrales del maíz, el frijol y la calabaza. La gestión agrícola incipiente de estas especies, año tras año, en un mismo sitio pudo derivar en la estructuración del sistema agroalimentario conocido como “milpa” (Zizumbo y Colunga, 2017).

El Teosintle (*Zea mays* ssp. *Parviglumis*), ancestro del maíz, tiene granos con glumas protectoras que impiden su molienda. Estudios paleoetnobotánicos basados en macrorrestos (mazorcas y semillas) y en microrrestos encontrados en herramientas de piedra (fitolitos, granos de almidón y polen) y utilizando dataciones de carbono 14, han sugerido que la domesticación del maíz pudo realizarse hace cerca de 9.000 años (Zizumbo y Colunga, 2017).

Los registros arqueológicos para el Pleistoceno final y el Holoceno temprano indican varias tradiciones culturales líticas con similares niveles tecnológicos de cultivo de maíz y de organización social, que coinciden parcialmente en el tiempo y en ambientes ecológicos (figura 3), tanto en Mesoamérica (México, Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua y Costa Rica), como en el sur de Panamá, el noreste de Suramérica, la cuenca del río Cauca en Colombia, la costa sur de Ecuador y la costa norte del Perú (Zizumbo y Colunga, 2017).

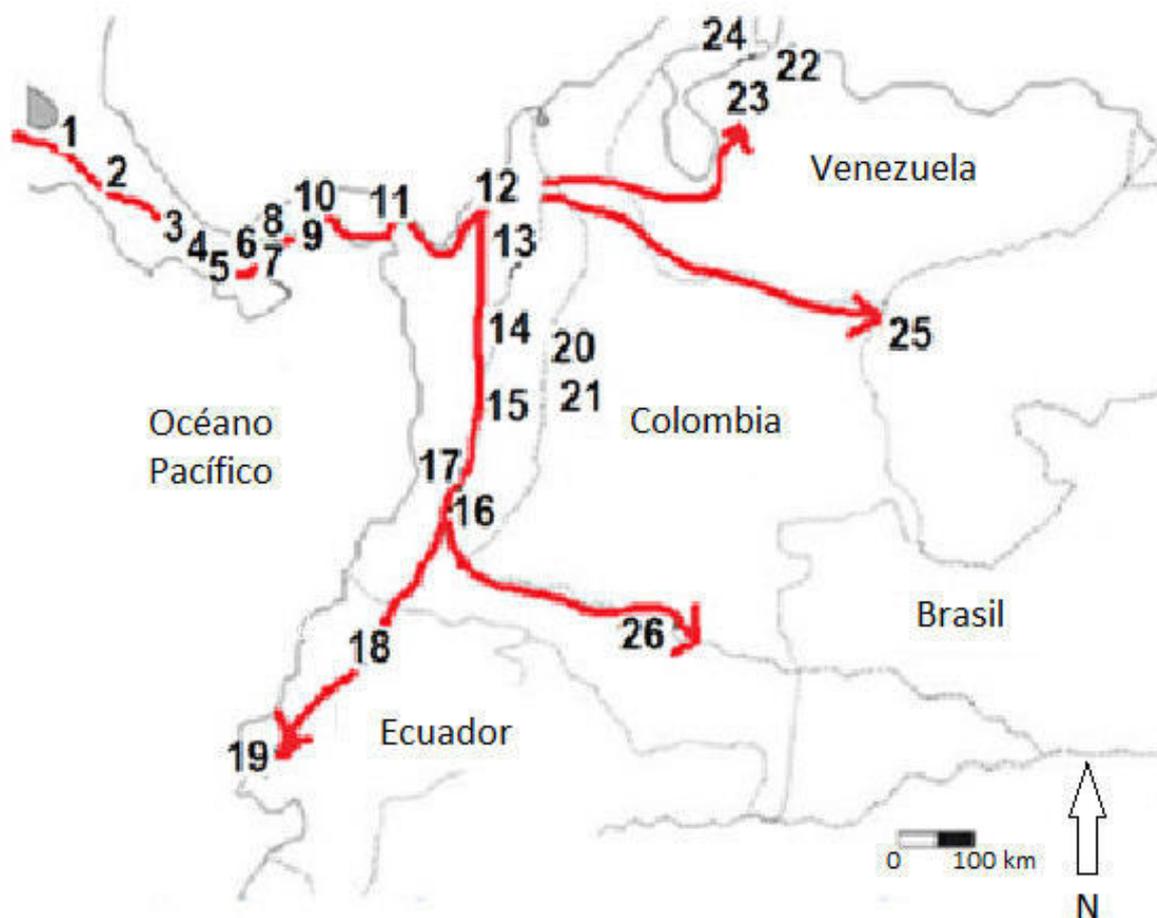


Figura 3 Posible ruta de dispersión del maíz hacia Suramérica Colombia-Ecuador (Zizumbo y Colunga, 2017). Sitios arqueológicos de Centroamérica-Panamá (1. Arenal, 2. Turrialba, 3. Talamanca, 4. Cañazas, 5. Nieto, 6. La Mula, 7. Aguadulce, 8. Vapiros, 9. Corona A)

Es importante destacar la relación que la siembra del maíz guarda con la cultura. En primer lugar, por su relación con la organización social, expresada en la distribución del trabajo entre hombres y mujeres, en el cultivo o en las estrategias de trabajo colectivo que genera cohesión social y en segundo lugar por la diversidad de ceremonias vinculadas a la producción y consumo, desde la bendición de la semilla, la solicitud de permiso a la tierra para la siembra, la petición de la lluvia para su crecimiento y hasta el agradecimiento por los frutos cosechados (Mayorga, 2016).

El maíz es el grano identitario y multifacético de la región cultural mesoamericana, que además de ser la base de la alimentación, es un recurso estratégico de orden político, económico y espiritual. El éxito de la producción de maíz depende de la correcta aplicación de los insumos de producción que permiten sostenibilidad con el medio ambiente y la producción agrícola (du Plessis, 2003).

1.3. IMPORTANCIA DEL MAÍZ EN ECUADOR

La agricultura es uno de los ejes principales sobre los que se desenvuelve la economía de Ecuador, siendo una actividad fundamental en el ámbito económico, en la seguridad alimentaria y es necesario conocer su evolución, su comportamiento y la sostenibilidad en el tiempo (Sumba, 2014).

La agricultura en Ecuador refleja la heterogeneidad de un país megadiverso que se subdivide en cuatro zonas geográficas: la zona costera, las tierras altas andinas, la Amazonía y las Islas Galápagos; albergando 14 nacionalidades y 18 grupos étnicos, cada uno con una relación propia con el ecosistema, habiéndose enfrentado a la expansión de agronegocios y otras amenazas a su capacidad productiva (Intriago y col., 2017).

En Ecuador, el maíz es un producto de alimentación de los pueblos andinos, es por esto que a lo largo del tiempo se han conservado ecotipos con aplicaciones especiales en la dieta básica y en garantía de la soberanía alimentaria (INIAP, 2003). Las variaciones climáticas, han hecho que las pérdidas de producción, así como las prácticas agronómicas de asociación cereal-leguminosa se vayan perdiendo, ocasionando más de una erosión genética (Tapia, 2015).

Los sistemas de producción agropecuaria exigen cuantiosos recursos e insumos, causando problemas al ecosistema, tales como: la deforestación masiva, la escasez de agua, el agotamiento de los suelos y elevados niveles de emisiones de gases de efecto invernadero, entre otros, precisando establecer métodos innovadores que protejan y potencien la base de los recursos naturales, rescatando cultivos y variedades, mientras aumentan la productividad garantizándose, por lo tanto la sostenibilidad de los agroecosistemas (FAO, 2017). En el marco de esta sostenibilidad, posee una gran importancia el uso de leguminosas, que se añaden a la producción del maíz, mejorando la salud del suelo y por ende la disminución de la necesidad de aporte de abonos nitrogenados, cuya síntesis se asocia a un elevado coste ambiental (emisión de gases de efecto invernadero).

El futuro de recursos como la biodiversidad depende de la forma de cultivo. Por otra parte, la forma de cultivo debe considerar la producción de servicios ecosistémicos que ocurre a escala local y regional, vinculados a diferentes sistemas ecológicos donde las personas tienen su sustento a través de cultivos, pastoreo, silvicultura y otras actividades rurales (Mendenhall y col., 2016).

La agricultura es el componente con mayor peso en el PIB del Ecuador (17,5%) representando la cadena de valor del Maíz con el 3% del PIB agrícola. El maíz es el único cultivo de cobertura nacional que ocupa una superficie aproximada de 500 mil hectáreas, de éstas, la mitad es maíz amarillo duro cristalino, base de la cadena de valor alimentaria de consumo de animales, y que en su gran mayoría se siembra en el litoral ecuatoriano; mientras que el otro 50% es maíz de altura (Quiroz y Merchán, 2016).

El litoral ecuatoriano es la región con mayor producción de maíz, este producto contribuye a la alimentación de la población y es la principal materia prima en la elaboración de alimentos para el consumo animal. De acuerdo a datos oficiales, la superficie sembrada de maíz para el 2014, se estimó en 276.385 hectáreas, en el ciclo del período lluvioso (julio a diciembre), y en el ciclo seco (enero a junio una superficie de 45.969 ha, donde se aprovecha la humedad remanente en el suelo (Zambrano y col., 2017).

En la Región Andina el maíz es el cultivo más importante en superficie y es base de la alimentación para la población rural. En esta región todavía se cultivan numerosas variedades tradicionales que se agrupan en veinticuatro tipos. Mantener esta diversidad es de gran importancia no solo para la seguridad alimentaria, sino también como fuente de genes para tolerancia a factores abióticos y biótico que podrían ser incorporados a las variedades mejoradas (Tapia, 2015).

En las tablas 1 y 2, se muestran estadísticas de producción de maíz suave (variedades locales), en el Ecuador y en la provincia de Imbabura, tanto para el consumo en fresco como mazorca tierna (elote) y como grano seco para uso en la alimentación humana, también se indica las estadísticas de monocultivo y en asociación a una leguminosa.

Tabla 1 Producción de maíz, en el Ecuador, para consumo en mazorca tierna. Fuente: (INEC, 2017)

	Datos Nacionales de producción de maíz para mazorca tierna (choclo o elote)							Datos de producción de maíz para la provincia de Imbabura en mazorca tierna (choclo o elote) Monocultivo							Datos de producción de maíz para la provincia de Imbabura en mazorca tierna (choclo o elote) asociado a una leguminosa (frijol)							
	Superficie sembrada ha	Superficie cosechada ha	Superficie pérdida ha	Producción t	Rendimiento t ha ⁻¹	Ventas t	Producción de autoconsumo t	Superficie sembrada ha	Superficie cosechada ha	Superficie pérdida ha	Producción t	Rendimiento t ha ⁻¹	Ventas t	Producción de autoconsumo t	Superficie sembrada ha	Superficie cosechada ha	Superficie pérdida ha	Producción t	Rendimiento t ha ⁻¹	Ventas t	Producción de autoconsumo t	
2002	25810	23699	2111	39317	1,66	33553	5764	1109	1109	0	3857	3,48	3714	143	238	227	11	129	0,6			129,0
2003	39507	38089	1418	45491	1,19	37072	8419	768	742	26	1542	2,08	1252	290	54	54	0	202	3,7	189		13,0
2004	54040	50325	3715	69444	1,38	50058	19386	2085	2063	22	7578	3,67	7562	16	209	198	11	76	0,4			76,0
2005	45594	42819	2775	69193	1,62	49330	19863	2349	2235	114	5912	2,65	5750	162	264	264	0	217	0,8	138		79,0
2006	35342	33410	1932	66778	2,00	56333	10445	3022	3004	18	13340	4,44	13092	248	235	220	15	442	2,0	381		61,0
2007	50524	48236	2288	65339	1,35	57210	8129	3659	3504	155	11357	3,24	11252	105	702	677	25	1036	1,5	961		75,0
2008	39400	37026	2374	43272	1,17	34916	8356	788	788	0	2020	2,56	1871	149			0	81			56	25,0
2009	60920	59711	1209	62084	1,04	46451	15633	1111	1111	0	2983	2,68	2788	195	142	119	23	68	0,6	37		31,0
2010	56393	53600	2793	53725	1,00	42677	11048	1630	1612	18	4498	2,79	4301	197	135	129	6	43	0,3			43,0
2011	74858	71454	3404	68589	0,96	54494	14095	1656	1587	69	7707	4,86	7565	142	1856	1850	6	1810	1,0	1644		166,0
2012	74663	69161	5502	72624	1,05	62496	10128	982	968	15	3251	3,36	3209	41	637	637	0	548	0,9	460		88,3
2013	62984	55158	7826	66468	1,21	57245	9223	633	442	191	814	1,84	638	176	36	36	0	31	0,9			30,9
2014	43418	39797	3621	75823	1,91	58648	17175	3641	3127	515	7047	2,25	6102	944	390	295	94	680	2,3	431		249,6
2015	69416	62120	7296	112097	1,80	91175	20922	2149	1806	343	5344	2,96	4730	614	284	204	80	307	1,5	57		250,2
2016	26917	23557	3360	69006	2,93	61823	7183	1210	1065	145	3100	2,91	2620	480	549	450	99	747	1,7	445		302,4
2017	24042	22241	1800	69975	3,15	62524	7451	1144	1081	63	2690	2,49	1883	807	232	227	4	330	1,5	207		122,7

Tabla 2 Producción de maíz, en el Ecuador, pra consumo en grano seco. Fuente: INEC 2017

	Datos Nacionales de producción de maíz para grano seco (consumo humano o industrial)							Datos de producción de maíz para la provincia de Imbabura grano seco (consumo humano o industrial) Monocultivo							Datos de producción de maíz para la provincia de Imbabura grano seco (choclo o elote) asociado a una leguminosa (frijol)						
	Superficie sembrada ha	Superficie cosechada ha	Superficie pérdida ha	Producción t	Rendimiento t ha ⁻¹	Ventas t	Producción de autoconsumo t	Superficie sembrada ha	Superficie cosechada ha	Superficie pérdida ha	Producción t	Rendimiento t ha ⁻¹	Ventas t	Producción de autoconsumo t	Superficie sembrada ha	Superficie cosechada ha	Superficie pérdida ha	Producción t	Rendimiento t ha ⁻¹	Ventas t	Producción de autoconsumo t
2002	117321	114510	231831	43545	0,38	13180	30365	3120	2992	128	1636	0,55	961	675	2030	2013	17	605	0,30	77	528
2003	110109	106439	216548	46520	0,44	13551	32969	3341	3253	88	1728	0,53	1002	726	2758	2758	0	1427	0,52	451	976
2004	134074	115066	249140	53080	0,46	17816	35264	4748	4705	43	2385	0,51	1633	752	7082	7082	0	2674	0,38	1537	1137
2005	114340	108140	222480	44208	0,41	10852	33356	3732	3666	66	2187	0,60	543	1644	7469	7406	63	4235	0,57	2061	2174
2006	106122	102019	208141	50588	0,50	22118	28470	4289	4009	280	2077	0,52	1378	699	2763	2747	16	1233	0,45	553	680
2007	91094	85468	176562	31475	0,37	10406	21069	2749	2472	277	1731	0,70	1170	561	1690	1506	184	856	0,57	414	442
2008	78809	72004	150813	32625	0,45	11696	20929	5722	5124	598	2451	0,48	1692	759	2265	1994	271	1029	0,52	417	612
2009	84544	81516	166060	44233	0,54	18026	26207	3341	3071	270	2038	0,66	1722	316	919	896	23	687	0,77	328	359
2010	78293	67847	146140	37547	0,55	14928	22619	1891	1437	454	1766	1,23	1026	740	530	254	276	297	1,17	132	165
2011	93631	87610	181241	34295	0,39	16121	18174	3526	3282	244	3464	1,06	3120	344	270	260	10	190	0,73	131	59
2012	73570	67145	140716	28136	0,42	10078	18058	1876	1869	7	1004	0,54	709	296	1071	1067	4	554	0,52	405	149
2013	87998	79519	167517	42579	0,54	23481	19098	3445	2808	637	2353	0,84	2151	201	188	188	0	174	0,92	101	73
2014	64092	59683	123775	37871	0,63	17573	20298	3872	3271	601	2467	0,75	1235	1233	584	524	60	370	0,71	113	257
2015	57046	45874	102919	26550	0,58	11284	15266	2451	2281	171	1515	0,66	462	1053	2040	1736	303	1067	0,61	344	723
2016	53332	44756	98088	30251	0,68	13826	16424	3301	2758	543	1630	0,59	612	1018	2016	1834	182	1057	0,58	200	857
2017	65849	59610	125458	50053	0,84	26518	23535	2137	2012	125	1886	0,94	820	1066	2357	2174	183	1543	0,71	416	1127

La figura 4, muestra la evolución de la superficie sembrada de maíz a nivel de Ecuador entre los años 2002-2017, notándose una disminución del 50% de la superficie plantada dedicada a la producción de grano entre el 2004 y 2017 debido principalmente a bajos precios del mercado, y a las pérdidas por variaciones climáticas. En el caso del maíz dedicado al consumo como mazorca tierna, la tendencia es variable, y está asociada a la variación de los precios en el mercado, puesto que, si el valor por la venta de las mazorcas tiernas es bajo, los agricultores, dejan que la mazorca termine de ciclo fisiológico en la misma planta.

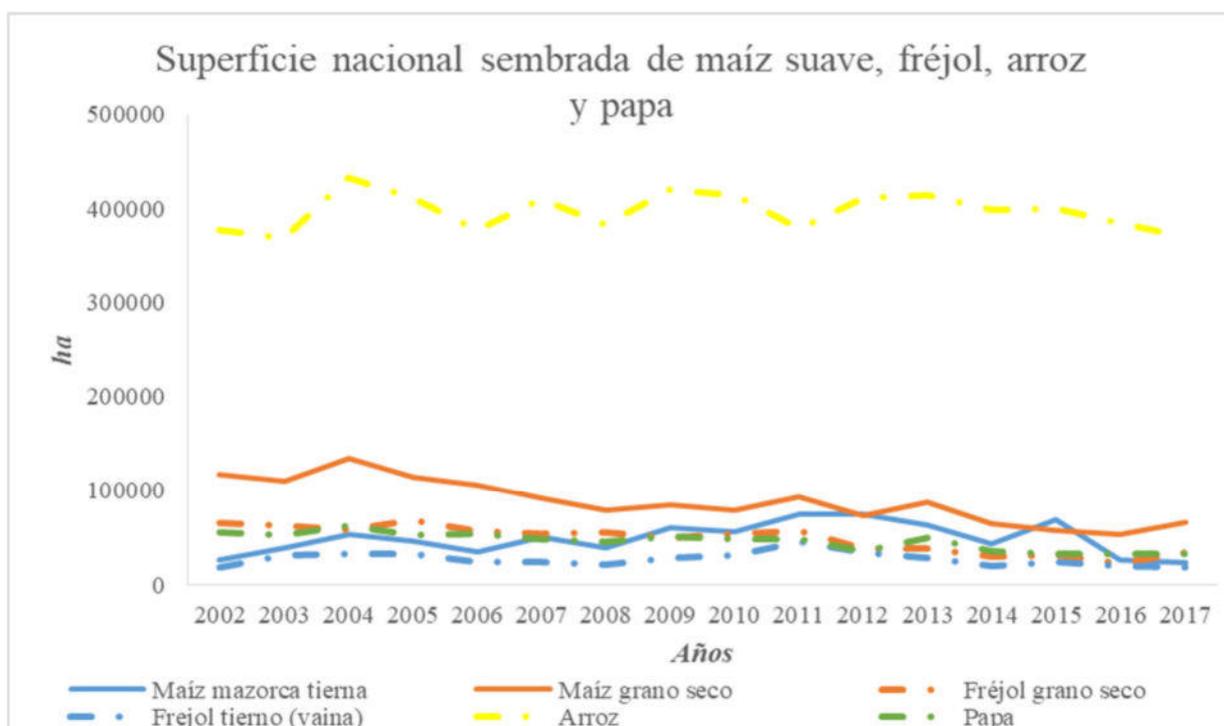


Figura 4 Superficie sembrada de maíz suave para consumo (mazorca tierna y grano seco) a nivel de Ecuador (INEC.2017).

En lo referente a los datos de las encuestas agropecuarias del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) entre los años 2002 y 2017 (figura 5), en la provincia de Imbabura la superficie dedicada al monocultivo de maíz, tanto para la cosecha de mazorca tierna como grano seco, ha sido muy variable, con tendencia estable en el tiempo. Este fenómeno, al igual de lo que sucede a nivel nacional, es causado por bajos precios en los mercados, variaciones climáticas y cambios en los patrones de consumo humano hacia otras fuentes de hidratos de carbono como la papa y el arroz.

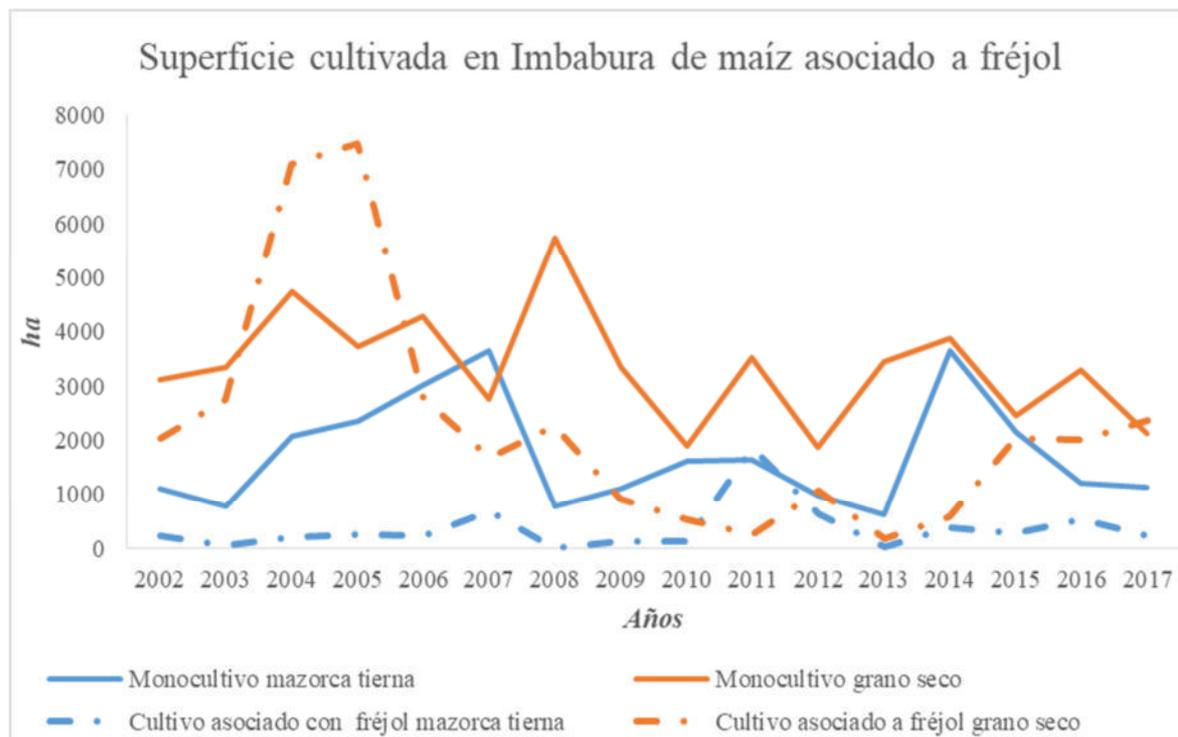


Figura 5 Superficie sembrada en monocultivo y asociación de maíz suave para consumo (mazorca tierna y grano seco) en la provincia de Imbabura (INEC, 2017).

En la Figura 5, se puede observar la tendencia a disminuir la superficie de maíz sembrada en asociación con una leguminosa. Los patrones de manejo de los cultivos, asociados al suministro de nutrientes se han intensificado hacia un mayor empleo de fertilización mineral, quedando relegado la asociación del maíz con leguminosa (frijol) exclusivamente a la agricultura familiar de minifundio. Aspecto negativo en tanto que reduce la calidad del suelo y genera una dependencia de energías no renovables para la síntesis de abonos nitrogenados, que limitan la sostenibilidad de la producción del maíz a largo plazo. La disminución de esta asociación es mucho más notoria en el cultivo dedicado a consumo como grano seco que a la mazorca tierna. Cabe destacar que en los años 2004 y 2005 se cultiva el doble de superficie de maíz-grano en asociación con el frijol que en monocultivo (Figura 5), siendo aproximadamente la mitad la cantidad de cultivo con frijol que en monocultivo para la mayoría de los años. El maíz para mazorca tierna, de menor relevancia, se cultiva por lo general en monocultivo, aunque se observa la tendencia contraria en el año 2011.

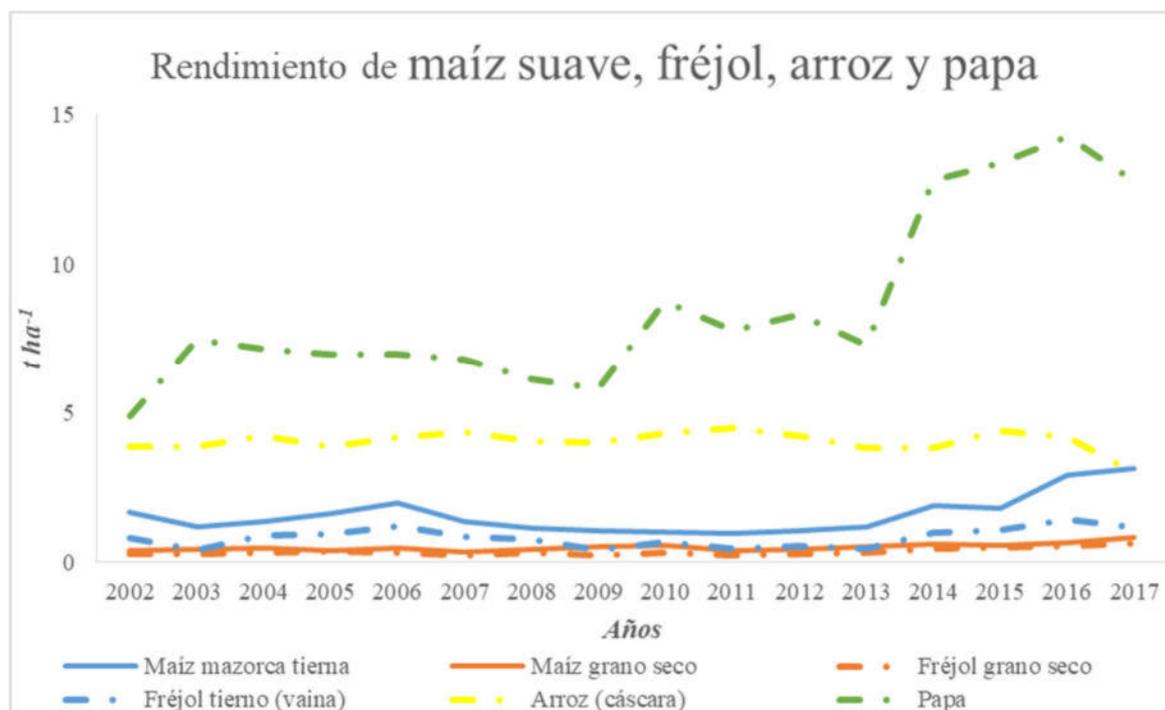


Figura 6 Rendimiento del maíz suave para consumo (mazorca tierna y grano seco) a nivel nacional en el Ecuador (INEC, 2017),

Los patrones de rendimiento a nivel nacional en Ecuador del maíz suave de variedades locales para consumo como mazorca tierna, son variables a lo largo de los años, con una tendencia al incremento para el año 2011, especialmente debido a la mejora de la gestión del cultivo. De igual modo se observa una tendencia al incremento de rendimiento por unidad de superficie en el maíz-grano.

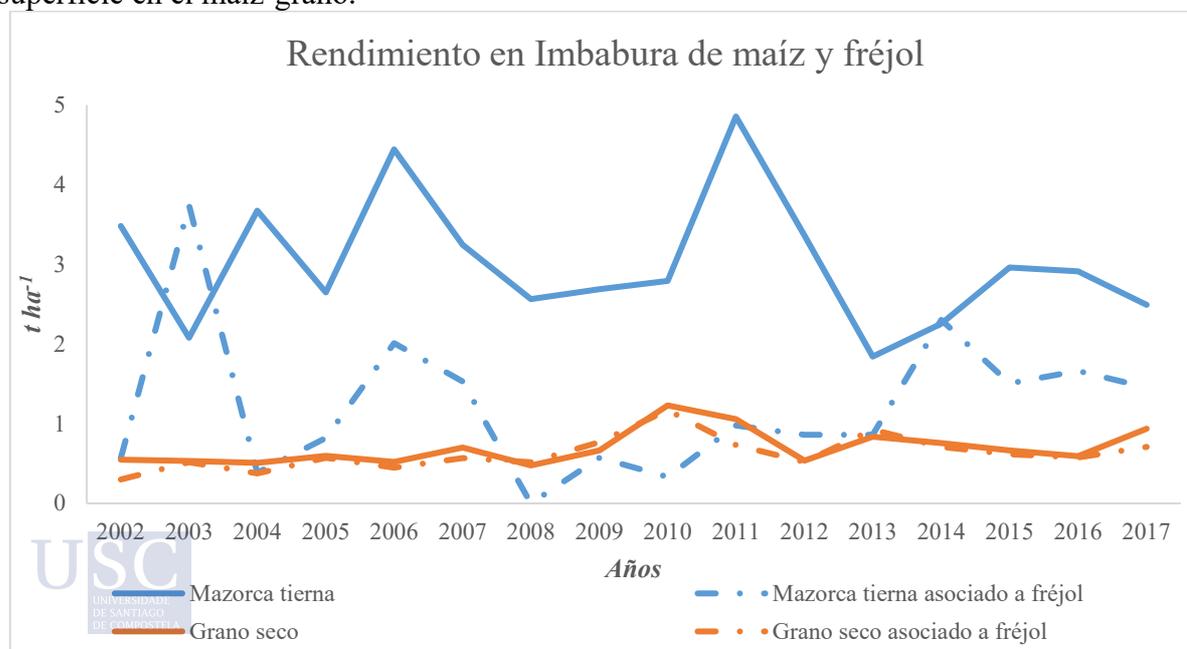


Figura 7 Rendimiento del maíz suave y fréjol para consumo (mazorca tierna y grano seco) en la provincia de Imbabura (INEC, 2017).

En lo que respecta a la provincia de Imbabura, los rendimientos en mazorca tierna son muy elevados en comparación con el promedio nacional en la mayoría de los años (Figura 7), resultando los de grano seco en la provincia de Imbabura similares al promedio nacional.

La asociación del cultivo de maíz con leguminosa en la provincia de Imbabura muestra una tendencia de aumento en rendimientos para grano seco, siendo la producción mucho más variable con los años cuando evaluamos la producción de mazorca tierna. No obstante, en estos estudios no se tiene en cuenta la producción complementaria de leguminosa, que debe ser sumada a la del cultivo del maíz. Tampoco se considera la mejora que en términos de proteína supone el cultivo conjunto de maíz y frijol, que reduce la necesidad de compra de proteína en alimentación humana y animal.

1.4. DESCRIPCIÓN Y ECOFISIOLOGÍA DEL MAÍZ

El maíz (*Z. mays* (L)) es una especie anual, monocotiledónea, perteneciente a la familia de las poáceas que posee un porte robusto de fácil crecimiento y desarrollo.

El ciclo del cultivo puede llegar hasta los 270 días. No obstante, depende de la variedad y del objetivo para el que se cultiva, si es para choclo o grano seco (Quiroz y Merchán, 2016).

El maíz es una gramínea C4 que posee un sistema de raíces fibroso, si el crecimiento de la raíz no está restringido, cuando la planta alcanza su madurez se extiende aproximadamente hasta 1,5 m lateralmente y a más de 2 m en profundidad. Este sistema radicular tiene raíces adventicias cuyo crecimiento está influenciado por los nutrientes del suelo y la proximidad de las plantas vecinas (Zhang y col., 2016).

El tallo de maíz varía en altura desde menos de 0,6 m en algunos genotipos a más de 5 m en otros. El tallo es cilíndrico, sólido y está claramente dividido en nudos y entrenudos. La planta de maíz puede llegar a tener entre 8 - 21 entrenudos (Silva y col., 2009). Los entrenudos se ubican directamente debajo de las primeras cuatro hojas que no se elongan, mientras que aquellas debajo de la sexta, séptima y octava hoja se alargan a aproximadamente 25, 50 y 90 cm, respectivamente (Zhang y col., 2016).

Las hojas siguen un patrón en espiral a través del tallo, y ocurren alternativamente en dos filas opuestas en el tallo. La hoja del maíz se presenta con las estructuras típicas de las gramíneas con su vaina, lígulas y aurículas. Existen mecanismos fisiológicos que controlan las respuestas del crecimiento y los rasgos adaptativos de las plantas, a partir de aquí el crecimiento expansivo de hojas puede ser gobernado por mecanismos comunes que controlan las propiedades mecánicas de la pared celular (Turc y col., 2016).

Las flores masculinas y femeninas nacen en la misma planta como inflorescencias separadas. Las masculinas nacen en la borla y las femeninas en la oreja. Las diferentes etapas de crecimiento están numeradas de 0 a 10. La etapa de crecimiento 0 dura desde la siembra de la semilla hasta cuando la plántula es visible sobre la superficie del suelo. La etapa de crecimiento 10 se alcanza cuando la planta está biológicamente madura (Fassio y col., 1998).

Los caracteres agronómicos del maíz que necesitan los productores y consumidores debe tenerse en cuenta en los programas de siembra, los rasgos varían en función del objetivo que en la zona tropical incluyen; la precocidad, la altura de la planta, la resistencia a la caída del tallo, plagas, capacidad competitiva con malas hierbas, tolerancia a la sequía y el rendimiento del grano entre otros (Abadassi, 2015).

En maíz, y a diferencia de otros cultivos, el área foliar máxima por planta se alcanza cuando se produce la floración femenina, en coincidencia con el período más crítico para la determinación del número de granos, principal componente del rendimiento del cultivo de maíz.

Puesto que el área foliar es una característica clave, distintos métodos han sido desarrollados para estimar su generación y persistencia a lo largo del ciclo del cultivo (Razquin y col., 2017)

El maíz es una especie con crecimiento determinado por las condiciones edafoclimáticas, esta característica hace que las condiciones de estrés de origen biótico y abiótico a las que el maíz puede verse sometido afecten a la producción de biomasa y rendimiento, provocando que sea altamente susceptible a la variabilidad ambiental (Giménez, 2017).

El maíz es una especie de tipo C4 con elevada eficiencia en la transformación de la radiación fotosintéticamente activa en biomasa y grano (Giménez, 2017). Para expresar el alto potencial de rendimiento que posee el maíz, sin incrementar excesivamente los costes y riesgos asociados a un cultivo de secano, es necesario adecuar prácticas de manejo que mejoren la disponibilidad de recursos para el crecimiento (Cacciavillani y col., 2017).

El componente más importante del rendimiento, el número de granos por planta, se determina en ese período crítico y está estrechamente relacionado con la tasa de crecimiento de la planta en ese momento (Espinosa y col., 2004).

Parte del cultivo de maíz en Ecuador, se produce en condiciones ambientales desfavorables, donde la distribución de las lluvias es un factor decisivo en la sostenibilidad de la producción de este cereal (Zambrano y col., 2017). Por lo tanto, entender los cambios fisiológicos y las reacciones bioquímicas de las plantas bajo estrés por sequía son esenciales para manejar el cultivo, donde el rendimiento y peso de 100 granos del maíz se ven afectados por el déficit hídrico, dosis bajas de N y exceso en la densidad de siembra (Najafinezhad y col., 2015; Ortiz, 2016).

En maíz, el rendimiento depende íntimamente de la interacción del genotipo con el ambiente. El manejo del maíz en distintos ambientes ha cobrado importancia en los últimos años debido a diferentes causas, siendo la más relevante la relacionada a la transformación de la actividad agrícola, tanto por la intensificación como por el aumento de la productividad a través de un mayor uso de la tecnología (Zambrano y col., 2017). Dentro de las prácticas de manejo, la densidad de siembra es un factor de producción muy importante en este cultivo, debido al efecto que tiene sobre la producción y partición de materia seca en la planta, afectando el rendimiento. La respuesta del rendimiento del maíz se describe siguiendo las siguientes fases (Cerliani y col., 2018):

1. un incremento lineal a densidades muy bajas
2. un incremento parabólico en densidades intermedias
3. una respuesta parabólica negativa en altas densidades

El maíz tiene varios mecanismos que le permiten percibir el déficit de agua entrante y rápidamente regular su crecimiento y fisiología para hacer frente a este estrés. Entre estos mecanismos de respuesta fisiológicos están; la producción de fitohormonas, como ácido abscísico (ABA), giberelina (GA3), ácido indol acético (IAA), y zeatin (ZT) juegan un papel muy importante (Pirasteh-Anosheh y col., 2013).

Otro de los pilares fundamentales para alcanzar elevados rendimientos es el manejo eficiente de la nutrición del cultivo de maíz, donde la principal limitante es el nitrógeno (N) seguido del fósforo (P). Si bien, el azufre (S) se menciona, en los últimos años, como elemento limitante en algunas zonas (Cacciavillani y col., 2017).

Se pueden usar varios métodos para determinar el rendimiento potencial, cada uno con sus propias limitaciones. Uno de los métodos más fiables son los datos de rendimiento a largo plazo, recolectados por cada productor individual, ya que refleja el rendimiento inherente del entorno específico, así como el efecto de prácticas agronómicas tales como la fertilización, el manejo del suelo y la población de plantas y habilidades gerenciales del productor (du Plessis, 2003).

La combinación leguminosa-maíz se ha utilizado en varios sistemas mixtos de cultivo, incluidos los forrajes y cultivos de cobertera. Generalmente, la asociación de estos cultivos ayudan a la nutrición nitrogenada debido a la transferencia del N de la leguminosa a la planta asociada (Tarui y col., 2013). Estas leguminosas tienen gran valor como abono verde debido al proceso de fijación de N que realizan en asociación simbiótica con bacterias del género *Rhizobium*. Aunque se pueden cultivar otras especies de crecimiento rápido y de buena producción de masa verde, como las gramíneas y las combinaciones de algunas de ellas en forma de mezcla (García y col., 2000).

1.5. CONDICIONES EDAFOCLIMÁTICAS

El maíz es un cultivo de clima cálido, no se desarrolla en áreas donde la temperatura media diaria es inferior a 19° C ó cuando el promedio de las temperaturas en los meses de verano es inferior de 23° C. Aunque la temperatura mínima para la germinación es de 10° C, esta será más rápida y menos variable a temperaturas del suelo comprendidas entre 16 - 18° C, el maíz debería emerger entre cinco y seis días a 20° C. La temperatura crítica máxima que afecta negativamente el rendimiento es de aproximadamente 32° C (Fassio y col., 1998).

La temperatura, también afecta la tasa de crecimiento del cultivo, actuando sobre la respiración y fotosíntesis. Para el maíz, las exigencias en temperatura, principalmente en las regiones templadas, son conocidas como exigencias en unidades de calor, que no es más que el promedio de las temperaturas máximas y mínimas diarias al que se resta la temperatura base a la que no se produce crecimiento que es de 10° C (Aguilar y col., 2017).

Humedad

Aproximadamente se producen entre 10 a 16 kg de grano por cada milímetro de agua utilizada. Un rendimiento de 3.152 kg ha⁻¹ requiere entre 350 y 450 mm de lluvia por ciclo. En la madurez, cada planta habrá usado 250 litros de agua en ausencia de estrés por humedad. El maíz requiere transpirar entre 450-600 mm de agua durante su estación de crecimiento. (Fassio y col., 1998). El grado de estrés variará con el tipo de suelo debido a las diferentes características en cuanto a la retención de agua. La demanda atmosférica de agua es función de la energía disponible (radiación solar), el movimiento de humedad de la superficie evaporante (viento), la humedad de la atmósfera y la temperatura del aire (Fassio y col., 1998).

Radiación

La radiación diaria de onda corta en los trópicos durante la estación seca varía desde 10 Mj m⁻² día⁻¹ en zonas nubladas, hasta 25 Mj m⁻² día⁻¹ en zonas semi-áridas. Como se mencionó anteriormente, la producción de maíz sin estrés sembrado a altas densidades puede interceptar alrededor de 55% del total de la radiación recibida en el período de cultivo. Se ha encontrado que la eficiencia de conversión de energía luminosa en biomasa del maíz que crece sin estrés va de 1,2 a 1,6 gramos de biomasa aérea por cada Mj de radiación solar interceptada (Najafinezhad y col., 2015).

La energía solar utilizada por el maíz es proveniente de la longitud de onda entre 0,4 - 0,7 micrones, es decir la llamada radiación de espectro visible. Radiación alta y temperaturas excesivamente altas, pueden causar que la fotosíntesis del estrato superior de hojas cese por fotoinhibición. La cantidad de radiación potencialmente interceptable en un período fenológico específico estará determinada por la radiación incidente diaria (Fassio y col., 1998).

Suelo

El tipo de suelo adecuado para el maíz es el que posee buena profundidad, drenaje, régimen óptimo de humedad y cantidades suficientes y equilibradas de nutrientes. Aunque la producción de maíz a gran escala se desarrolla en suelos con un contenido de arcilla inferior al 10% (suelos

arenosos) o superior del 30% (arcillosos y franco arcillosos), las clases de textura con contenidos en arcilla entre el 10 y 30% tienen regímenes de aire y humedad que son óptimos para una producción de maíz saludable (du Plessis, 2003).

La densidad de siembra permite definir la capacidad del cultivo de interceptar recursos como la radiación, agua o nutrientes, es importante tener en cuenta que una baja oferta de nitrógeno supone una mayor restricción al desarrollo del cultivo a densidades elevadas de siembra. Así para una densidad de siembra de 55.000 plantas por hectárea la dosis óptima de nitrógeno está en torno a 151 kg ha⁻¹ por ciclo (Ortiz, 2016).

La incorporación de N en el suelo es importante, debido a su bajo contenido en suelos agrícolas gestionados de forma intensiva, precisándose, que la aplicación sea fraccionada. La aplicación de nitrógeno, incrementa el crecimiento, rendimiento de grano y la eficiencia agronómica del nitrógeno y del agua en sistemas intensivos, si bien de forma no sostenible a lo largo del tiempo, encontrándose problemas a largo plazo (Aguilar y col., 2017).

Es por ello que la intensificación productiva sustentable (ecointensificación) debe incluir el manejo de rotaciones, siembra directa, cultivos en cobertera, empleo de leguminosas, fertilización del suelo, y otras prácticas que permitan preservar la MO y hacer un uso eficiente del agua y otros recursos e insumos. La nutrición de suelos y cultivos debe concebirse integralmente, más allá del cultivo inmediato para proveer de una adecuada fertilidad a los suelos y contribuir a alcanzar los objetivos de sustentabilidad ecológica, económica y social de nuestros sistemas de producción en las que el empleo de las leguminosas juega un papel primordial (García y Díaz-Zorita, 2015).

1.6. DESARROLLO FENOLÓGICO E INTERACCIÓN CLIMÁTICA

Según el sexto informe de evaluación climática de la IPCC, 2021, la temperatura de la superficie global seguirá aumentando hasta mediados de siglo, bajo los escenarios de emisiones considerados. Se superará el calentamiento global de 1,5 ° C y 2 ° C durante el siglo XXI, lo cual ocasionará aumentos en la frecuencia e intensidad de extremos cálidos, marinos, olas de calor y fuertes precipitaciones, sequías agrícolas y ecológicas en algunas regiones, y proporción de ciclones tropicales intensos, así como reducciones en el hielo marino del Ártico. En escenarios con emisiones crecientes de CO₂, los sumideros de carbono oceánicos y terrestres se prevé que sea menos eficaz para frenar la acumulación de CO₂ en la atmósfera. Estas variaciones en el aumento de la temperatura, se han visto reflejadas en cambios en los periodos fenológicos de las plantas entre dos a cuatro días, en un periodo de 61 años (Bradley y col., 1999).

Otro efecto adverso de la sequía en las plantas es la disminución de la acumulación de biomasa, limitada absorción de nutrientes con la consecuente disminución de los rendimientos del cultivo (Taiz y Zeiger, 2003). El periodo de siembra del maíz ha sido establecido en consideración climáticas y la estacionalidad del año (Ramírez y col., 2013), lo que tiene consecuencia sobre las tasas de crecimiento y rendimiento.

Las fases sensibles de la producción de maíz son la germinación y el desarrollo de las primeras hojas, la floración y el llenado de fruto (Ramírez y col., 2013), por lo tanto un aumento de la temperatura o la precipitación tienen consecuencias negativas en el desarrollo del cultivo (Kumar y Singh, 2001; Carpio y col., 2015;) y su repercusión final en el rendimiento (Granados y Sarabia, 2013).

1.7. VARIEDADES DE MAÍZ LOCAL

El Ecuador cuenta con 29 variedades de maíz reconocidas, de las cuales 17 las encontramos en la sierra y el resto en el litoral y la Amazonía. Por otra parte, la mayor diversidad esta en la sierra se puede asociar a las condiciones edafoclimáticas y a preferencias por su consumo, ya que en la zona norte del Ecuador esta preferencia se asocia a maíces amarillos harinosos, en la parte central los maíces blancos harinosos y en la parte austral los maíces tipo Zhima, granos harinosos de color blanco plano y de tamaño grande que pertenecen a la raza Cuzco-Ecuatoriano (INIAP, 2003).

En la presente investigación se han seleccionado dos variedades de maíz, la Huandango y la Chaucho al ser estas variedades nativas y precoces, presentan un gran potencial de reserva genética y productiva lo que constituye un componente primordial de la dieta de la población ecuatoriana.

Huandango

Es una variedad nativa de la sierra ecuatoriana, precoz, fuerte y presentan un color amarillo intenso de mazorcas; largas, delgadas y cilíndricas, con hileras largas y rectas. Las plantas son fuertes con hojas anchas y onduladas (INIAP, 2003) carozo (olote o tuza) de color rojo (Tapia, 2015), el periodo de cosecha es de 180 días, puede cultivarse entre 2200-2800 msnm. En los procesos de mejoramiento participativo con agricultores, obtenidos de cruces con Chaucho (ECU-07203, ECU-07297, ECU-07302 y ECU-07310) ensayados en la Estación Experimental Santa Catalina- INIAP, se alcanzó un rendimiento 4.230 kg ha⁻¹ y en Cotacachi provincia de Imbabura 4.990 kg ha⁻¹(CIMMYT, 1997).

Chaucho

La variedad de maíz Chaucho; es precoz, alta, fuerte y se puede cultivar entre los 2.200 y 2.800 msnm (Yáñez y col., 2013), El período de cosecha es de 135 días para mazorca tierna (choclo) y 225 días para grano seco. Esta variedad alcanza una altura de planta de hasta 2,50 m. La mazorca se inserta a 1,40 m de la planta, es cilíndrica o cónica y presenta entre 10 a 12 hileras irregulares, el carozo (olote o tuza) de color rojo (Tapia, 2015). El grano es de color amarillo grande dentado o con puntas y harinosos. Esta variedad puede asociarse a la siembra con leguminosa (frijol), alcanzando un rendimiento de 3.864 kg ha⁻¹, y presenta resistencia a *Helminthosporium*, *Puccinia* y *Fusarium* (Basantes, 2015).

1.8. ASOCIACIÓN DE MAÍZ CON LEGUMINOSA

La práctica ancestral de asociación de maíz con frijol, aprovecha la incorporación en los tejidos de la leguminosa del N₂ atmosférico generado por fijación biológica para que posteriormente sea aprovechado por el maíz (Boada y Espinosa, 2016). Esta asociación, mejora el uso de recursos naturales de manera más eficiente que cuando el maíz se maneja en monocultivos (Castillo y col., 2009), aunque con una predicción menor en comparación con los abonos minerales, además la asociación permite mayores ventajas económicas sociales y ambientales (Delgado y col., 2014). De acuerdo a la investigación realizada por Ruiz-González y Victorino-Ramírez, 2015; la diferencia entre un monocultivo de maíz y la asociación de maíz frijol, presenta una ventaja de solo el 2% mayor en favor de asociación, con dosis bajas de fertilización con 60-60-60 de N-P₂O₅-K₂O.

Variedad local de frijol (canario)

El frijol, es la leguminosa de grano para consumo humano directo más importante en el mundo; ocupa el octavo lugar entre las leguminosas sembradas.

En el Ecuador es la leguminosa de mayor área de cultivo y consumo, actualmente se cosecha alrededor de 90.000 hectáreas de las 105,127 ha, sembradas en grano seco y 15,241 ha en verde o tierno de las 16,464 ha, sembradas. El rendimiento promedio de frijol registrado en Ecuador es bajo, 430 kg ha⁻¹ en monocultivo y 110 kg ha⁻¹ cuando está asociado con maíz, frente al rendimiento potencial del cultivo que sobrepasa los 2,000 kg ha⁻¹ (Navarrete y col., 2013). De acuerdo con Pachico (1989) y Gonzales y otros (2007) (como se cita en Torres, y col (2013), la producción está fundamentalmente destinada para autoconsumo y venta en mercados locales, además dentro de sus sistemas de producción existe un alto uso de mano de obra sea ésta familiar o contratada). Esto demuestra la importancia económica, nutricional y social del cultivo para los agricultores de bajos recursos, debida a los ingresos financieros que provee la venta de la producción, así como por contribuir a la seguridad alimentaria de la población de estas zonas.

La variedad de frijol voluble INIAP 426 Canario “Siete Colinas”, procede del cruzamiento entre las líneas TIB 3042 x G11732, realizado por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Esta variedad fue evaluada en los centros experimentales de Santa Catalina y Bolívar entre los años 1992 y 2003, en monocultivo en espaldera y en asociación con maíz (INIAP, 2004). El hábito de crecimiento del frijol es IVa (formación de vainas en la parte baja de la planta), pudiendo las plantas alcanzar alturas de 1,8 a 2,15 m. La flor tiene una coloración blanca, y las vainas en verde pueden alcanzar entre 0,13 a 0,15 m, los granos son redondos, de color blanco en grano tierno y amarillo en grano seco. La floración se produce entre los 75 a 90 días después de la emergencia y se lo puede recolectar en vaina verde entre los 150 a 160 días y como grano seco a los 170 a 190 días. Cuando se asocia al cultivo de maíz, el frijol produce entre 7 a 18 vainas mientras que en monocultivo entre 17 a 40 vainas con un peso de 50 a 60 g para los 100 granos. Esta variedad se puede asociar al cultivo de maíz cuando el fin es la producción de mazorca tierna o grano seco (Basantes 2015; SKARBØ, 2012; Prefectura de Imbabura, 2015), con rendimientos de 1.000 a 1.962 kg ha⁻¹ mientras que en monocultivo su rendimiento puede variar entre los 1.800 a 3.200 kg ha⁻¹.

1.9. MODELOS DE SIMULACIÓN

El concepto de producción agrícola se utiliza para hacer referencia al tipo de productos y beneficios que la actividad agrícola genera. Este concepto se define como la cantidad total producida de los bienes destinados para el mercado interno y externo. Para este fin y con el objeto de predecir la producción de cultivos como el maíz en la actualidad se emplean modelos que permiten reflexionar anticipadamente sobre la cantidad de producto a cosechar (Sumba, 2014). Un modelo es la representación simplificada de un sistema, donde se describen las variables dependientes e independientes de interés, características y restricciones mediante símbolos, diagramas y ecuaciones. Pueden ser descriptivos o de simulación. En los primeros únicamente se representan los componentes del sistema, mientras que en los segundos se imita el funcionamiento del sistema y se obtienen resultados predictivos, en forma de datos numéricos o gráficos (Candelaria y col., 2011).

La simulación es el proceso de ejecución de un modelo por el cual se obtienen unos resultados sobre el estado de cada componente. Los principales componentes de los modelos son generalmente el clima, el suelo, la vegetación, los animales y el gestor o tomador de

decisiones (Bracco y col., 2016; Marín-González y col., 2018). En este contexto, existen diversos modelos de simulación de producción de los cultivos que se emplean ampliamente incorporando el impacto del cambio climático sobre la producción y varios servicios ecosistémicos (Bhattarai y col., 2017). Además, es importante tener en cuenta que las predicciones del rendimiento a largo plazo son necesarias para evaluar la rentabilidad económica a largo plazo del sistema (van der Werf y col., 2007).

De acuerdo con autores como Steduto (2003), los modelos que simulan la producción de biomasa de los cultivos, están basados en lo que se conoce como motor de crecimiento, ya que integran los balances de energía y materia de los sistemas agrícolas. Por su parte Overman y Allen (2002) resaltan que los modelos dinámicos para el desarrollo de biomasa en el maíz, se establecen cuando se conoce la interacción entre los medios bióticos y abióticos.

Así mismo la escasez de recursos naturales, necesarios para el desarrollo de los procesos agrícolas hace necesario que se consideren la utilización de herramientas informáticas, que permitan predecir eventos en escenarios cambiantes (Pfister y col., 2005). Estos modelos se agrupan en tres tipos: 1) modelos de simulación de cultivos; 2) modelos de optimización; 3) modelos para la toma de decisiones por los agricultores y por los gestores de las políticas públicas.

De la misma forma, en los últimos años el desarrollo de los sistemas agroecológicos y la asociación de más de una especie en el mismo campo, ha llevado al desarrollo de modelos que permitan a los gestores del territorio tomar decisiones, en las políticas públicas encaminadas a mitigar los efectos del cambio climático, reducir la degradación del suelo y garantizar la seguridad alimentaria. El desarrollo de modelos predictivos para cultivos intercalados resulta ser más complejo debido a las distintas interacciones que existen (Luedeling y col., 2016). Por su parte en el desarrollo de modelos predictivos se deben considerar los efectos de las condiciones ambientales en el rendimiento que puedan alcanzar los cultivos frente a variaciones del tiempo atmosférico (Wang y col., 2016), lo que ha obligado a los agricultores a desplazar las épocas de siembra, no siempre coincidiendo con las mejores épocas para el desarrollo de los cultivos. Con estas consideraciones se han probado modelos en los que se limitan las condiciones sin restricción de riego y en déficit controlado como escenario de alteraciones ambientales (Ahmadi y col., 2015), siendo esto una alternativa que se tienen en países con acceso limitado a los recursos hídricos (Flores y col., 2013).

1.9.1. LOS MODELOS DE SIMULACIÓN COMO HERRAMIENTAS DE APOYO AL PRODUCTOR

Los modelos de simulación de cultivos (CSM: Crop Simulations Models) son excelentes herramientas de apoyo a la toma de decisiones para sistemas de cultivos intercalados y de policultivos, y son en la actualidad el foco de la revisión de las instituciones para modelizar futuros sistemas agrícolas (Chimonyo y col., 2015).

Los modelos de cultivo facilitan la evaluación de las relaciones entre los factores que afectan el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los mismos. Estos factores incluyen la fecha de siembra, selección de variedad, tasas de siembra, tipo de suelo, estrategias de fertilización e irrigación y patrones climáticos estacionales (Dokoohaki y col., 2016). En este sentido, se han desarrollado varios modelos para simular procesos del crecimiento de los cultivos. Estos modelos se basan, en gran parte, en mecanismos que describen las interacciones de varios procesos fisiológicos de las plantas. Además, tienen el potencial de simular con precisión el crecimiento del cultivo en una amplia gama de condiciones (Hodges y col., 1987). La mayoría de los modelos de producción agrícola contienen un submodelo basado en procesos en su núcleo

que simula el crecimiento de las plantas a través de sus etapas vegetativa y generativa en una unidad de tierra particular (Luedeling y col., 2016).

1.9.2. USO DE MODELOS DE SIMULACIÓN EN SISTEMAS AGRÍCOLAS

Los modelos de cultivos basados en procesos son herramientas para evaluar el impacto del cambio climático y la gestión agrícola en el crecimiento de los cultivos (Huang y col., 2017). Existen muchos modelos o grupos de modelos que simulan sistemas de cultivos, clima o suelo tales como STICS (Simulateur multidisciplinaire pour les Cultures Standard), APSIM (Agricultural Production Systems sIMulato), DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer), CropSyst (Cropping Systems Simulation Model) y los modelos de cultivo en Wageningen (Jing y col., 2017)

Tabla 3 Tipos de modelo por su función y grado de extracción del fenómeno Fuente: De Souza y González (2001) citado por Candelaria y col (2011)

<i>Tipo</i>	<i>Característica</i>
	<i>Por su propósito</i>
Descriptivos	Describe las características del fenómeno en cuestión; emplea la observación sistemática y participante, encuestas, entrevistas, estudios etnográficos, entre otros
Explicativos	Busca conocer las causas que originan un fenómeno. Llega a generalizaciones extensibles más allá de los sujetos analizados. Se basa en obtener muestras representativas de los sujetos, usa diseños experimentales para el control del experimento y el análisis de datos
Predictivos	Se basa en datos anteriores y en técnicas específicas como regresión múltiple, procesos etnográficos, procesos estocásticos, simulación o análisis causal
<i>Tipo</i>	<i>Característica</i>
	<i>Por el grado de extracción de la realidad</i>
Físicos	Aparatos biomédicos y cabinas espaciales.
Escala	Prototipo de la célula y del sistema solar.
Analógicos	Se representa la propiedad del objeto real por una sustituida, que se comporta de manera similar; se usa en entrenamientos y ayuda para la instrucción.
Interactivos	Escenarios predefinidos y juegos
Entradas y salidas	Simulación de mercados y sistemas de procesos estocásticos.
Lógicos	Se basa en la formulación de hipótesis, puede expresarse en forma de enunciado condicional entre dos proposiciones, que pueden o no ser válidas.
Matemáticos	Se basa en formulas funcionales para explicar los fenómenos del mundo real, es el modelo de mayor abstracción.

La próxima generación de modelos de cultivos basados en genes ofrece el potencial de predecir el desarrollo vegetativo y reproductivo de los cultivos a partir del genotipo y los datos meteorológicos como insumos (Hwang y col., 2017). Por ejemplo, algunos modelos de cultivo, incluyendo WOFOST (van Diepen y col., 1989 ; van Ittersum y col., 2003), DSSAT (Jones y col., 2003) APSIM (McCown y col., 1996; Keating y col., 2003), AquaCrop (Kheng y col., 2009; Raes y col., 2009; Steduto y col., 2009; Vanuytrecht y col., 2014; Foster y col 2017) y EPIC (Jones y col., 1991) simulan el crecimiento de los cultivos y los procesos de desarrollo utilizando el carbono y el agua como las principales fuerzas impulsoras. Otra clase de modelos simula procesos biogeoquímicos como los ciclos acoplados de agua, carbono, nitrógeno y fósforo (Huang y col., 2017).

Los modelos de sistemas agrícolas son herramientas útiles para comprender interacciones complejas del sistema. Algunos modelos han sido probados en África para evaluar la producción de cultivos bajo una amplia gama de gestión de sistemas (Kamali y col., 2018).. Autores como Candelaria y col., (2011) refieren al trabajo realizado por De Souza y González

(2001) y proponen distintos tipos de modelos en función de la finalidad para la cual son diseñados como se muestra en la Tabla 2.

1.9.3. MODELOS DE RENDIMIENTO EN MAÍZ

En todo el mundo, el maíz (*Zea mays* L.) es un cultivo transcendental. A pesar de esta importancia, hay una falta de modelos publicados y ampliamente aceptados de crecimiento y desarrollo de maíz que pueden usarse para predecir o interpretar respuestas del maíz a condiciones ambientales o a la gestión (Reid, 2017).

El CERES-maize es un modelo ampliamente utilizado para simular la fisiología y los rendimientos del maíz utilizando datos meteorológicos generados por el modelo de cambio climático ECHAM5. Así mismo CERES-Maize es utilizado para el cálculo de la acumulación diaria de materia seca en función de sus relaciones con el uso diario de radiación. En este modelo la interceptación de la luz se calcula como una función de la población de plantas teniendo también en cuenta el espaciado entre filas, el índice de área foliar y la producción de materia seca que se convierte en producción alcanzable utilizando el estrés como índices de agua, nitrógeno, temperatura y concentración atmosférica de CO₂ (Dokoohaki y col., 2016). La capacidad del modelo CERES-maíz para estimar las fluctuaciones anuales en la producción de maíz se probó durante los años 1982-1985. El modelo se validó para 51 estaciones meteorológicas en los 14 estados del cinturón de maíz, que representan el 85% de la producción de maíz de los EE. UU. CERES-Maíz fue calibrado para la región derivando coeficientes varietales para cada estación en base a los datos mínimos de la etapa de crecimiento y los rendimientos para la temporada de 1982 (Hodges y col., 1987). Además, en la zona del cinturón de maíz de los Estados Unidos también se utiliza el modelo de Clima Integrado de Política Ambiental (EPIC) para estimar el impacto del cambio climático para 2015-2099 sobre la producción de maíz con datos reducidos de ocho modelos de circulación atmosférica oceánica-atmosférica (AOGCM), con tres rutas de emisiones que reflejan escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero bajos, medianos y altos (Bhattarai y col., 2017).

El modelo de maíz APSIM demostró también ser capaz de generar predicciones de producción de grano de maíz y biomasa bastante precisas bajo condiciones de riego en una región semiárida (Magaia y col., 2017).

El modelo AquaCrop se usó para simular el crecimiento del maíz y el contenido de agua del suelo bajo irrigación completa y deficitaria. Los resultados demostraron que es una herramienta útil para la toma de decisiones en la investigación de los riegos deficitarios y el crecimiento del maíz en la región. Se sugiere que AquaCrop se beneficiaría de incluir algunos parámetros de calibración sobre el patrón de distribución de la raíz en el suelo porque es un modelo impulsado por agua y depende en gran medida de la captación de agua simulada con precisión desde el perfil del suelo (Ahmadi y col., 2015).

Los modelos anteriormente descritos para maíz se caracterizan por ser modelos que únicamente pueden ser utilizados en sistemas agrícolas tradicionales. Sin embargo, en el contexto actual de cambio climático es necesario desarrollar modelos que puedan ser utilizados en sistemas sostenibles adaptados al cambio climático como son los sistemas agroforestales en los que un componente leñoso (árbol o arbusto) es combinado con la producción agrícola en la misma unidad de superficie (Mosquera-Losada y col. 2018). En este contexto, el modelo Yield-SAFE es un modelo biofísico para predecir la producción a largo plazo de sistemas agrícolas, forestales y también sistemas agroforestales teniendo en cuenta la disponibilidad diaria de luz y agua para las plantas (Figura 7) (van der Werf 2007). Además, en Europa, el modelo Yield-SAFE está vinculado a la herramienta CliPick

(<http://home.isa.utl.pt/~joaopalma/projects/agforward/clipick/>) que se basa en los escenarios climáticos propuestos por el International Panel on Climate Change (IPCC) lo que permite simular con el Yield-SAFE la producción de sistemas agrícolas, forestales y agroforestales en diferentes escenarios de cambio climático. El modelo Yield-SAFE ya está calibrado y validado para diferentes especies de árboles y cultivos en Europa (Palma y col. 2007; Graves y col 2007; Palma y col 2017). Sin embargo, es necesario calibrar y validar el modelo para el mayor número posible de especies de árboles y cultivos en todo el mundo para que el modelo Yield-SAFE sea utilizado a nivel global como una importante herramienta de gestión que tiene en cuenta el uso de los recursos y el cambio climático. Es por ello que en esta tesis el modelo Yield-SAFE será calibrado y validado para la producción de maíz grano en Ecuador.

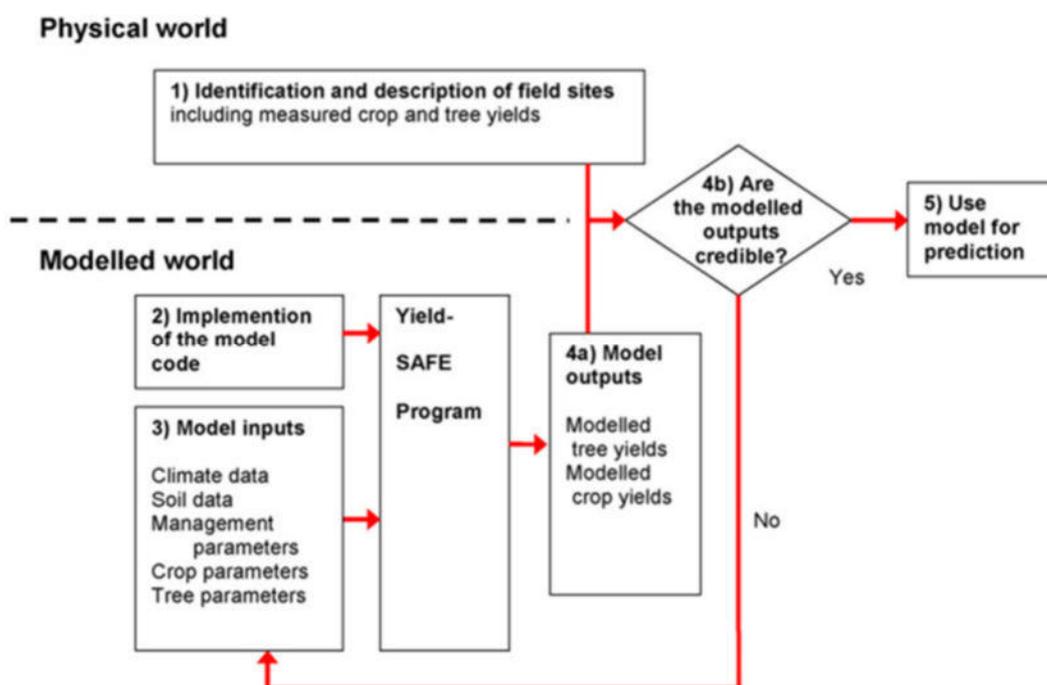


Figura 7 Esquema del proceso de modelación con el modelo Yield-SAFE (Graves y col 2010).

2. OBJETIVOS

Objetivo General

- Evaluar y modelizar la época de siembra y el empleo de dos variedades de maíz complementadas o no con leguminosa sobre el rendimiento y calidad del maíz y la leguminosa y el impacto en el suelo.

Objetivos específicos

- Evaluar el impacto de las diferentes épocas de siembra, variedad de maíz, empleo de leguminosas sobre el pH, contenido en materia orgánica, la disponibilidad de fósforo y la capacidad de intercambio catiónico en el suelo
- Evaluar el impacto de las diferentes épocas de siembra, variedad de maíz, empleo de leguminosas sobre la producción de biomasa y grano en maíz y frijol
- Calibrar y validar el modelo Yield-SAFE para la producción de biomasa de maíz grano en Ecuador

3.MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1.1.LOCALIZACIÓN DEL ENSAYO

La presente investigación se realizó en el campus de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Ibarra en la provincia de Imbabura a una latitud de 00°21'08" Norte y a una longitud de 78°06'26"Oeste, a 2221 msnm, localizada en la provincia de Imbabura (Figura 8). Tanto la fase de campo como la de laboratorio se realizaron entre los años 2015 y 2017.

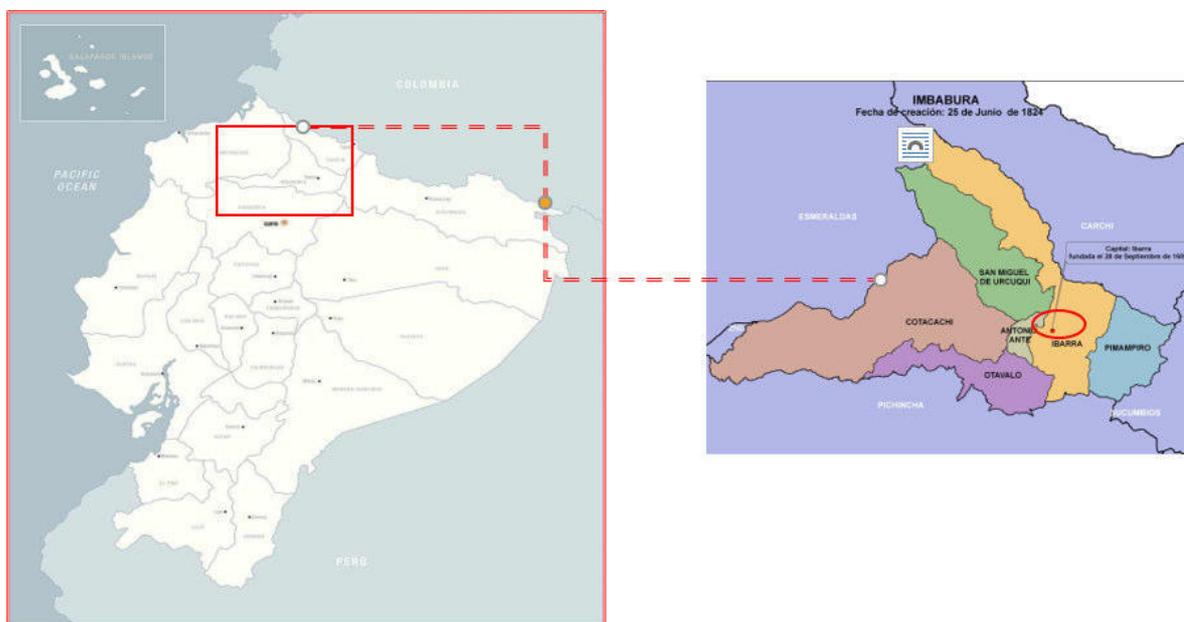


Figura 8 Ubicación de la zona de Estudio de la provincia de Imbabura en Ecuador

La provincia de Imbabura se encuentra localizada en la sierra norte del Ecuador (Figura 8), con una extensión de 4.619 km², representa apenas el 1,63% del territorio ecuatoriano. Su altitud fluctúa entre los 200 msnm (sector las Golondrinas cantón Cotacachi), hasta los 4.939 msnm en la cima del volcán Cotacachi (Prefectura de Imbabura, 2015)

Por su parte el cantón Ibarra, lugar donde se desarrolla el experimento, es la capital de la Provincia de Imbabura, tomando como referencia el centro de la ciudad (GAD-I, 2015). La temperatura promedio anual es de 15,9°C, registrándose valores máximos de 25°C y mínimos de 7°C. La velocidad del viento se encuentra entre los 3,5 a 7 m s⁻¹. La precipitación puede variar entre los 550 mm a los 1400 mm (Recalde, 2016). La elevación sobre la superficie del mar esta entre los 2204 a 2220 m.

3.1.2. GEOLOGÍA

La zona de Ibarra se encuentra localizada en una formación de tipo volcánico del Angochagua (Pl_{An}), de época del Plioceno (entre y 5 millones de años AC), y volcánico Imbabura (Pl_m) de época del Pleistoceno, con predominio de arcillas (Figura 9). Los suelos del área experimental pertenecen al complejo erosionado Angochagua, en las que afloran, lavas, tobas, areniscas, brechas y conglomerados volcánicos. Las lavas con andesitas pirogénicas en las que predomina el color gris oscuro. Las tobas y areniscas presentan colores crema o amarillento, las brechas presentan cantos formados por lavas de color gris. Los conglomerados se presentan de manera escasa y están formados por cantos de lava de color verde (D.G.G.M., 1980)

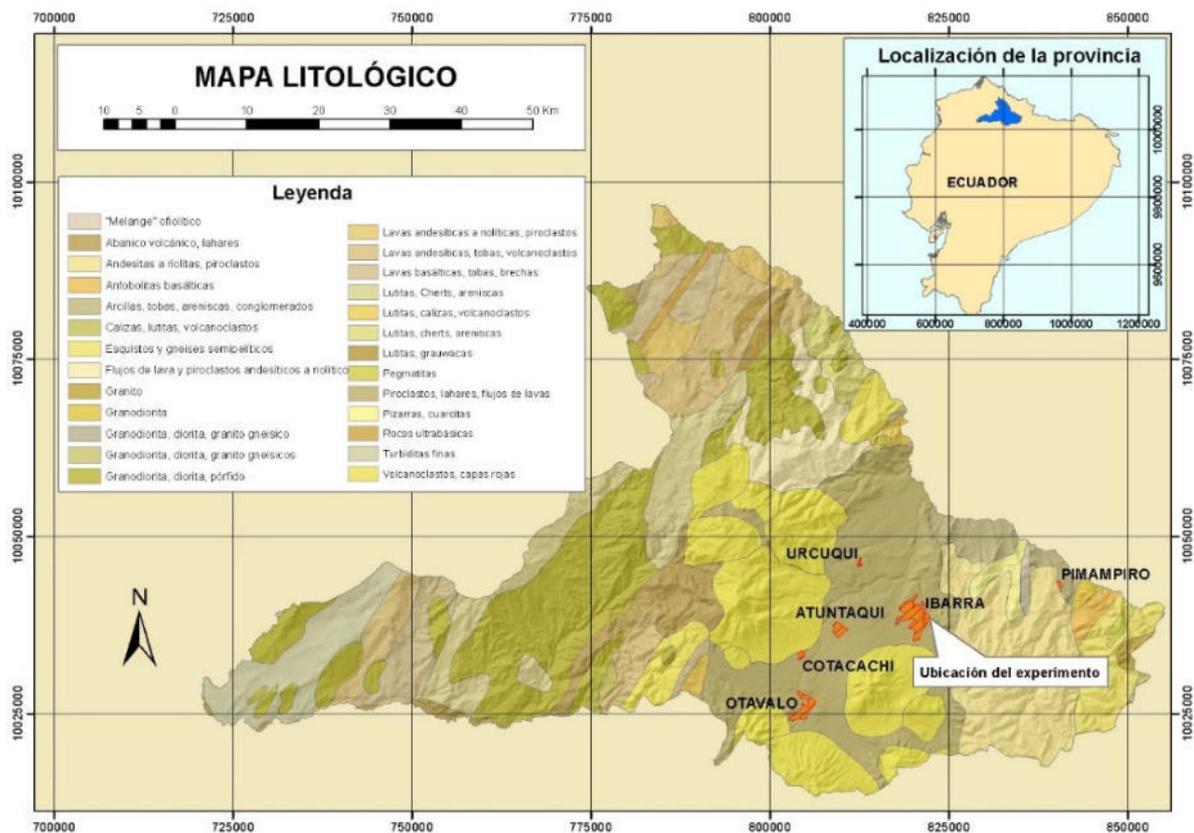


Figura 9 Mapa Litológico de la provincia de Imbabura en Ecuador

3.1.3. SUELOS

En Imbabura, se han identificado tres tipos de suelos:

Entisoles con menos del 30% de fragmentos rocosos, horizonte superficial claro, poco espesor y pobre en materia orgánica, son suelos jóvenes con escasa o nula diferenciación de horizontes. Este tipo de suelo está presente fundamentalmente en la parte norte de la provincia, en las parroquias rurales de Chugá, Ambuquí, Salinas, La Carolina, González Suarez.

Inceptisoles son suelos de las regiones sub húmedas y húmedas sin desarrollo de caracteres de otros órdenes, con horizontes alterados y pérdida de bases, hierro y aluminio, y considerables

reservas de minerales meteorizables. Su horizonte superficial es pobre en materia orgánica, estos suelos están presentes en gran parte del territorio, sobre todo en la zona oeste de la provincia en los cantones de Pimampiro, Otavalo, Urcuquí, Cotacachi, Ibarra (La Carolina, Lita) y en las faldas del Volcán Taita Imbabura.

Mollisoles son de color oscuro que se han formado a partir de sedimentos minerales, presentes en climas templados, húmedos, semiáridos, y fríos, con buena descomposición de la materia orgánica. La cobertura vegetal está integrada fundamentalmente por gramíneas; su estructura granular facilita el movimiento de agua y aire; el catión calcio es el dominante en el complejo de cambio, que favorece la fluctuación de los coloides. Son suelos productivos de alta fertilidad con buena producción de biomasa y humificación del suelo. Los cultivos sembrados generan rendimientos muy altos sin aplicación de fertilizantes. Este tipo de suelo está presente en zonas representativas de las parroquias San Francisco de Sigspamba, Mariano Acosta, Pimampiro, Ambuquí, La Esperanza, Angochagua, Chaltura, Imbaya, Imantag, Cahuasquí (Prefectura de Imbabura, 2015). La presente investigación está ubicada en suelos de tipo Mollisol tal y como se aprecia en la Figura 10.



Figura 10 Mapa Taxonomía de suelos de la provincia de Imbabura en Ecuador

La textura del suelo en el sitio donde se realizó la investigación es franco arcilloso. Los niveles de pH en agua estuvieron comprendidos entre 6,8 y 8,3 lo que nos indica que son unos pHs entre; neutros ($6,5 < \text{pH} < 7,5$) y fuertemente básicos ($8 < \text{pH} < 8,5$) (FAO, 1995; Navarro y Navarro, 2013). La conductividad eléctrica con valores que van de 0,042 a 0,05 mS m^{-1} con características de no salino. El contenido de materia orgánica es bajo al ser inferior al 1%, con un valor mínimo del 0,5% y máximo de 1,09% (Navarro y Navarro, 2013). En cuanto a los

nutrientes, el análisis inicial de suelo reveló que el contenido de nitrógeno total se encuentra con un valor mínimo de 0,11 y máximo 0,14 y de acuerdo a los valores de interpretación son suelos cultivados que no son suficientemente ricos en este elemento (Fernández y col., 2006; Navarro y Navarro, 2013). Para el caso del fósforo disponible (Olsen) los valores varían entre 18,32 mg kg⁻¹ a 27,38 mg kg⁻¹ que de acuerdo a la interpretación se encuentran entre valores adecuados y altos. Por su parte el potasio presenta valores entre 160,85 a 215,93 mg kg⁻¹, que se encuentran en el rango bajo (Barber y col., 1995; Navarro y Navarro, 2013). El elemento calcio total se presenta en el suelo entre valores de 714,32 mg kg⁻¹ a 1403,86 mg kg⁻¹ en rango que van de bajo a adecuado, por ser inferior al 1%, nos encontramos con un suelo no calcáreo altamente evolucionado (Barber 1995; Navarro y Navarro, 2013). En cuanto al contenido inicial de magnesio se presenta un valor mínimo de 71,16 y máximo de 107,75 mg kg⁻¹ que se encuentra en el orden del valor habitual (Navarro y Navarro, 2013) Finalmente el contenido de sodio en el suelo va entre 40,41 mg kg⁻¹ a 46, 83 mg kg⁻¹ que son considerados como bajos (McKean, 1993; Navarro y Navarro, 2013).

3.1.4. USO DE SUELO

De una manera general, el suelo en la provincia de Imbabura, se aprovecha para la producción de cultivos como la papa, las hortalizas, y los pastizales (cultivados o naturales). El suelo donde se desarrolla el experimento es de cultivos (Figura 11)



Figura 11 Mapa General de uso y cobertura de suelo de la provincia de Imbabura en Ecuador.

Por su parte la Prefectura de Imbabura (2015) establece los siguientes usos de suelo en la provincia de Imbabura y su porcentaje con respecto a la superficie ocupada de acuerdo a los datos recogidos en el 2013 (Tabla 4)

Tabla 4 Cobertura de suelo en la provincia de Imbabura

Tipo de cobertura	Área (ha)	%
Bosque nativo	144469,78	31,28
Mosaico agropecuario	89241,96	19,32
Páramo	61792,30	13,38
Cultivo anual	47772,38	10,34
Vegetación arbustiva	46495,73	10,07
Pastizal	45468,45	9,84
Cultivo semi-permanente	11306,10	2,45
Cultivado permanente	4244,85	0,92
Área poblada	3265,18	0,71
Otras tierras agrícolas	2798,36	0,61
Natural	2614,52	0,57
Plantación forestal	1850,55	0,40
Área sin cobertura vegetal	351,45	0,08
Infraestructura	231,33	0,05
Total	461902,94	100,00

3.1.5. HIDROGRAFÍA

La provincia de Imbabura cuenta con una abundante provisión de agua, ya que dispone de 13 cuencas hidrográficas, que contribuyen al desarrollo de las actividades productivas provinciales. En la Figura 12, se puede apreciar la distribución de los recursos hídricos de la provincia. Las principales cuencas hidrográficas, y que mayor relación tienen con las actividades agropecuarias son la cuenca lacustre del Rio Ambi, que nace en el lago Imbakucha (San Pablo), la cuenca del rio Mira en donde se ubica la zona de estudio y que comparte con la provincia de Carchi y la cuenca del rio Guayllabamba que comparte con las provincias de Pichincha y Esmeraldas (Prefectura de Imbabura, 2015).



Figura 12 Mapa de subcuencas hidrográficas de la provincia de Imbabura en Ecuador

3.1.6. CLIMA

Los gráficos de áreas isotermas (Figura 13) resultan de la unión de puntos generados por el análisis de datos espacio temporales de la variable temperatura (Prefectura de Imbabura, 2015),

a partir de las diferentes estaciones meteorológicas presentes en la provincia de Imbabura, que han levantado las condiciones del tiempo atmosférico. Las isotermas de menor temperatura se alcanzan en los páramos del volcán Cotacachi con un valor de 4 a 6 °C, mientras que los valores más altos se presentan en la parte occidental de la provincia en el valle del río Intag con valores entre 22 a 24°C y en la cuenca media del río Mira en la parroquia de Lita con valores de 20 a 22 °C. En el sitio del experimento las variaciones de temperatura están en el orden de 14 a 16°C, según lo señalado por Recalde, 2016.

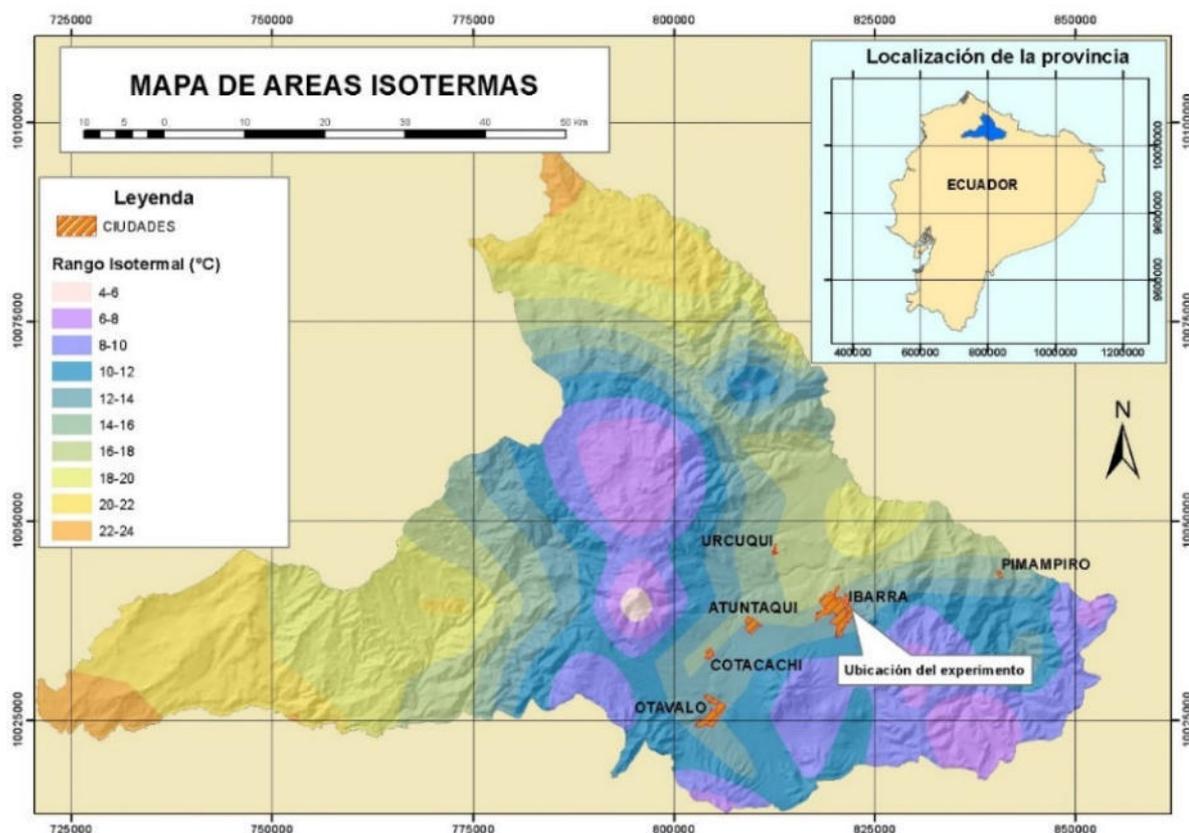


Figura 13 Mapa de isotermas de la provincia de Imbabura en Ecuador

La distribución de las precipitaciones en la provincia de Imbabura es irregular, debido a las variaciones climáticas producto de la cercanía de las montañas (Prefectura de Imbabura, 2015). El régimen de precipitaciones influye en el desarrollo de las actividades agrícolas y de los calendarios de siembra, con un rango de precipitaciones en el sitio del experimento en el orden de 500 a 750 mm año⁻¹ (Recalde, 2016) (Figura 14). La intensidad de lluvia en gran parte de la provincia se encuentra en el orden de 0 y 40 mm en 30 minutos (Figura 15). El caso contrario se puede observar en el valle del río Intag en el occidente de la provincia con valores de precipitación promedio van desde 3.000 a 4.000 mm año⁻¹ y una intensidad de lluvia de 40 a 60 mm en 30 minutos (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2018).

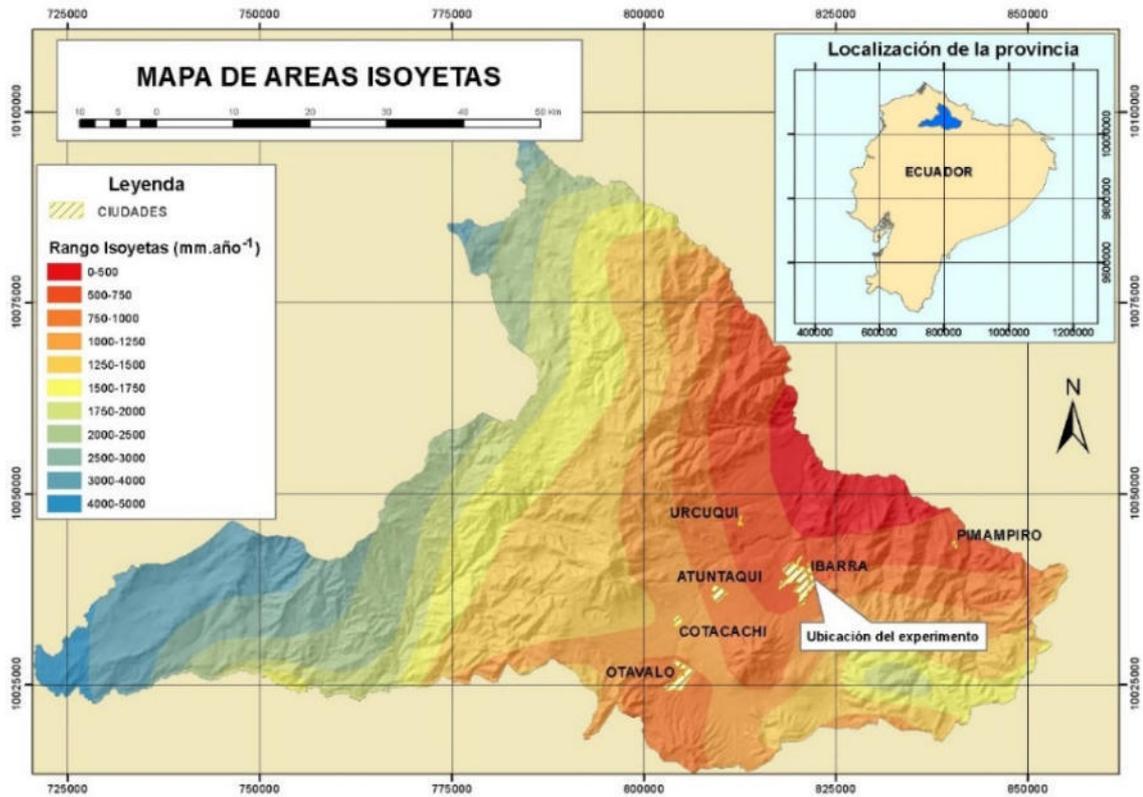


Figura 14 Mapa de isoyetas de la provincia de Imbabura en Ecuador



Figura 15 Mapa de intensidad de lluvia de la provincia de Imbabura en Ecuador

El déficit hídrico (Figura 16), presente en la provincia de Imbabura y en especial en la zona de estudio es del orden de 50 a 100 mm año⁻¹ (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2018). El mayor déficit se presenta en la cuenca media alta del río Mira en la parroquia de Ambuquí encontrándose entre 200 a 400 mm año⁻¹ (zona de estudio). Por el contrario, en la cuenca baja media del valle de Intag el déficit es del orden de 0 a 5 mm año⁻¹.

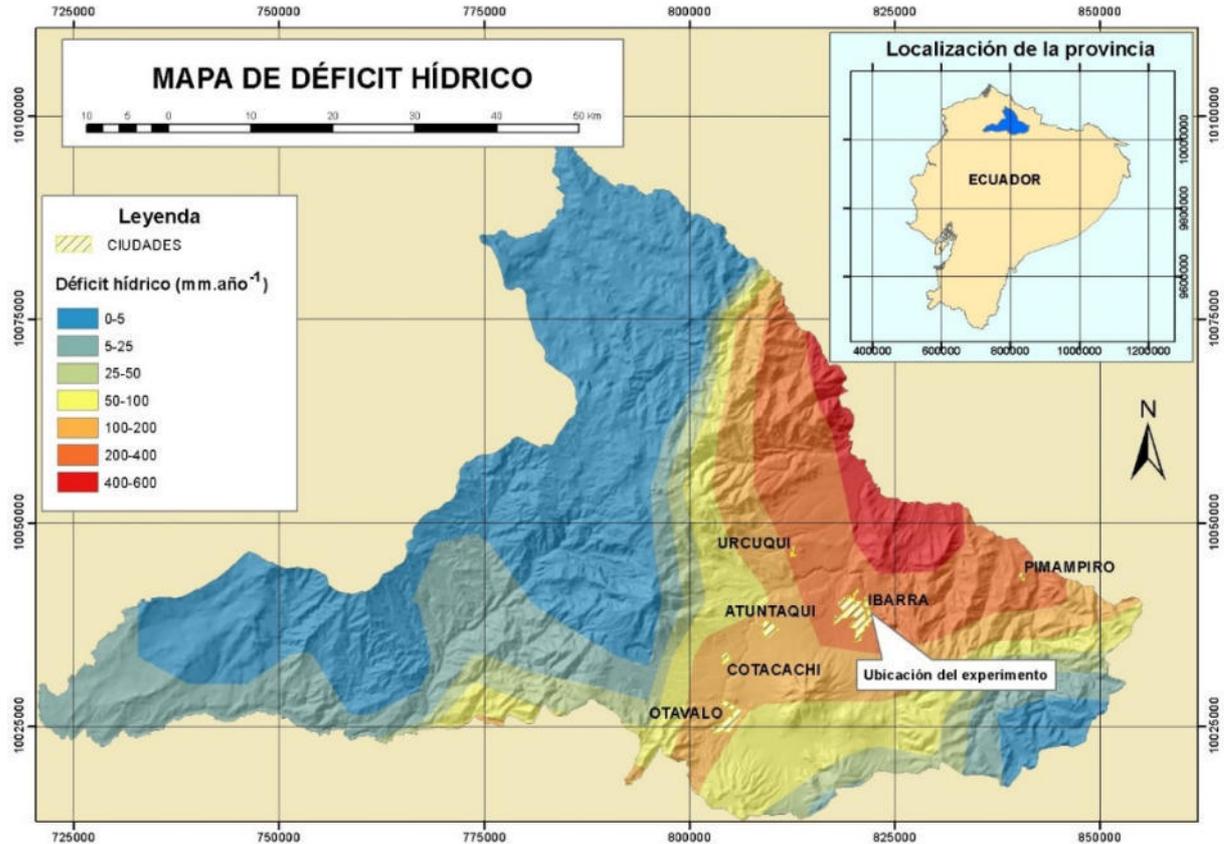


Figura 16 Mapa de déficit hídrico de la provincia de Imbabura en Ecuador

De acuerdo con el Ministerio de Agricultura y Ganadería (2018), el análisis de los datos espacio temporales establece que los meses secos para la ciudad de Ibarra son 5 que se corresponden al periodo comprendido entre los meses de junio a septiembre u octubre, y ocasionalmente el mes de diciembre (Figura 17). Los sitios más secos de la provincia corresponden a las zonas de la cuenca media alta del río Mira en el valle de Ambuquí con un periodo de 9 a 10 meses de sequía, siendo los meses lluviosos entre marzo y abril y ocasionalmente de febrero hasta abril. Por el contrario, la parte occidental de la provincia en el valle de Intag, ocasionalmente presenta un solo mes seco que se corresponde a diciembre.

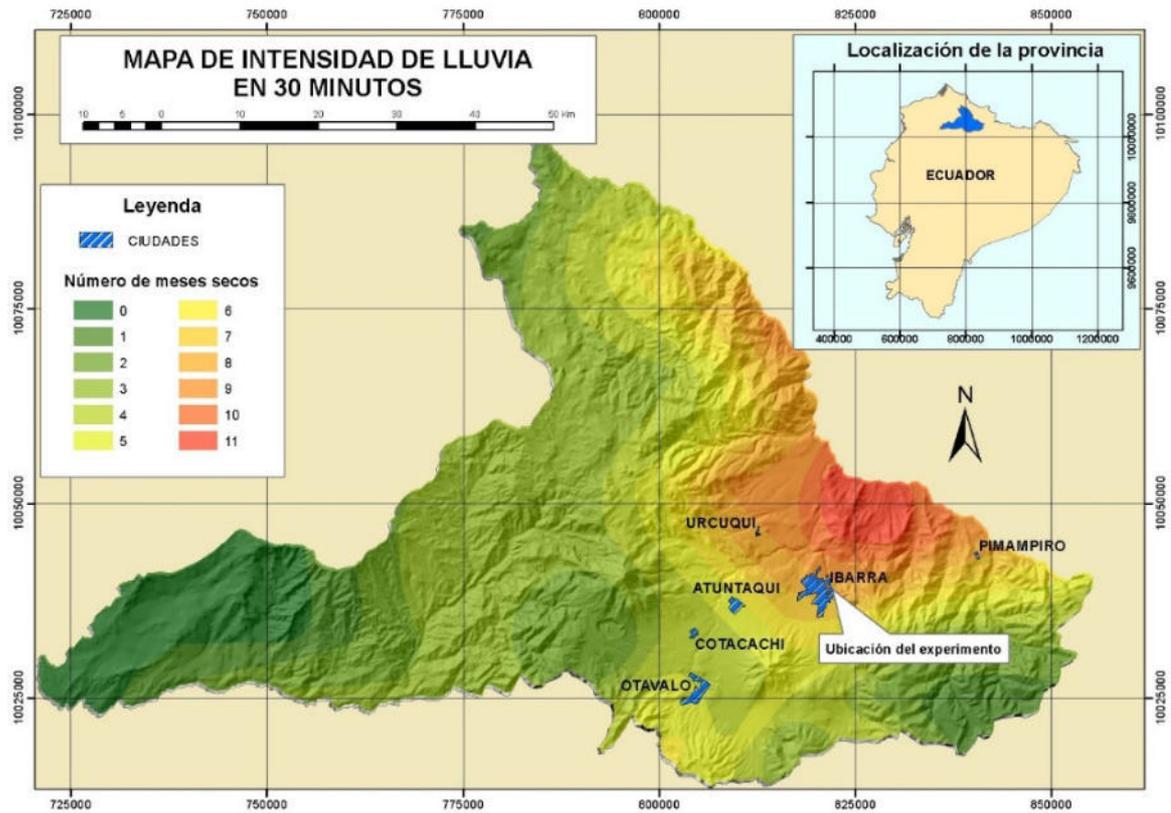


Figura 17 Mapa de meses secos de la provincia de Imbabura en Ecuador

La Figura 18 muestra el diagrama ombrotérmico de la zona de estudio de un período de 8 años. En ella se observa una distribución de temperatura estable en el tiempo y un período de sequía comprendido entre los meses de junio a septiembre.

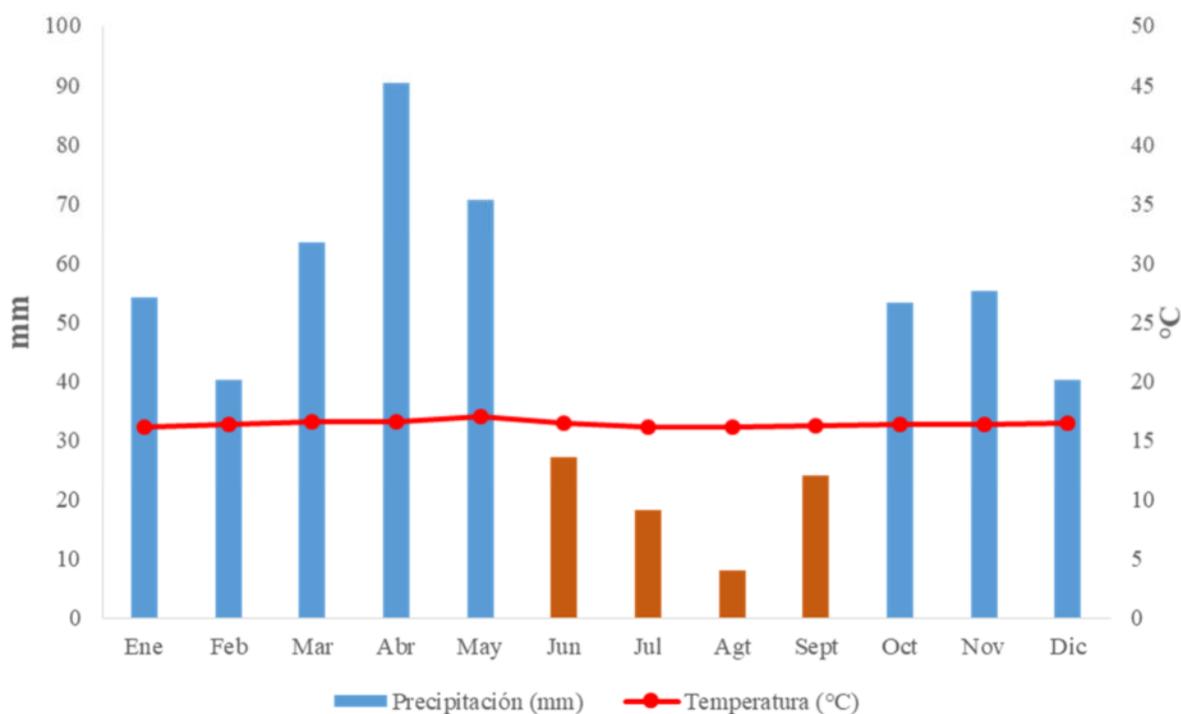


Figura 18 Diagrama ombrotérmico de la ciudad de Ibarra del periodo comprendido entre 2009-2017

3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

La presente investigación utilizó un diseño experimental de Bloques Completos al Azar en arreglo Factorial A x B con cuatro tratamientos y tres repeticiones. Los factores en estudio son: dos variedades de maíz (Chaucho (*Zea mays* INIAP 122) y Huandango (*Zea mays*)) y tipo de cultivo con y sin leguminosas (*Phaseolus vulgaris* Var. Canario voluble) sembradas en los meses de enero, abril, julio y septiembre (Tabla 5) en dos años y por tanto la cosecha fue en diferentes fechas.

Tabla 5 Descripción de los tratamientos

<i>Tratamiento</i>	<i>Simbología</i>	<i>Descripción</i>
T1	CHSL	Maíz Chaucho, sin leguminosa
T2	CHCL	Maíz Chaucho con leguminosa
T3	HUSL	Maíz Huandango, sin leguminosa
T4	HUCL	Maíz Huandango, con leguminosa

Las características de las 12 unidades experimentales se pueden ver en la Tabla 6. El maíz fue sembrado de forma manual, la distancia entre surcos de 0,8 m y entre plantas dentro de los surcos de 0,25 m. Los surcos para la siembra se trazaron con la ayuda de flexómetro, estacas, cordeles y escuadra, de acuerdo a las dimensiones establecidas en el diseño del experimento.

Tabla 6 Características de las Unidades Experimentales (Parcelas)

Largo de la parcela	6 m
Ancho de la parcela	4 m
Área de la unidad experimental	24 m ²
Área del bloque	96 m ²
Área total por ensayo por época	320 m ²
Área total del ensayo 4 épocas	1360m ²
Plantas por parcela total	120
Plantas en parcela neta	72

La siembra del ensayo se realizó en diferentes fechas, las mismas que coinciden con los periodos secos y lluviosos en los años 2015 y 2016. La siembra y la toma de datos de las variables se realizaron de acuerdo a la Tabla 7.

Tabla 7 Epocas de siembra y cosecha de maíz

Año	Fecha de siembra	Épocas de siembra	Fecha de cosecha
2015	06/01/2015	1	1/07/2015
	08/04/2015	2	30/09/2015
	01/07/2015	3	16/12/2015
	07/10/2015	4	30/03/2016
2016	07/01/2016	5	30/06/2016
	06/04/2016	6	28/09/2016
	06/07/2016	7	28/12/2016
	21/10/2016	8	12/04/2017

3.3. MANEJO ESPECÍFICO DEL EXPERIMENTO

3.3.1. PREPARACIÓN DEL TERRENO

Al inicio del experimento el suelo de todo el ensayo se laboreó antes de cada siembra en cada unidad experimental. La preparación del terreno fue utilizando maquinaria agrícola, con un pase de arado de discos, a una profundidad de 0,30 m. Posteriormente el suelo se niveló con una grada de 18 discos tipo “*row plow*”, hasta obtener terreno completamente mullido, tal y como se realiza habitualmente en la zona.

3.3.2. SIEMBRA

Para los procesos de división de parcelas se realizó considerando el área total del experimento y de cada una de las unidades experimentales, estableciéndose cada experimento en parcelas diferentes (Figura 19).

La siembra, se la realizó siguiendo el cronograma establecido, sembrando dos semillas por golpe, cada 0,25m en los surcos trazados (0,8m), para alcanzar una densidad teórica de 50 000 plantas ha⁻¹. Tras la emergencia se cuantificó el número de plantas germinadas y se procedió al raleo, dejando una sola planta por sitio.

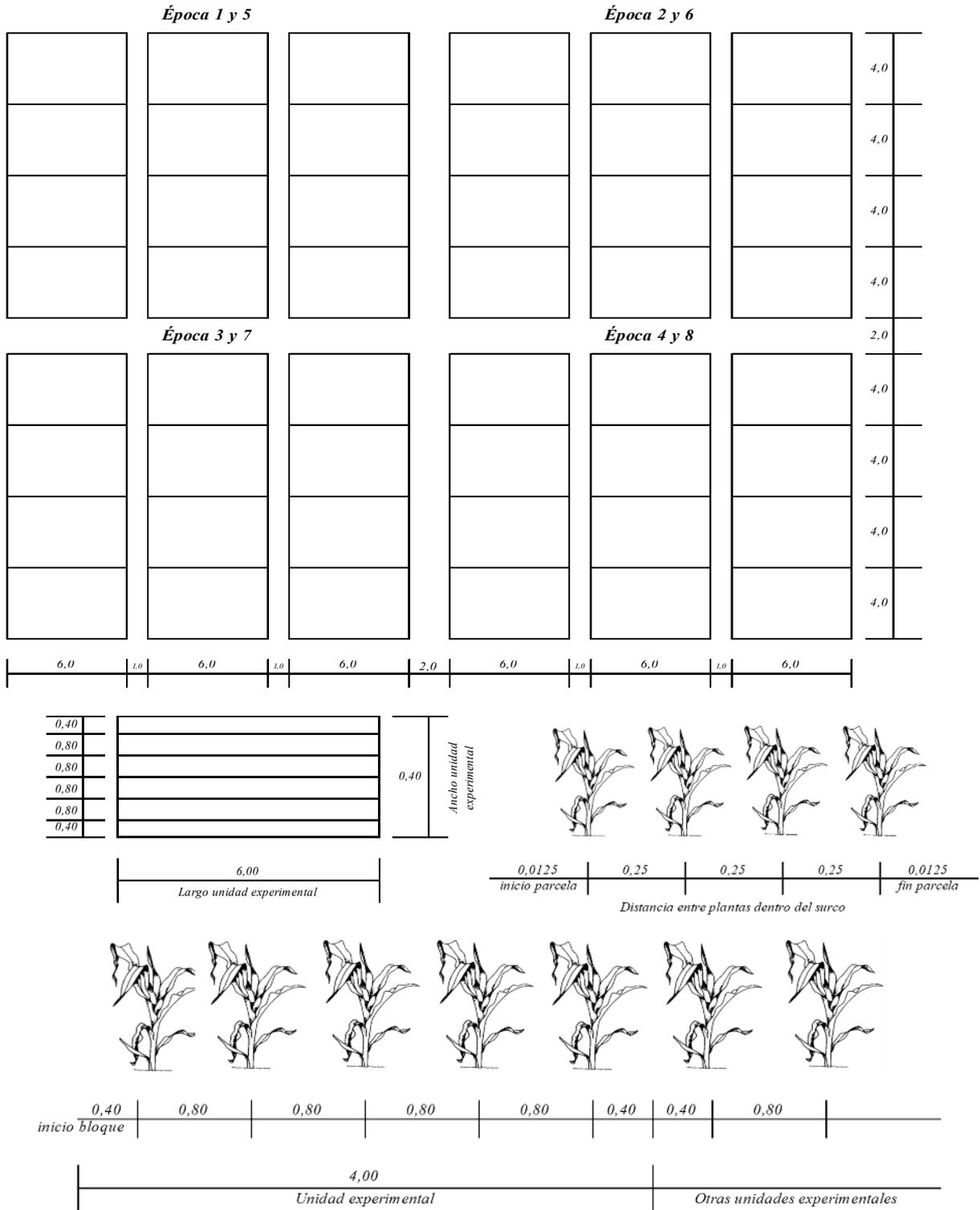


Figura 19 Diagrama de distribución de tratamientos, épocas de siembra y plantas en parcela. Época 1 y 5: enero 2015 y 2016; 2 y 6: abril 2015 y 2016; 3 y 7: julio 2015 y 2016; 4 y 8: octubre 2015 y 2016

3.3.3. FERTILIZACIÓN

La fertilización mineral se la realizó considerando los requerimientos nutricionales del maíz, establecidos por el International Plant Nutrition Institute (IPNI 2002) que relaciona la necesidad de nutrientes por parte del cultivo en función de la producción esperada (Tabla 8).

Tabla 8 Necesidad del cultivo por Mg de grano cosechado

<i>Nutriente</i>	<i>Necesidad kg Mg⁻¹ grano cosechado</i>	<i>Rendimiento 3800 kg ha⁻¹ grano cosechado</i>
Nitrógeno	22	83,6
Fósforo	4	15,2
Potasio	19	72,2
Calcio	3	11,4
Magnesio	3	11,4
Azufre	4	15,2

En la Tabla 9 se presentan los fertilizantes aplicados a las parcelas experimentales en las 8 épocas de siembra, considerando que las unidades experimentales que se asocia el maíz a una leguminosa como el frijol, no se realiza aplicación exógena de nitrógeno. La aplicación de la fertilización de fondo se hizo durante la siembra empleando como fuente de fertilizantes: Super fosfato triple, sulpomag y muriato de potasio, mientras que para la fertilización de cobertera que se realiza a los 65 días después de la siembra se aplicó urea, nitrato de calcio y nitrato de magnesio en dosis descritas en la Tabla 9, este fraccionamiento se realiza con el propósito de ajustar la dosis de nitrógeno para un mejor desarrollo de la planta en función de la necesidad en el proceso de crecimiento.

Tabla 9 Necesidades de fertilizantes a las parcelas experimentales.

<i>Tipo de fertilizante</i>	<i>Fórmula fertilizante</i>	<i>Necesidad de fertilizante kg ha⁻¹ (para cosecha 3800 kg de grano)</i>	<i>Necesidad</i>	
			<i>Unidad experimental g 24 m⁻² sin legumbre</i>	<i>Unidad experimental g 24 m⁻² con legumbre</i>
<i>Super fosfato triple</i>	00-46-00	33,00	79,20	79,20
<i>Muriato de potasio</i>	00-00-60	95,00	228,00	228,00
<i>Urea</i>	46-00-00	161,25	387,00	-
<i>Nitrato de calcio</i>	16%N-26% Ca	42,25	101,40	101,40
<i>Nitrato de magnesio</i>	11%N-16%Mg	24,10	57,60	57,60



En este ensayo el riego se realizó mediante aspersión, y de acuerdo a la programación establecida (Tabla 10) utilizando el método de *Blaney-Cridle* (Fuentes y Garcia, 1999)

constituyendo el déficit hídrico un factor no limitante para el desarrollo del cultivo y en el rendimiento.

Tabla 10 Programación del riego de acuerdo al método Blaney-Cridle o de temperaturas

Épocas 1 y 5									
Fecha	Duración días	<i>Eto</i> <i>mm día⁻¹</i>	<i>Kc</i>	<i>Et</i> (cultivo) <i>mm día⁻¹</i>	Necesidades por periodo	Necesidades mensuales	Mes de riego	Días en mes	Necesidad diaria <i>mm</i>
De 1 a 30 enero	30	4,31	0,40	1,72	51,73				
De 31 de enero	1	4,31	0,80	3,45	3,45	55,18	Enero	31	1,78
De 1 febrero a 28 febrero	28	4,32	0,80	3,45	96,70	96,70	Febrero	28	3,45
De 1 marzo a 21 marzo	21	4,35	0,80	3,48	73,15				
De 22 marzo a 31 marzo	10	4,35	1,15	5,01	50,07	123,22	Marzo	31	3,97
De 1 abril a 30 abril	30	4,37	1,15	5,02	150,74	150,74	Abril	30	5,02
DE 1 mayo a 20 mayo	20	4,37	1,15	5,03	100,56				
De 21 mayo a 31 mayo	10	4,37	0,70	3,06	30,61	131,17	Mayo	31	4,23
De 1 de junio a 30 junio	30	4,33	0,70	3,03	90,89	90,89	Junio	30	3,03
Total por ciclo						647,90			
Épocas 2 y 6									
Fecha	Duración días	<i>Eto</i> <i>mm día⁻¹</i>	<i>Kc</i>	<i>Et</i> (cultivo) <i>mm día⁻¹</i>	Necesidades por periodo	Necesidades mensuales	Mes de riego	Días en mes	Necesidad diaria <i>mm</i>
De 1 abril a 30 abril	30	4,37	0,40	1,75	52,43	52,43	Abril	30	1,75
De 1 de mayo a 31 mayo	31	4,37	0,80	3,50	108,43	108,43	Mayo	31	3,50
De 1 de junio a 19 junio	19	4,33	0,80	3,46	65,79				
De 20 junio a 30 junio	10	4,33	1,15	4,98	49,77	115,56	Junio	30	3,85
De 1 julio a 31 julio	31	4,30	1,15	4,95	153,46	153,46	Julio	31	4,95
De 1 agosto a 19 agosto	19	4,30	1,15	4,94	93,86				
De 20 agosto a 31 agosto	11	4,30	0,70	3,01	33,08	126,93	Agosto	31	4,09
De 1 de septiembre a 28 septiembre	29	4,31	0,70	3,02	87,46	87,46	Septiembre	30	2,92
Total por ciclo						644,27			
Épocas 3 y 7									
Fecha	Duración días	<i>Eto</i> <i>mm día⁻¹</i>	<i>Kc</i>	<i>Et</i> (cultivo) <i>mm día⁻¹</i>	Necesidades por periodo	Necesidades mensuales	Mes de riego	Días en mes	Necesidad diaria <i>mm</i>
De 1 julio a 30 julio	30	4,30	0,40	1,72	51,65				
De 31 de julio	1	4,30	0,80	3,44	3,44	55,10	Julio	31	1,78
De 1 agosto a 31 agosto	31	4,30	0,80	3,44	106,53	106,53	Agosto	31	3,44
De 1 septiembre a 18 septiembre	18	4,31	0,80	3,45	62,04				
De 19 septiembre a 30 septiembre	11	4,31	1,15	4,95	54,50	116,55	Septiembre	30	3,88
De 1 de octubre a 31 octubre	31	4,36	1,15	5,01	155,34	155,34	Octubre	31	5,01
De 1 noviembre a 18 noviembre	18	4,38	1,15	5,03	90,59				
De 19 noviembre a 30 noviembre	12	4,38	0,70	3,06	36,76	127,35	Noviembre	30	4,24
De 1 diciembre a 28 diciembre	28	4,33	0,70	3,03	84,89	84,89	Diciembre	31	0,37
Total por ciclo						645,75			
Épocas 4 y 8									
Fecha	Duración días	<i>Eto</i> <i>mm día⁻¹</i>	<i>Kc</i>	<i>Et</i> (cultivo) <i>mm día⁻¹</i>	Necesidades por periodo	Necesidades mensuales	Mes de riego	Días en mes	Necesidad diaria <i>mm</i>
De 1 octubre a 30 octubre	30	4,36	0,40	1,74	52,29				
De 31 octubre	1	4,36	0,80	3,49	3,49	55,77	Octubre	31	1,80
De 1 noviembre a 30 noviembre	30	4,38	0,80	3,50	105,03	105,03	Noviembre	30	3,50
De 1 diciembre a 19 diciembre	19	4,33	0,80	3,46	65,83				
De 20 diciembre a 31 diciembre	11	4,33	1,15	4,98	54,79	120,62	Diciembre	31	3,89
De 1 enero a 31 enero	31	4,31	1,15	4,96	153,69	153,69	Enero	31	4,96
De 1 febrero a 18 febrero	18	4,32	1,15	4,96	89,36				
De 19 febrero a 28 febrero	10	4,32	0,70	3,02	30,22	119,58	Febrero	28	4,27
De 1 marzo a 30 marzo	30	4,35	0,70	3,05	91,44	91,44	Marzo	31	2,95
Total por ciclo						646,14			

3.3.5. ESCARDA

El control de malas hierbas se lo realizó a los 25 y 45 días tras la emergencia, de manera manual con el uso de herramienta (azada).

3.3.6. CONTROL FITOSANITARIO

El control fitosanitario del cultivo se realizó con el propósito de prevenir y eliminar plagas foliares de acuerdo al cronograma expuesto en la Tabla 11. Los productos y dosis aplicadas se realizaron de acuerdo a la fenología y monitoreo del cultivo, sin que la plaga supere en ningún caso los parámetros de umbral de daño económico.

Tabla 11 Principales plagas y enfermedades que afectan al cultivo de maíz en el Ecuador (Rogg 2000)

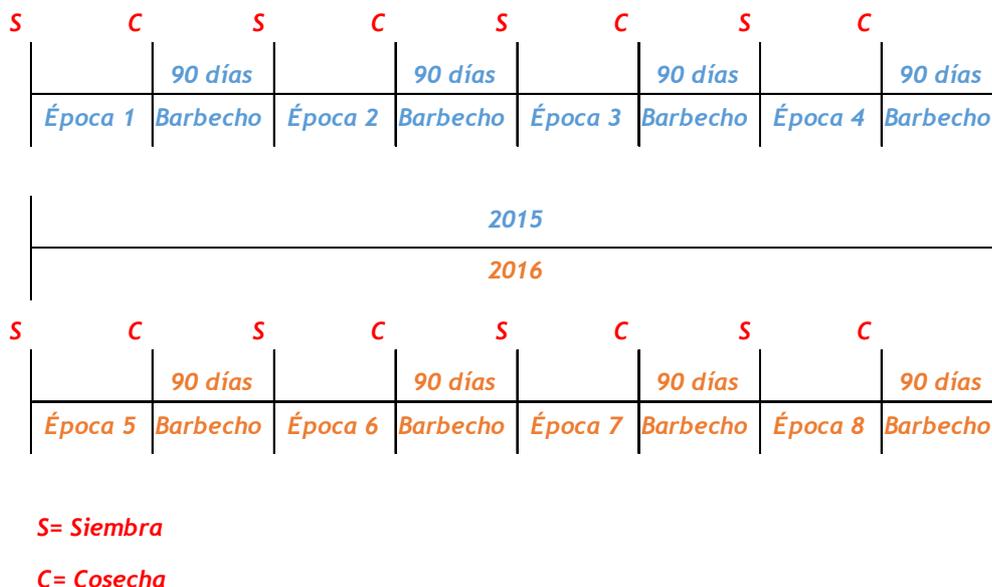
<i>Día</i>	<i>Insecto</i>	<i>Producto</i>	<i>Dosis</i>	<i>Enfermedad</i>	<i>Producto</i>	<i>Dosis</i>
8	Agrotis ypsilon Spodoptera frugiperda	Clorpirifos	0,5 l ha ⁻¹	Diplodia maidis	Azoxistrobina + Cyproconazol	0,5 l ha ⁻¹
25	Agrotis ypsilon Spodoptera frugiperda	Lambdacialotrina	0,25 l ha ⁻¹			
40	Rhopalosiphum maidis Agrotis ypsilon Spodoptera frugiperda	Lambdacialotrina	0,25 l ha ⁻¹	Cercospora zeamaidis Gladosporum herbarum Helminthosporium sp.	Propiconazol	0,4 l ha ⁻¹
80	Rhopalosiphum maidis Helicoverpa zea Spodoptera frugiperda	Imidacloprid	0,5 l ha ⁻¹	Cercospora zeamaidis Gladosporum herbarum Helminthosporium sp. Puccinia spp.	Azoxistrobina + Cyproconazol	0,5 l ha ⁻¹
120	Rhopalosiphum maidis Helicoverpa zea	Lambdacialotrina	0,25 l ha ⁻¹	Cercospora zeamaidis Gladosporum herbarum Helminthosporium sp. Puccinia spp.	Propiconazol	0,4 l ha ⁻¹

3.4. DETERMINACIONES EN CAMPO

3.4.1. MUESTREO EN SUELO

Se realizó un análisis de suelo antes de cada siembra y a los 90 días tras la incorporación del residuo de maíz en barbecho producto de la cosecha del maíz en cada una de las unidades experimentales.

Tabla 12 Diagrama del proceso de muestreo de suelos considerando la siembra y la cosecha en 4 épocas de producción de maíz año 2015 y 2016.



El muestreo del suelo para la determinación de los nutrientes antes de la siembra y a los 90 días de la incorporación de los residuos de la cosecha, se realizó de acuerdo a las fechas establecidas en la Tabla 13

Tabla 13 Fechas de muestreo del suelo antes de la siembra y a los 90 días de la incorporación de los residuos de la cosecha

<i>Siembra</i>	<i>Antes de la siembra</i>	<i>90 días después de la incorporación de los residuos de la cosecha</i>
1	17/12/2014	5/10/2015
2	30/3/2015	5/1/2016
3	22/6/2015	16/3/2016
4	30/9/2015	28/9/2016
5	14/12/2015	28/9/2016
6	28/3/2016	3/1/2017
7	28/6/2016	27/3/2017
8	28/9/2016	17/7/2017

El contenido de nutrientes del suelo en estudio se analizó en el laboratorio entre ocho y quince días antes de la siembra, se realizó con muestras extraídas en cada una de las unidades experimentales, aproximadamente tres meses después de la incorporación de la biomasa sobrante tras la cosecha, con el propósito de establecer el valor residual del cultivo como mejorante del suelo.

3.4.2. MUESTREO DE VEGETACIÓN

La biomasa de maíz se determinó mediante el producto de la densidad de plantas y la biomasa media por planta, tal y como se aprecia en la siguiente ecuación, Para ello, se contó el número de plantas antes de la cosecha en todas las unidades experimentales.

La cosecha, se realizó de acuerdo al estadio fenológico conforme se realiza de forma habitual en la zona, cortándose cada una de las parcelas netas de las unidades experimentales. Posteriormente se fraccionó en campo todas las plantas en biomasa verde y mazorca en maíz y granos producidos de frijol que fueron debidamente pesados en verde. Se tomó una submuestra de biomasa, mazorca y grano de frijol que, debidamente etiquetadas fueron conducidas al laboratorio para realizar la determinación en términos de materia seca y los consiguientes análisis bromatológicos.

3.5. DETERMINACIONES EN LABORATORIO

3.5.1. ANÁLISIS DE SUELO

El pH se midió en una suspensión suelo: agua (1:2), para lo cual se pesó 10 g de suelo seco al aire y tamizado a 2mm, se añadieron 20 ml de agua destilada, se agita la solución de suelo a intervalos de 5 minutos durante 30 minutos; posteriormente se procedió al registro del valor de pH al momento de la estabilización (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002), con uso de un potenciómetro marca HORIBA F-71G que dispone de un electrodo de vidrio sensible al H⁺ (McKean, 1993; Porta, 1999).

3.5.2. MATERIA ORGÁNICA

El contenido de materia orgánica de un suelo es determinado por el método de Walkley y Black, (1934), que se fundamenta en la digestión húmeda de la materia orgánica del suelo por medio de la oxidación con dicromato de potasio y ácido sulfúrico. El exceso de dicromato es valorado con sulfato ferroso (Cáceres, 2013). El cálculo para la determinación del contenido de materia orgánica presente en suelo emplea las siguientes fórmulas:

$\% M. O. = mlFeSO_4$ (muestra-blanco) x F

$$F = \frac{1N \times 12 \times 1,72 \times 100}{4000 \times 0,77 \times m} = 0,67$$

Donde:

$$\frac{12}{4000} = m \text{ Eq de C}$$

0,77 = se asume el 77% de la materia orgánica esta oxidada

1,72 = Factor de conversión de C a M.O. un 58% de M.O. es carbono

F = Factor de ajuste de la sal de Mohr

3.5.3. NITRÓGENO TOTAL

El nitrógeno es uno de los elementos importantes para el desarrollo de los vegetales, para su determinación se empleó el método de Micro-Kjeldahl modificado por Bremner (1965). El contenido total de nitrógeno del suelo se determinó por colorimetría con un auto-analizador TRAACS-800+, mediante el método n° US-786-86 A de Bran+Luebbe, después de una digestión microkjeldahl (Castro y col., 1990). Este método colorimétrico se basa en la

formación de salicilato amónico, que es de color verde esmeralda y se lee a 660 nm, a partir de amoníaco, salicilato sódico, sodionitroprusiano e hipoclorito en un medio alcalino tamponado a pH 12,9-13,1

3.5.4.FÓSFORO ASIMILABLE

La determinación de fósforo en la solución del suelo se realizó por el método de Olsen modificado de acuerdo con la norma NOM-021-RECNAT-2000 (Fernández y col., 2006). El fundamento del método es la extracción de las formas de fósforo fácilmente soluble, por la acción ácida. Una vez extraído el fósforo de la solución del suelo, este se procede a cuantificar por medio de espectrofotometría a longitud de onda de 640 nm. Previo a la lectura por espectrofotometro se debe construir una curva patrón. Finalmente, las lecturas de absorbancia sirven de base para el cálculo correspondiente utilizando, la ecuación de la recta: $y = mx + b$ para interpolar la concentración de la solución problema.

3.5.5.CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO

Se determinó la capacidad de intercambio catiónico equivalente por la suma de calcio, potasio, magnesio, sodio y aluminio (no detectable en estos suelos por carácter neturo). La extracción de cationes cambiables en la solución del suelo se realizó por medio de la extracción en acetato de amonio. Se construyeron patrones de las diferentes sales que contienen los cationes cambiables y se procedió a la lectura de la concentración en un espectrofotómetro de absorción atómica para calcio, aluminio y magnesio y por emisión para el caso de sodio y potasio (McKean, 1993).

3.5.6.ANÁLISIS DE PLANTA

3.5.7. RENDIMIENTO

Para la determinación del rendimiento alcanzado en cada una de las unidades experimentales, se procedió a realizar una prueba de humedad de biomasa y grano, para lo cual se utilizó un analizador de humedad MA 35 marca Sartorius ®. Con esos valores se calculó la cantidad de biomasa y grano generada en la unidad experimental y luego extrapolada a la unidad de producción agrícola (ha). Para esto se realizaron los siguientes cálculos.

$$\text{Rendimiento base húmeda} = \frac{\text{biomasa de planta o granos en parcela neta (kg)}}{\text{área de parcela neta (ha)}}$$



$$\text{Rendimiento materia seca} = \frac{\text{Rendimiento base húmeda kg ha}^{-1} \times (100 - \% \text{ humedad del grano o planta})}{100}$$

3.5.8. PESO DE 1000 GRANOS

Para esta determinación, se tomó una muestra del total de granos obtenidos de todas las plantas de la unidad experimental y se contaron 1000 granos de la totalidad de la masa de granos desprendida de las mazorcas. Luego se procedió a cuantificar la masa por medio de una balanza con precisión de 0,1 gramos.

3.5.9. PROTEÍNA

Para la determinación de proteína se utilizó el método Kjeldahl (Chang y Zhang, 2017), que consta de tres fases, la primera es la digestión de la muestra con ácido sulfúrico en presencia de un catalizador, para la conversión de todo el nitrógeno en sulfato de amonio, neutralizando el exceso de ácido y posterior destilación en ácido bórico. El borato formado se titula con ácido estandarizado, que se valora como el contenido de nitrógeno. Este contenido de nitrógeno dependiendo de la naturaleza de la muestra se multiplica por un factor para convertirlo en proteína; para el caso de forraje se multiplica por 6,25 (coeficiente general para los alimentos) (AOAC, 2002); y por 5.65 para maíz en grano (Chang y Zhang, 2017); bajo la siguiente relación.

$$\%N = NHCl \times \frac{\text{Volumen de ácido corregido}}{\text{g de muestra} \times 1000} \times \frac{14gN}{\text{mol}} \times \frac{100}{1000}$$

donde:

$NHCl$ = normalidad del HCl en moles/1000 mL

Volumen de ácido coregido = (mL de ácido estandarizado para la muestra)

- (mL ácido esntandarizado para el blanco)

14 = peso atómico del nitrógeno

factor de conversión:

$$\%proteína = \frac{\%N}{0.16} \text{ o}$$

$$\%proteína = \%N \times 6.25$$

3.6. PROCESADO Y ANÁLISIS DE DATOS

3.6.1. ANOVA

Para el procesamiento de los datos, se utilizó un matriz en Excel, la cual sirvió para el desarrollo de los respectivos análisis de varianza, tanto de cada una de las fechas de toma de datos, como para la realización del análisis combinatorio. El esquema del ANOVA para las *analíticas del suelo* se muestra en la Tabla 14. En caso de diferencias significativas se empleó el test LDS (Diferencias Mínima Significativa, por su acrónimo en inglés) al 5%.

Tabla 14 Esquema del ANOVA Analíticas del Suelo

<i>FV</i>	<i>GL</i>
Épocas	15
Tratamientos	3
Repeticiones	2
Sub-tratamientos	1
Fecha*tratamientos	45
Fecha*repetición	30
Fecha*sub-tratamiento	15
Tratamiento*repetición	6
Tratamiento*sub-tratamiento	3
Repetición*sub-tratamiento	2
Épocas*tratamiento*repetición	90
Épocas*repetición*sub-tratamiento	30
Tratamiento*repetición*sub-tratamiento	6

El esquema del ANOVA para el *crecimiento del cultivo* se muestra en la Tabla 15. Al presentarse diferencias significativas se empleó en test LDS al 5%.

Tabla 15 Esquema del ANOVA Crecimiento

<i>FV</i>	<i>GL</i>
Épocas	7
Muestreo	5
Tratamientos	3
Repeticiones	2
Épocas *muestreo	35
Épocas *tratamientos	21
Épocas *repeticiones	14
Muestreo*tratamiento	15
Muestreo*repetición	10
Tratamiento*repetición	6
Épocas *muestreo*tratamiento	105
Épocas *muestreo*repetición	70
Épocas *tratamiento*repetición	42
Muestreo*tratamiento*repetición	30

Para las variables de *producción de biomasa* el esquema del ANOVA de muestra en la tabla 16. Las diferencias significativas de las fuentes de variación fueron analizadas por el test LDS al 5%.

Tabla 16 Esquema del ANOVA Producción de Biomasa

<i>FV</i>	<i>GL</i>
Épocas	7
Muestreo	4
Tratamientos	3
Repeticiones	2
Épocas*muestreo	28
Épocas *tratamientos	21
Épocas *repeticiones	14
Muestreo*tratamiento	12
Muestreo*repetición	8
Tratamiento*repetición	6
Épocas *muestreo*tratamiento	84
Épocas *muestreo*repetición	56
Épocas *tratamiento*repetición	42
Muestreo*tratamiento*repetición	24

El esquema del ANOVA propuesto para la *producción de grano* se muestra en la Tabla 17. Las diferencias significativas fueron tratadas con el test LDS al 5%.

Tabla 17 Esquema del ANOVA Producción de grano

<i>FV</i>	<i>GL</i>
Épocas	7
Tratamientos	3
Repeticiones	2
Épocas *tratamientos	21
Épocas *repeticiones	14
Muestreo*repetición	6

3.6.2. MODELIZACIÓN

La producción de biomasa del maíz grano obtenida en las diferentes cosechas establecidas fue utilizada para calibrar y validar el modelo Yield-SAFE. Concretamente, el modelo Yield-SAFE fue calibrado con los datos de producción de biomasa del maíz grano de la variedad Chauncho obtenidos en las tres primeras cosechas del año 2015 y validado con los datos de producción de biomasa del maíz grano de la variedad Huandango también obtenidos en las tres primeras cosechas del mismo año. En las tres cosechas, la biomasa de maíz de las dos variedades fue estimada mensualmente en el campo, desde la siembra hasta la cosecha, para hacer un ajuste del modelo lo más preciso posible. En este estudio, el modelo Yield-SAFE fue calibrado y validado con los datos de producción obtenidos en el año 2015 por considerarse esos valores de producción como habituales en la zona.

La estimación inicial de los bioparámetros del modelo se basó en una revisión bibliográfica y en el conjunto de datos reales existentes con mediciones de diferentes parámetros fisiológicos del maíz. Los datos climáticos diarios (temperatura máxima y mínima, precipitación y radiación) se recogieron en una estación meteorológica cercana al área de estudio. El procedimiento de calibración del modelo Yield-SAFE se realizó asumiendo que la luz y la temperatura, pero no el agua, limitaban el crecimiento del maíz dentro del modelo ya que en este estudio el maíz se desarrolló bajo condiciones de riego. Además, sin condiciones que limitan la disponibilidad de agua, se espera un crecimiento potencial del cultivo lo que permite un ajuste más fino de los bioparámetros del modelo.

La calibración y validación del modelo se llevó a cabo mediante una implementación del modelo en MS Excel© que también permite una interpretación gráfica de los resultados (Graves y col. 2010).

4.RESULTADOS y DISCUSIÓN

4.1. SUELO

4.1.1.PH

Los resultados del ANOVA del pH en agua de suelo, se puede observar en la tabla I del Anexo I, revelan diferencias significativas para la interacción época x tratamientos ($p < 0,001$). La Figura 20 muestra unos pH prácticamente neutros de entre 6,9 y 7,1 ($6,5 < \text{pH} < 7,5$) (FAO 1995). Estos valores son mucho más elevados que los descrito por León-Tapia (2020) en distintos tipos de usos de suelo en Ecuador que no incluían el cultivo del maíz. Por tanto, las variaciones de pH son reducidas al no verse asociadas a un cambio de uso y por tratarse de un suelo rico en calcio debido a las aportaciones previas de este elemento.

En general se observa un marcado efecto del año en todos los períodos de muestreo, resultando presentar el segundo año un pH superior al primero en prácticamente todos los tratamientos, resultando esta tendencia significativa en todos los muestreos posteriores a la incorporación de residuos al suelo (90 días después de la cosecha) cuando se compara el año 2016 en comparación con el año 2015. Este aumento también se dio en el muestreo de antes de la siembra en la primera y tercera época del año 2016 con respecto al 2015. En general la tercera fecha de siembra presenta unos mayores niveles de pH en comparación con el resto de los períodos. Este aumento observado posterior a la cosecha se podría considerar como consecuencia de la incorporación del rastrojo en el suelo tras la cosecha que agrega calcio (Zebrowski y Sourdat, 1992), que es el mineral con mayor concentración en los restos vegetales.

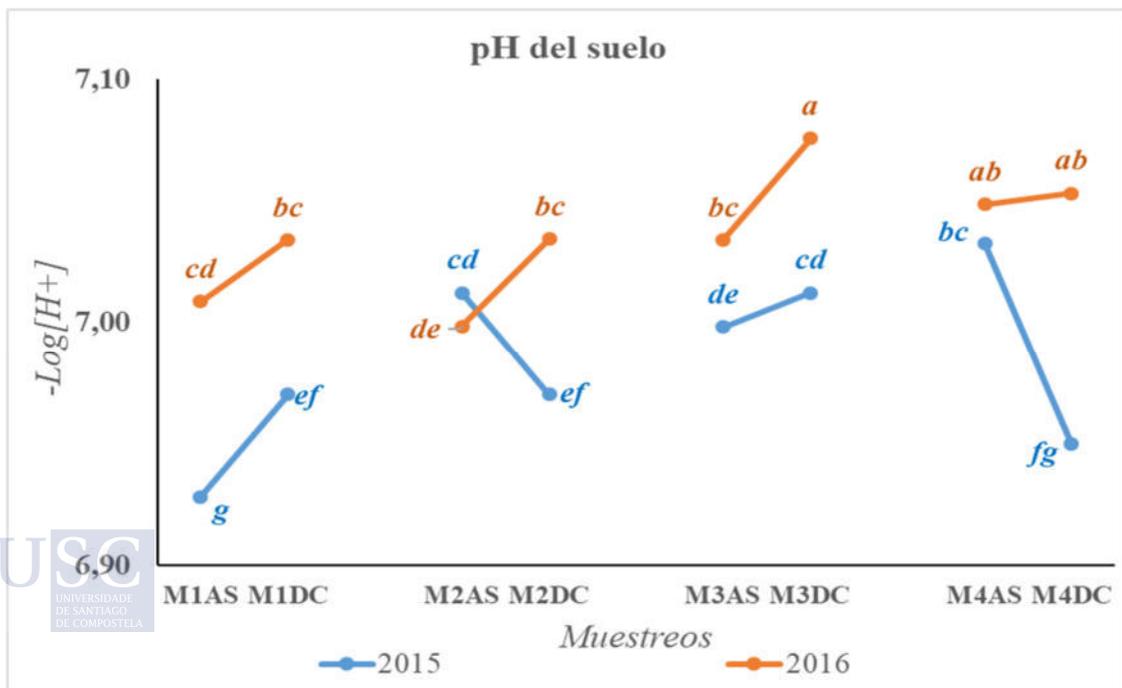


Figura 20 pH en suelo por tratamientos. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos por año. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestro antes de siembra; DC: muestreo 90 días después de la cosecha.

No se encontró un patrón claro del pH en agua en relación a los tratamientos de siembra aplicados (Figura 21) tal y como detalla (Ortiz, Escobar y Hue, 2008). El cultivar Chaucho sin leguminosa incrementó el pH del suelo tras la incorporación de restos en el año 2015 en el primer y segundo período de cultivo, al igual que en el cuarto período de cultivo en el 2016 tras la incorporación de los rastrojos en comparación a cuando fue sembrado con leguminosas. En el resto de los períodos no se encontraron diferencias significativas. En relación a la variedad Huandango se encuentra el mismo patrón en la cuarta época de siembra del 2016 tras la incorporación de los rastrojos, al igual que sucedía con la variedad Chaucho en la misma época. Sin embargo, el efecto contrario se encontró en el muestro de post-cosecha tras la incorporación de rastrojo en el primer y tercer período de cultivo del 2015 y del segundo período de cultivo del 2016, al igual que antes de la siembra en el tercer período de cultivo del 2016, cuando la siembra con leguminosas incrementa el pH en el suelo. La incorporación de rastrojos al suelo permite incrementar el nivel del calcio en el mismo, lo que parece favorecer las leves subidas de pH observadas. La presencia de la leguminosa favorece por una parte la incorporación de calcio y potasio a la misma, de la que es consumidora de lujo, pero también de nitrógeno al ser una especie fijadora de este elemento, lo que puede ocasionar un aumento de la mineralización que favorece la incorporación de nitrógeno en forma de amonio al suelo y su conversión a nitratos proporcionando protones al medio (Mosquera-Losada y col., 2011). La siembra de las variedades de maíz Chaucho sin leguminosa elevó el pH tras la cosecha en el muestreo de post-cosecha del primer y segundo período de cultivo del primer año en comparación con la siembra de Huandango, sin embargo, se observó el efecto contrario en el tercer período de cultivo del primer año, no detectándose diferencias significativas en el resto de los períodos de cultivo. Por el contrario, cuando se comparan las dos variedades de maíz las dos variedades de maíz sembradas con leguminosa encontramos que es Huandango la que eleva ligeramente el pH en comparación con Chaucho en la post-cosecha de los dos primeros períodos de cultivo del primer año.

El cultivo con leguminosas puede tener un doble efecto sobre el pH, por una parte, éste puede reducirse por ser las leguminosas unas especies consumidoras de lujo de cationes como el calcio o el potasio (Mosquera-Losada y González Rodríguez 1999). No obstante, estas incrementan el nivel de nitrógeno almacenado en el suelo, lo cual puede provocar un aumento de la producción de biomasa y por lo tanto el poder extractivo de cationes del suelo, que una vez incorporados podrían incrementar el pH en el mismo, tal y como sucede de forma general en este estudio (Nziguheba y col., 2005).

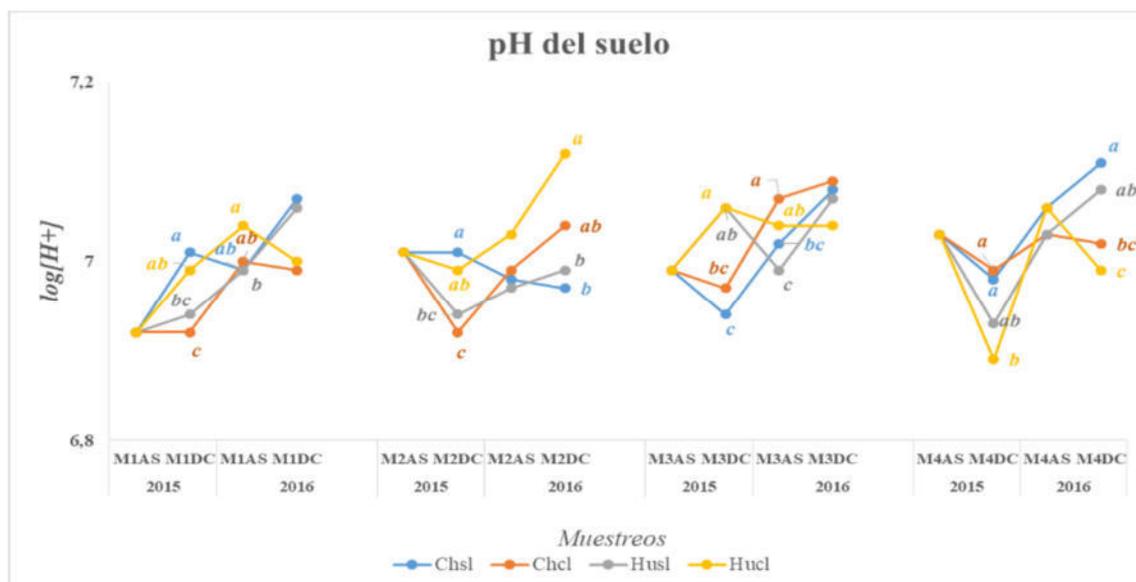


Figura 21 pH en suelo. Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestreo antes siembra; DC: muestreo 90 días tras cosecha. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa.

En estudios hechos en Queensland, Australia, se han informado cambios en las propiedades del suelo bajo diferentes sistemas de labranza y manejo del rastrojo en vertisoles (Saffignay col., 1989; Dalal y col., 1991). Sin embargo, hay poca información disponible sobre la contribución relativa del cultivo de rastrojos al pH del suelo en Ecuador. En este sentido algunos autores (Caires y col., 2002; Inagaki y col., 2017a; Purakayastha y col., 2019) observaron la influencia de algunas prácticas de manejo del suelo utilizando abono verde en sucesión con un incremento significativo del pH del suelo, atribuido a la cobertura vegetal con el retorno de sus residuos en la superficie del suelo. La reducción de pH puede deberse a que la materia orgánica contribuye a la acidez activa del suelo, mediante la ionización de grupos H^+ de ácidos carboxílicos, fenólicos y alcoholes terciarios (Souza y col., 2010). En general cuanto mayores sean los rendimientos se espera una mayor remoción de bases del suelo, tendiendo a reducir el pH (Souza y col., 2010), en especies como el maíz debido a su alta demanda nutricional en nitrógeno y potasio (De Oliveira y col., 2002). Las menores producciones observadas en chaucho sin leguminosa en comparación con las observadas con leguminosa en la cosecha del primer año podría justificar un mayor nivel de pH en el suelo en el período post-cosecha de 90 días posterior, al ser sistemas menos extractivos sin leguminosa al igual que sucede con Huandango en el último período de cultivo del primer año.

De lo inmediatamente expuesto se puede extraer que, al integrar los factores de época de cultivo y rastrojo en el suelo de cultivo, ambos pueden influir en el pH del suelo. El rastrojo en el suelo de cultivo, incrementa las aportaciones de calcio y por ende incrementa el pH del mismo, siendo este más acentuado para el segundo año. Respecto a los cultivos de las variedades Chaucho y Huandango sin leguminosa, parece que las mayores producciones de chaucho sin leguminosa ocasionaron un aumento del pH en el suelo probablemente asociado a una mayor incorporación del rastrojo. La presencia de leguminosa reduce el efecto de los tratamientos debido probablemente a que la incorporación de nitrógeno tiende a afectar de forma similar a los efectos del suelo de las dos variedades. La variedad Chauch tiende a modificar más el pH que la Huandango.

4.1.2. CARBONO

Los resultados del ANOVA del contenido del C en el suelo, se pueden observar en la Tabla I del Anexo I. El contenido de carbono en el suelo se vió significativamente afectado por la interacción período de cultivo x tratamiento ($p < 0,05$). En general, el nivel de carbono puede considerarse intermedio (Porta 1999) con niveles de materia orgánica por debajo de 1,5 en todo caso. Este hecho llama la atención por tratarse de una zona tropical con elevadas productividades de biomasa, el principal insumo de carbono en el suelo. Pero al tratarse de un suelo habitualmente fertilizado con abonos minerales y no con abonos orgánicos, se produce esta descapitalización del suelo. Estudios desarrollados en Ecuador que comparaban diferentes usos del territorio revelan que el mayor grado de antropización y usos del territorio agrícolas provocan una disminución clara del nivel de carbono en suelo (León-Tapia 2020). El contenido en carbono de un suelo depende de los insumos de biomasa aportados, lo resultados muestran claramente que la gestión del mismo con el empleo de técnicas de mecanización y fertilización son importantes a la hora de determinar la concentración de carbono en el suelo (Reijneveld y col., 2010). Dependiendo de la magnitud del flujo de carbono proporcionado por el subsistema vegetal, habrá mayor o menor actividad biológica, producción de compuestos orgánicos, agregación del suelo y la aparición de otras propiedades emergentes del sistema edáfico en función del tiempo. En general, las propiedades que emergen del ciclo del carbono en el suelo mejoran su calidad (van Breemen, 1993).

Al igual que sucedía con el pH, se observa una elevación de los niveles de carbono en suelo asociados al año 2016 tras la siembra asociada a la incorporación del rastrojo, y 90 días después de la incorporación de rastrojo (post-cosecha del primer, segundo y tercer período de cultivo del año 2015), tal y como se aprecia en la Figura 22. La biomasa microbiana inmoviliza más carbono cuando se dejan residuos en la superficie, con una tendencia lineal de crecimiento de biomasa microbiana en áreas bajo siembra directa (Vasconcellos et al., 1999). Sin embargo, esta tendencia se invierte en el último período de cultivo del año 2015 y en el año 2016, donde se aprecian breves reducciones en el período de cosecha que resultaron ser significativas en el segundo y tercer período de cosecha. No obstante, los niveles de carbono en el año 2016 son mucho más similares cuando consideramos el muestreo de antes de la siembra y el de post-cosecha.

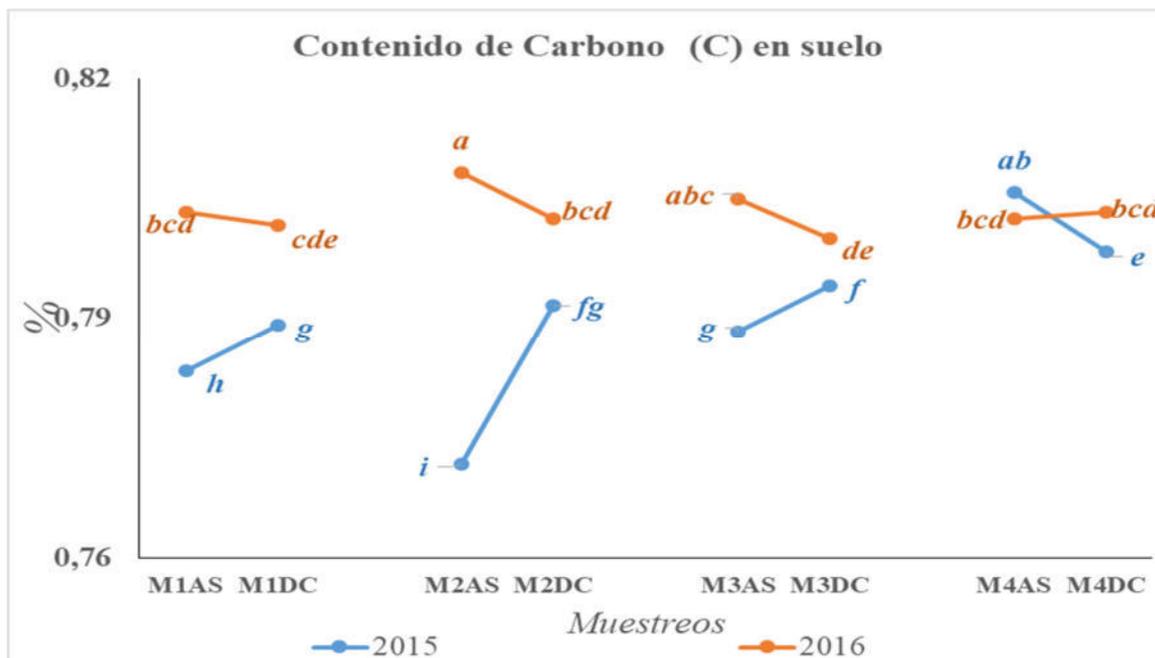


Figura 22 Carbono en suelo por tratamientos. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos por año. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestro antes de siembra; DC: muestreo 90 días después de la cosecha.

En la Figura 23, se puede observar los resultados del porcentaje de Carbono en el suelo para los distintos períodos de cultivo y tratamientos. Las diferencias significativas entre tratamientos fueron puntuales, no encontrándose diferencias significativas entre tratamientos en los períodos de antes de la siembra. El nivel de carbono en suelo fue significativamente más alto en la post-cosecha del año 2015 cuando la variedad Chaucho se sembró sin leguminosa en comparación a cuando se hacía con ella. Si nos centramos en el caso de la variedad Huandango, observamos el efecto contrario en la post-cosecha del segundo período del año 2015 y en la del tercer período del año 2016. La variedad Huandango presentó un mayor contenido de carbono en el suelo en el período post-cosecha del año 2015 en comparación con la variedad Chaucho cuando no se sembraron con leguminosas, observándose la misma tendencia en los períodos de cultivo primero y cuarto del año 2015 cuando la variedad Huandango se sembraba con leguminosa, que resultó presentar una proporción de carbono significativamente más alta que cuando se empleaba la variedad Chaucho.

Podemos concluir que los niveles de carbono en zonas con cultivo de maíz son bajos para la zona de Ecuador consecuencia de la gestión intensiva del cultivo de maíz con elevados insumos en cuanto a fertilizantes inorgánicos, el aporte de rastrojos eleva el nivel de carbono en el suelo y los beneficios asociados al mismo. En general se observa que la variedad huandango sembrada con y sin leguminosa mejora ligeramente los niveles de carbono del suelo.

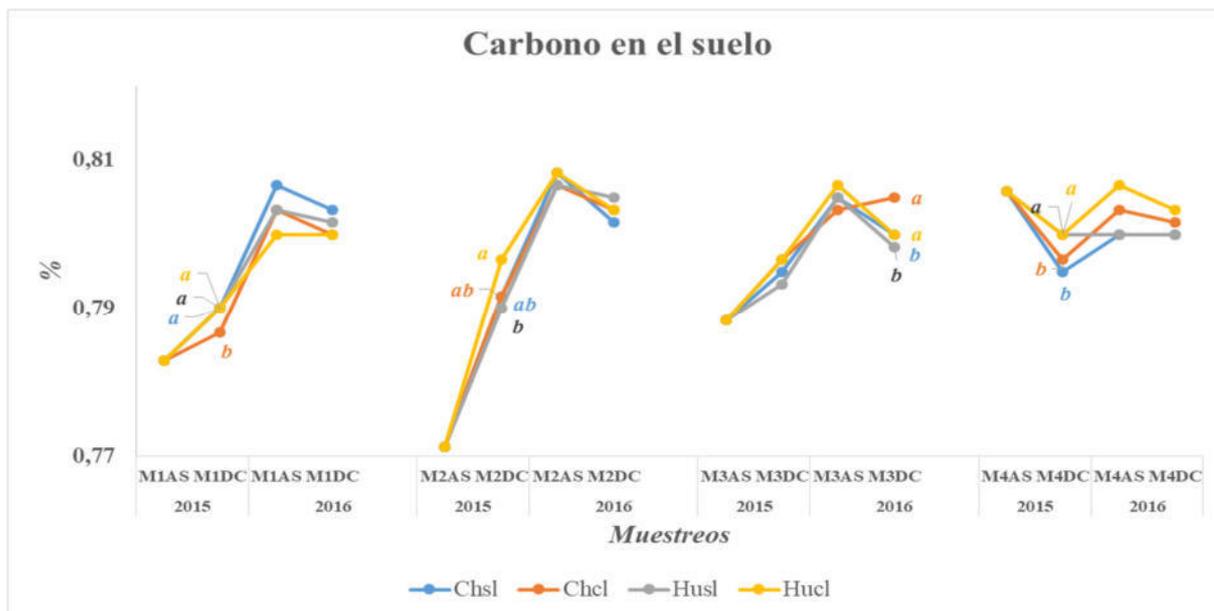


Figura 23 Carbono en suelo. Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestreo antes siembra; DC: muestreo 90 días tras cosecha. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa

4.1.3. NITRÓGENO

Los resultados del ANOVA concentración de N en el suelo para los años 2015 y 2016, se pueden observar en la tabla I del Anexo I. En ella se observa que la interacción de época y tratamientos afectó significativamente ($p < 0,01$) a los niveles de nitrógeno. Estos niveles están comprendidos entre 0,13- 0,17% lo que determina una concentración aceptable entre los rangos definidos por Ordóñez y col., (2015), para Andosoles (0,4%) por Rahman (2008); y en suelos volcánicos (0,22-0,9%) por Avellaneda (2018) y Ordóñez (2015). Los niveles de N encontrados son por lo general bajos en comparación con los descritos por León-Tapia (2020) para distintos usos de suelo en el Ecuador que variaron entre 0,26 y 0,85, pero que no incluían suelos asociados al cultivo del maíz. Estos niveles reducidos de nitrógeno, se pueden asociar a los niveles bajos de materia orgánica ya descritos, ya que el nitrógeno es un elemento móvil en el suelo, que en su mayoría sólo queda retenido como parte de la materia orgánica. León-Tapia (2020) también señala que a mayor grado de antropización el contenido en N se reduce. Debemos hacer referencia a que los elevados aportes de nitrógeno realizados en forma mineral, reducen las diferencias entre tratamientos.

Tal y como sucedía con el carbono, el nivel de nitrógeno resultó ser mucho más elevado en el año 2016 que en el 2015, consecuencia de la asociación positiva entre el nitrógeno y el contenido en materia orgánica del suelo (Figura 24). El aporte de rastrojo elevó los niveles de nitrógeno en el suelo ya que el contenido en nitrógeno en el muestreo post-cosecha resultó ser significativamente más alto que antes de la siembra en todos los muestreos con excepción del segundo y cuarto período de cultivo del año 2016.

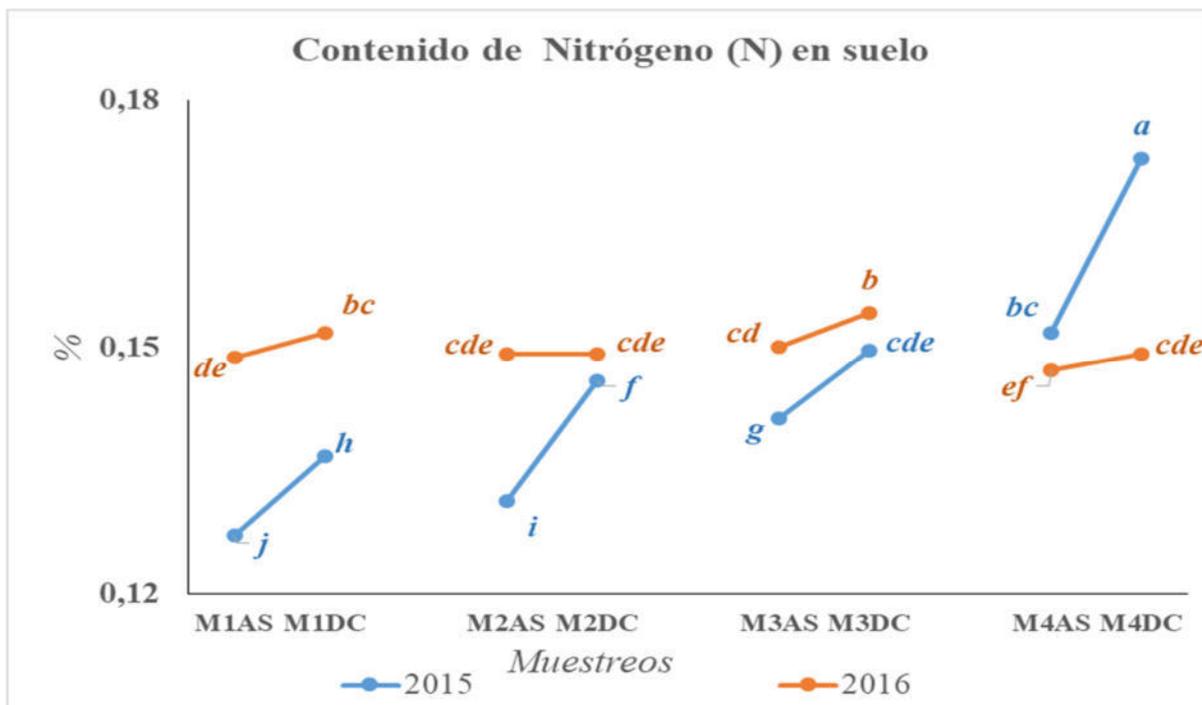


Figura 24 Nitrógeno en suelo por tratamientos. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos por año. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestro antes de siembra; DC: muestreo 90 días después de la cosecha.

En la figura 25 se aprecia el efecto de los tratamientos sobre los niveles de nitrógeno total en suelo para los diferentes tratamientos evaluados. Al igual que sucedía con el carbono en general, se encuentran diferencias significativas tras 90 días del aporte de rastrojo, consecuencia de la incorporación de materia orgánica y por tanto de nitrógeno al suelo. La variedad Chaucho incrementó el contenido de Nitrógeno en el suelo cuando no se sembraba con leguminosa en comparación a cuando se hacía antes de la siembra del período tercero del año 2016. Por el contrario, Huandango se asoció con un mayor contenido de Nitrógeno total en el suelo cuando se sembraba con leguminosa en comparación a cuando no se hacía. La variedad Chaucho incrementó los niveles de nitrógeno en el suelo cuando no se sembraban con leguminosas en el segundo período de cultivo del año 2016, no encontrándose diferencias significativas entre variedades cuando se sembraban con leguminosas. Los niveles tan elevados de aportes de nitrógeno en el suelo implicaron que se reduzcan las diferencias cuando el maíz se combina o no con leguminosa.

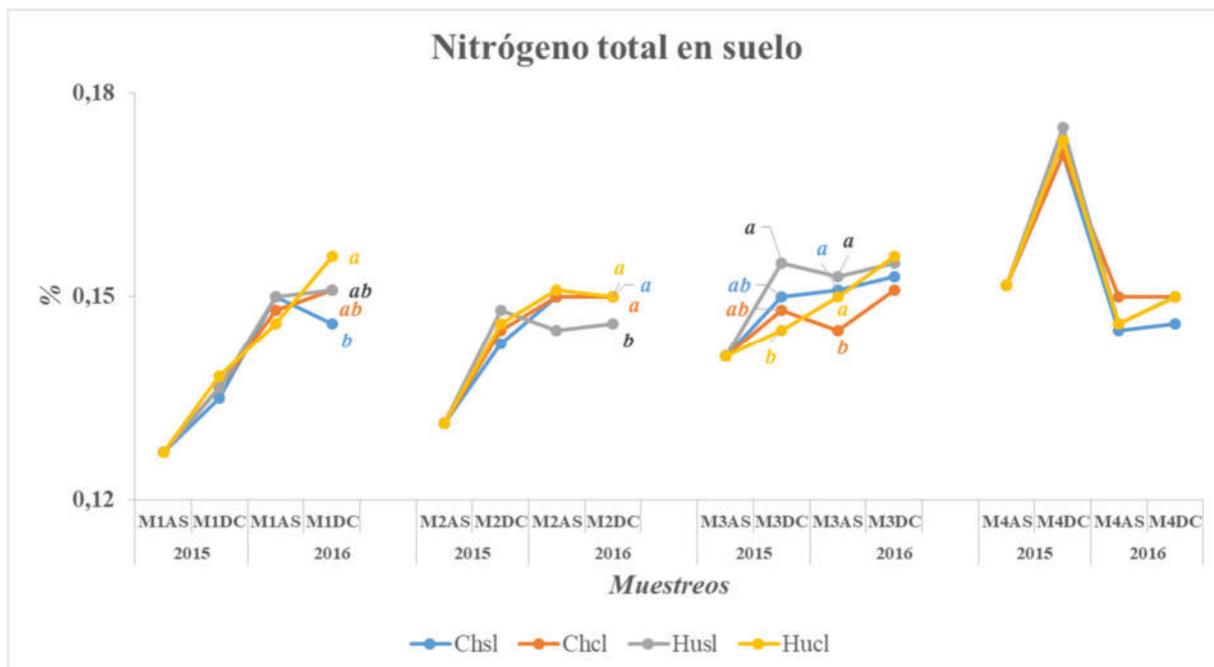


Figura 25 Nitrógeno en suelo. Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestreo antes siembra; DC: muestreo 90 días tras cosecha. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa

El nitrógeno (N) es el nutriente más limitante por las plantas ya que es un elemento muy móvil que no suele estar disponible en cantidades suficiente del cultivo, y a excepción de las leguminosas, es el más frecuentemente suministrado para predecir la producción del cultivo (Reichardt y col., 1979). Aunque parte del N contenido de forma orgánica en el suelo, se mineraliza por actividad microbiana, tal cantidad en la mayor parte de suelos no se encuentra lo suficientemente concentrada para satisfacer la demanda de cultivos que requieren este nutriente (Meng y col., 2013), lo cual se relaciona directamente por la poca cantidad de MO y por ende de nitrógeno (Guerrero 1996)

Además, el N orgánico del suelo se libera lentamente durante el año, mientras que la tasa de demanda de los cultivos requiere una mayor cantidad de este nutriente disponible al inicio de cada temporada de crecimiento (Stanford, 1973). Por tanto, es necesario el uso de otras fuentes de suministro de N, además del suelo, sobre todo si no se hace una buena gestión de las leguminosas. La combinación de estas dos fuentes de N puede traer varias ventajas al manejo de este nutriente, contribuyendo en la sostenibilidad del agroecosistema. Groffman y col. (1987), al comparar las fuentes de N, encontraron que las leguminosas lo hacen disponible de manera más gradual que los fertilizantes minerales, lo que las hace más adecuado para especies de crecimiento lento. La dinámica del N en las leguminosas es compleja, ya que la asociación del carbono con el N en los residuos, gobierna su patrón de descomposición. Además, el clima, la preparación del suelo y otras prácticas de manejo tienen potencialmente una mayor influencia en la disponibilidad de N en un sistema basado en leguminosas que en sistemas basados en fertilizantes minerales.

El interés en el uso de cultivos de cobertura asociados con preparaciones conservacionistas ha crecido, con el objetivo de controlar la erosión, aumentar la infiltración, controlar las malezas, suministrar N al cultivo en sucesión y aumentar la productividad del suelo. Mitchell y col., (1991), revisando los resultados de los tres experimentos en Estados Unidos, todos con

más de cien años, concluyó que la rotación de cultivos y la recuperación del contenido de N del suelo mediante el uso de leguminosas eran las estrategias más eficientes para lograr una producción sostenible. La mayor parte de los beneficios de las leguminosas para aumentar el rendimiento de cultivos económicos se han atribuido a una mayor disponibilidad de N (Baldock y Musgrave, 1980; Fleming y col., 1981; Ebelhar y col., 1984; Aita y col., 1994; Teixeira y col., 1994). Nuestros resultados indican que hay un cierto paralelismo entre la incorporación del rastrojo y la mejora de los niveles de materia orgánica y por ende de nitrógeno en el suelo. La incorporación del rastrojo resultó tener un mayor impacto que las variedades de maíz y su siembra con o sin leguminosas. El aporte de abonos minerales de nitrógeno reduce el efecto de los tratamientos aplicados.

4.1.4. FOSFORO OLSEN

Los resultados del ANOVA concentración de P en el suelo para los años 2015 y 2016, se puede observar en la tabla I del Anexo I, en el que la interacción período de cultivo x tratamiento resultó ser significativa ($p < 0,001$). El contenido de fósforo Olsen presente en el suelo de cultivo varió entre un valor mínimo de $17,73 \text{ mg kg}^{-1}$ y máximo de $22,79 \text{ mg kg}^{-1}$, que pueden ser considerados como óptimo (15-17) y alto (18-20) y muy alto (más de 21) atendiendo a Mallarino (2021), tal y como se aprecia en la Figura 26. En los primeros períodos de la cosecha se observa unos mayores niveles de fósforo en el año 2015 en comparación con el año 2016, sucediendo lo contrario en el caso de los dos últimos períodos de cultivo, cuando el fósforo está más disponible en el segundo año en comparación con el primero. Esto puede ser debido a la mejor capacidad de incorporación de la materia orgánica al suelo en los dos últimos períodos de cultivo, asociados al período de mayores precipitaciones que incrementa la producción del cultivo y la tasa de incorporación de nutrientes al suelo figura 38. Los niveles de fósforo Olsen fueron menores tras la incorporación de los rastrojos en el primer período del primer año, observándose la tendencia contraria en el resto de los períodos de los dos años, que resultó ser significativo en el último período de cultivo del año 2015 y en el segundo período de cultivo del año 2016.

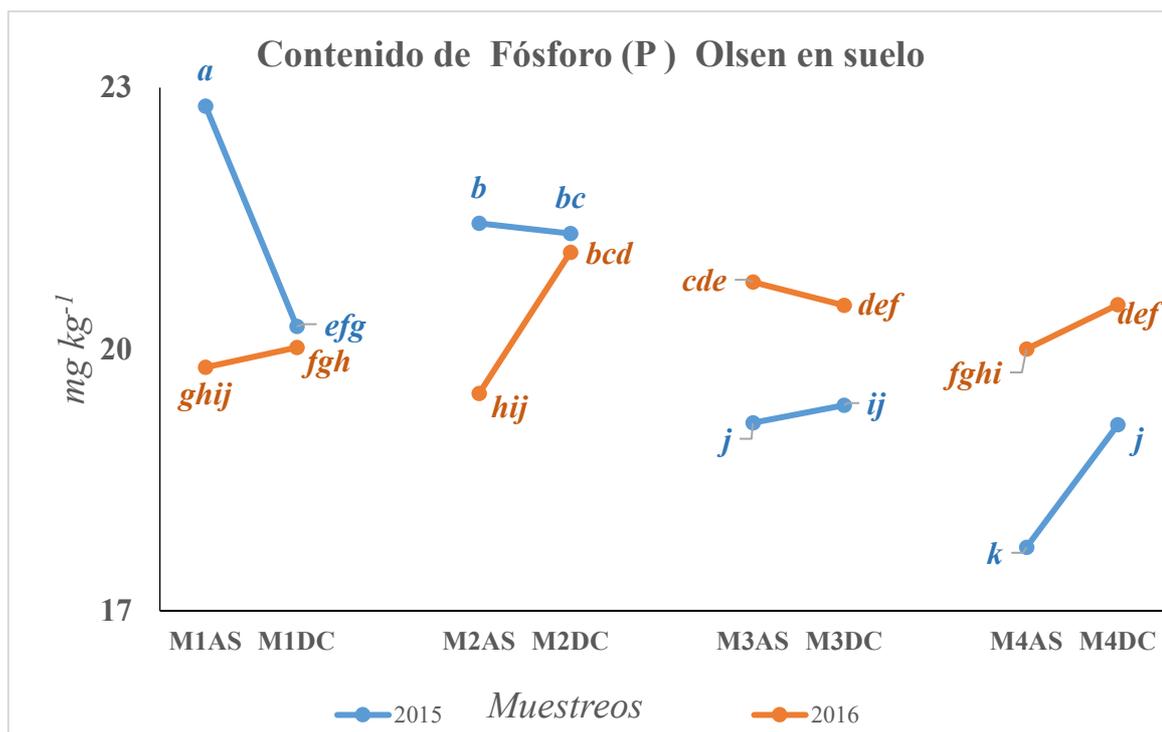


Figura 26 Fósforo Olsen en suelo por tratamientos. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos por año. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestro antes de siembra; DC: muestreo 90 días después de la cosecha.

Al igual que sucedía con el contenido en nitrógeno y materia orgánica, las diferencias significativas entre tratamientos se observaron durante el período de post-cosecha cuando comparamos el efecto de las variedades de maíz y siembra con y sin leguminosa (Figura 27). La variedad Chauchó resultó presentar unos mayores niveles de concentración de fósforo cuando se sembraba con leguminosa a cuando Chauchó no estaba acompañada del frijol en la post-cosecha del primer período de cultivo del año 2015 y 2016, del segundo y tercer período de cultivo del año 2015, no detectándose diferencias significativas en el último período de cultivo. Sin embargo en el caso de Huandango, se encontró justo lo contrario en los dos muestreos del primer período de cultivo del año 2016. Cuando las variedades de maíz se sembraban sin leguminosas, la variedad Huandango mostraba unos mayores niveles de fósforo en los períodos de post-cosecha del primer período de cultivo del año 2015, y antes de la siembra en el año 2016 en el primer período de cultivo, encontrándose lo contrario en el período postcosecha del primer período de cultivo en el año 2016. Cuando las variedades de maíz se sembraban con leguminosas, Huandango presentó un mayor contenido en fósforo antes de la siembra del primer período de cultivo del año 2016, resultando Chauchó el que favorecía los niveles de fósforo en suelo en la post-cosecha del tercer período del año 2015. Los aportes de abono mineral al suelo resultaron ser similares, el elevado pH del suelo hace que este elemento esté disponible en grandes proporciones, reduciendo el efecto de los tratamientos sobre los niveles de este elemento en el suelo.

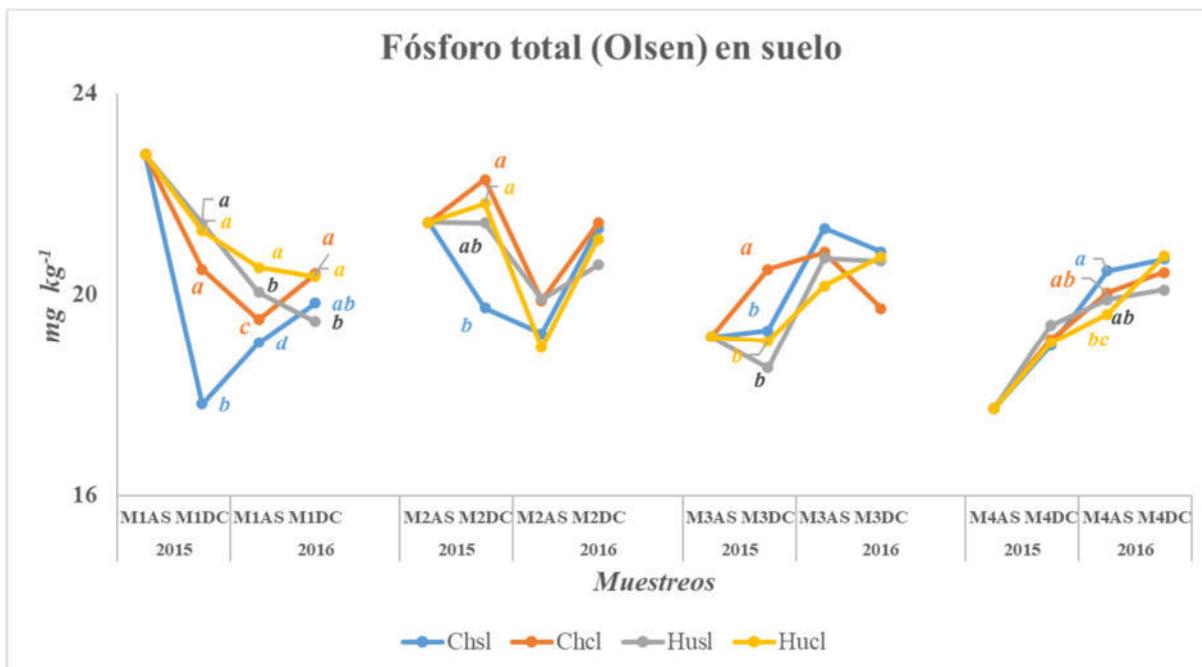


Figura 27 Fósforo Olsen en suelo. Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestreo antes siembra; DC: muestreo 90 días tras cosecha. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa

La forma en que se utilizan los fertilizantes, las características de la planta cultivada y las condiciones climáticas juegan un papel regulador en las respuestas de producción (Choudhary y col., 2018; Coelho y col., 2019). Sin embargo, los valores encontrados en este estudio pueden ser considerados como óptimos y altos debido al pH neutro del suelo que hace que la disponibilidad de fósforo se maximice. Las elevadas extracciones por parte del cultivo hacen que en general se produzca una disminución de fósforo Olsen en el suelo desde el primer muestreo en comparación con los demás, sobre todo cuando no hay incorporación de este elemento al suelo por parte de la materia orgánica. Es deseable optimizar el uso de este nutriente en el suelo, ya que para el maíz, en sistemas más técnicos, los gastos con corrección de suelo y fertilización representan, en promedio, 40 a 45% del costo de producción (Arruda Coelho y col., 2019).

4.1.5. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO (CIC)

Los resultados del ANOVA de la CIC en el suelo para los años 2015 y 2016, se pueden observar en la tabla I del Anexo I, del que se desprende la existencia de una interacción significativa período de cultivo x tratamiento ($p < 0,001$). La CIC mostraron unos niveles en torno a 7 en los dos primeros períodos de cosecha del año y en torno a 6,5 en los dos últimos. El rango global es muy similar para todos los tratamientos y varió entre 6,19 y 7,52 meq 100 g⁻¹ (Figura 28). Estos niveles que son ligeramente superiores a los indicados para suelos poco fértiles, inferior a 6 cmol (+) kg⁻¹, de acuerdo a los estudios realizados por Fuentes-Yagüe (1999) y superiores a los obtenidos en suelos ácidos, encontrándose en el marco de los suelos agrícolas entre 4,6-10 cmol (+) kg⁻¹ (Mosquera-Losada y col., 2011). Los valores obtenidos están por debajo de los descritos para el cultivo de papa en Ecuador en zonas de antropización intermedia (León-Tapia 2020). Solo se aprecia una mejora de la CIC en la post-cosecha del segundo y cuarto período de cultivo de los años 2015 y 2016, respectivamente. Por el contrario,

en el segundo período post-cosecha del año 2016 se produce una disminución clara de la CIC en el suelo.

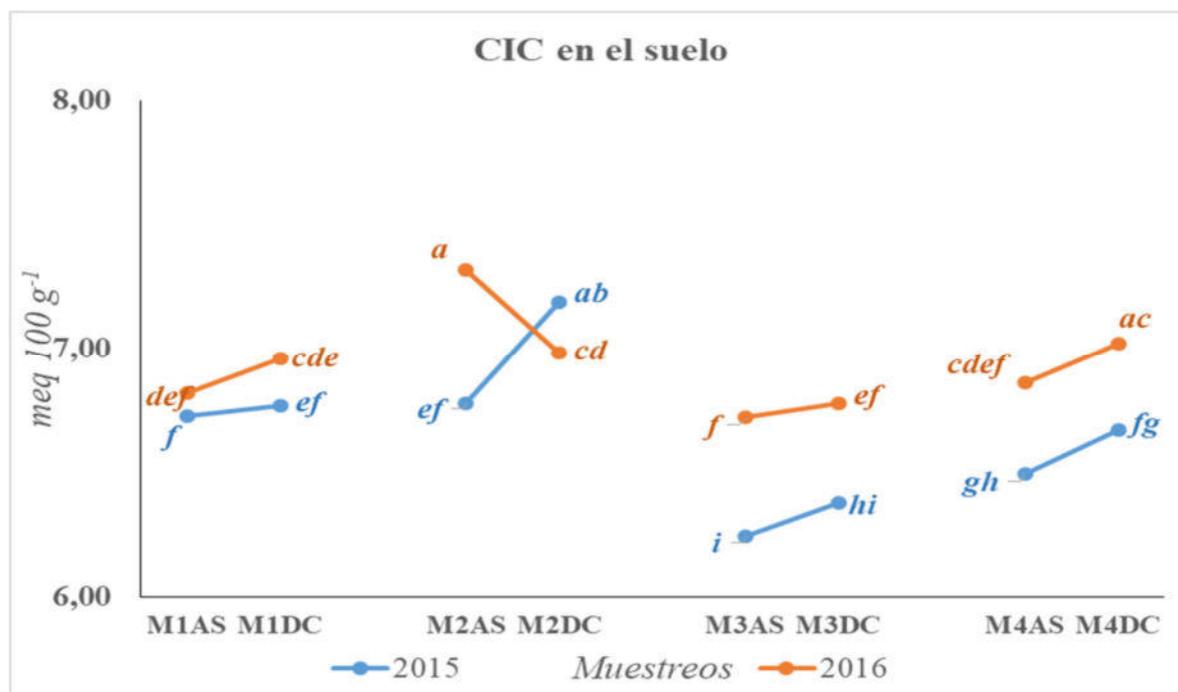


Figura 28 CIC en suelo por tratamientos. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos por año. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestro antes de siembra; DC: muestro 90 días después de la cosecha.

La capacidad de intercambio catiónico sólo se vió afectada por los tratamientos en el segundo período de cultivo del año para ambos años de estudio exceptuando el muestro de antes de la siembra en 2015 y en la post-cosecha del tercer período de cultivo del año 2015, por lo que nos centraremos en estos dos períodos. La siembra con Chaucho sin leguminosa resultó presentar una menor capacidad de intercambio catiónico que cuando se empleaba esta leguminosa. Si nos centramos en Huandango sucede lo mismo en el período de cultivo antes de la siembra del año 2016, sin embargo, se encuentra lo contrario en la post-cosecha del tercer período de cultivo en al año 2015. Cuando la leguminosa no acompaña a las variedades de cultivo, no se encontró un efecto de estas variedades sobre el nivel de CIC en el suelo. No obstante, cuando se sembraban con leguminosa la variedad Chaucho incrementó el nivel de CIC en el suelo en la post cosecha del segundo período de cultivo del año 2016 en comparación con Huandango figura 29.

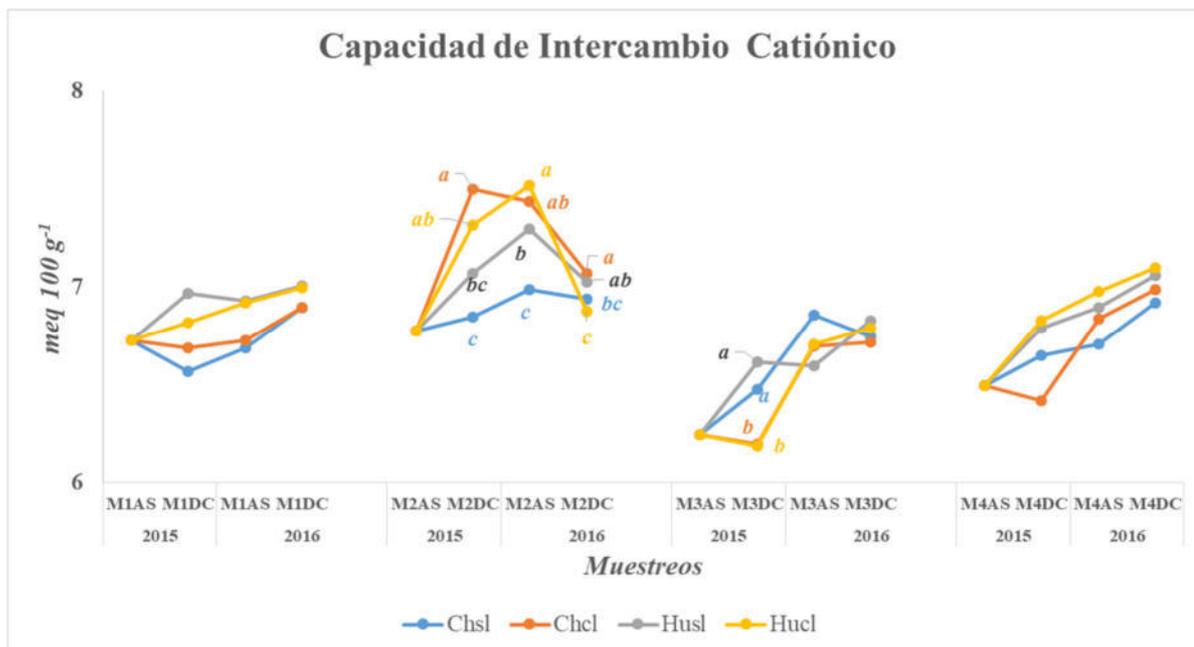


Figura 29 CIC en suelo. Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestreo antes siembra; DC: muestreo 90 días tras cosecha. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se refiere a la habilidad de las partículas de suelo que tienen carga negativa para atraer y retener cargas positivas de iones [calcio (Ca^{++}), magnesio (Mg^{++}), potasio (K^+), sodio (Na^+), amonio (NH_4^+), aluminio (Al^{+++}) y hidrogeno (H^+)]. La capacidad de intercambio catiónico es expresadas en unidades de Porcentaje de Saturación de Bases centimoles por kilogramo (cmol kg^{-1}), o en $\text{meq } 100 \text{ g}^{-1}$ g de suelo (Espinoza y col., 2012).

Las arcillas y la materia orgánica del suelo tienen la propiedad de comportarse como iones de carga negativa, aniones, de forma que son capaces de retener o adsorber cationes. Esta capacidad del suelo es lo que le permite retener los elementos necesarios para nutrir a las plantas, que de otra forma estarían en la solución del suelo fácilmente disponibles para su lavado en profundidad. Así, cuanto mayor sea esta «capacidad» mayor será la fertilidad natural del suelo (Garrido, 1994).

La capacidad de intercambio catiónico se vió incrementada en los dos primeros períodos de cultivo cuando tendió a ser mayor que en los períodos de cultivo tercero y cuarto. Sólo se vió afectada en el segundo período de cultivo y en la post cosecha del tercero, mostrando una menor CIC en el primer caso Chaucho sin leguminosa y el efecto contrario en el caso de la post cosecha del tercer periodo de cultivo del primer año. Los importantes aportes de cal y el pH neutro hacen que los tratamientos no reflejen una mejora en el suelo durante el período de estudio de dos años, quizás se precisen estudios a más largo plazo.

4.1.6. POTASIO

Los resultados del ANOVA concentración de K en el suelo para los años 2015 y 2016, se pueden observar en la tabla I del Anexo I, que muestra diferencias significativas ($p < 0,05$) de la interacción período de cultivo x tratamiento. El contenido mínimo de K en el suelo se encontró en el primer período de cultivo el primer año con $0,48 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$, mientras que el mayor contenido se encontró en el segundo período de cultivo del primer año, con un valor de

0.54 meq 100 g⁻¹ (Figura 30). Estos valores pueden considerarse bajos en comparación con los obtenidos en diferentes usos del suelo en un estudio de Ecuador (León-Tapia 2020). En todo caso, los niveles de K intercambiable son superiores a 0,2 meq 100 g⁻¹, límite establecido por Buol y col., (1981) como indicativo de deficiencia en plantas y que permitiría un desarrollo adecuado de leguminosas en estos suelos, que se ven muy favorecidas por la presencia de este elemento (Mosquera y González, 2003). De acuerdo a estudios realizados por Rahman y col., (2008); Avellaneda y col., (2018), en suelos volcánicos, el Potasio de cambio, se encuentra en rango entre 0,2 – 3 cmol (+) kg⁻¹, estando nuestros suelos en el rango descrito para este tipo de suelos.

Al igual que sucedía con el nitrógeno, los niveles de potasio en suelo resultaron ser mayores, por lo general, en el segundo año con respecto al primero. Esta observación resultó ser significativa en el primer período de cultivo y antes de la siembra en el cuarto período de cultivo. En el primer año la post-cosecha incrementó el contenido de potasio en suelo de forma significativa en todos los períodos de cultivo excepto el tercero, sin embargo, este efecto no se observa en ninguno de los períodos de cultivo del segundo año.

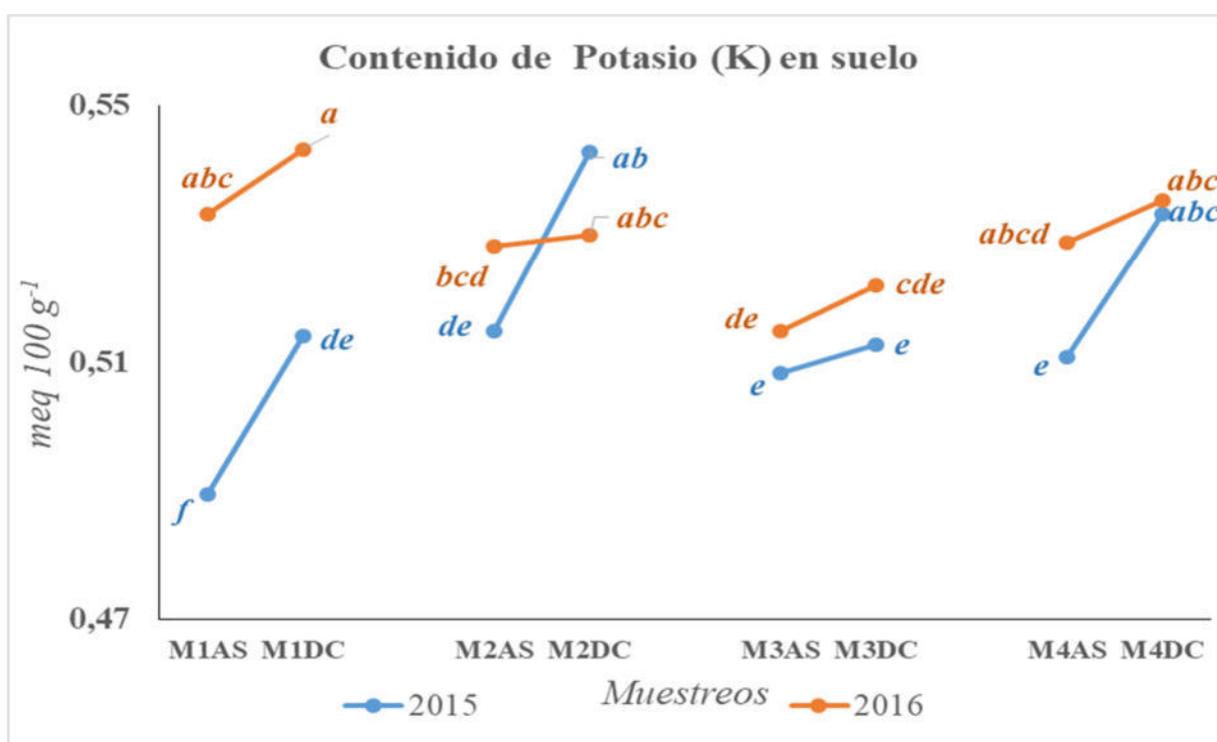


Figura 30 Potasio de cambio en suelo por tratamientos. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos por año. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestro antes de siembra; DC: muestreo 90 días después de la cosecha.

En la Figura 31 se aprecian los niveles de potasio de cambio en el suelo, que al igual que sucedía con la CIC, sólo resultó ser significativa en el segundo período de cultivo. Al igual que sucedía con la CIC Chaucho sin leguminosa presenta unos menores niveles de potasio en comparación a cuando se siembra con leguminosa en la post-cosecha del segundo período del año 2015, lo que también se observa en Huandango antes de la siembra del maíz en el segundo período de cultivo del año 2016. La siembra de Chaucho con leguminosa mostró unos niveles de potasio más elevados en el suelo en comparación con la variedad Huandango.

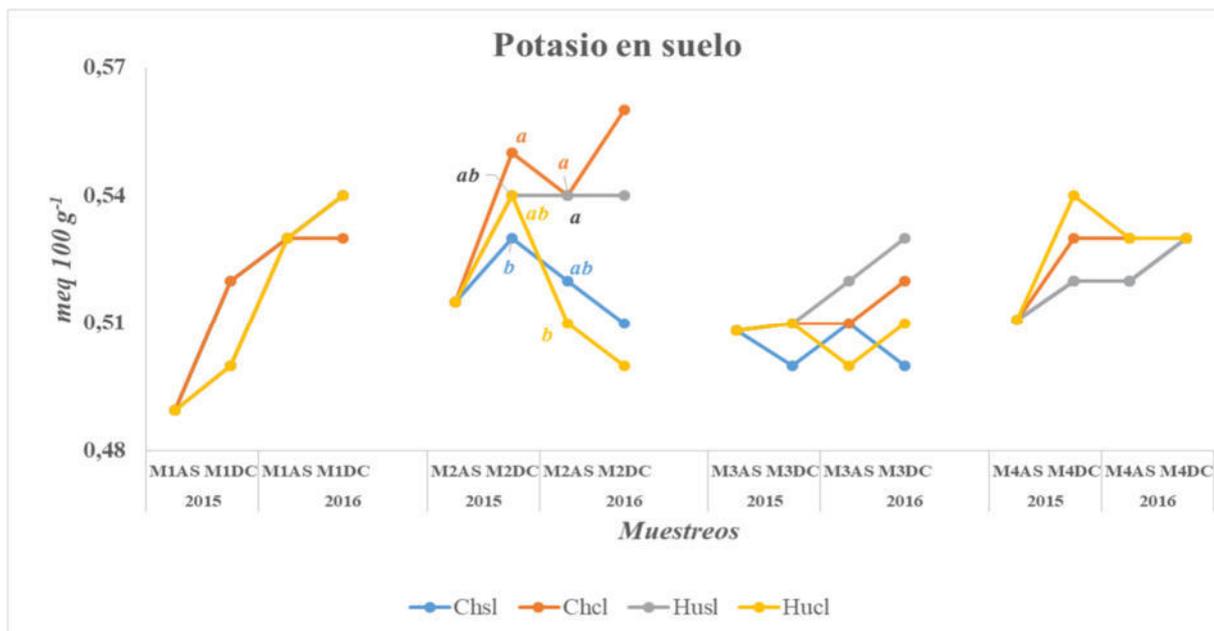


Figura 31 Potasio de cambio en suelo. Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestreo antes siembra; DC: muestreo 90 días tras cosecha. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa

Los niveles de potasio en el suelo resultaron estar dentro del rango de normalidad y tendieron a mejorarse en el período de post-cosecha. El pH que mejora la disponibilidad en el suelo y el aporte de fertilizante potásico, probablemente igualó los tratamientos, que no mostraron tendencias generales clara en cuanto a la variedad de maíz empleada y la siembra o no con leguminosa.

4.1.7. CALCIO

La concentración de Ca disponible en el suelo resultó verse significativamente afectada ($p < 0,001$) por la intersacción período de cultivo x tratamiento tal y como se puede observar en la Tabla I del Anexo I. Los niveles medios de calcio disponible en suelo estuvieron comprendidos entre 4,6 y 5,6 meq 100 gr⁻¹ (Figura 32), valores que se encuentran en el rango de los descritos por León-Tapia (2020) en suelos sometidos a distintos usos en Ecuador. Los niveles de Ca de cambio estuvieron comprendidos entre 2,18- 10,65 meq 100 gr⁻¹ de suelo, lo que indica que son suelos no deficitarios en este elemento para la producción agrícola al mostrar valores superiores a 6 meq 100 gr⁻¹ (Buol y col., 1981).

Los niveles de Calcio resultaron ser mayores en los dos primeros períodos de cultivo del año y menores en el caso de los dos últimos, tal y como sucedía con la CIC, de la que el calcio es el catión mayoritario en la gran parte de los suelos, representando en este caso más del 90% de la saturación de bases al ser un suelo neutro, tal y como mencionamos previamente. El muestreo post-cosecha elevó el nivel de calcio de cambio en el suelo en relación al de antes de siembra en general y de forma significativa en el segundo período y cuarto período de cultivo del año 2015, resultando el efecto contrario en el segundo período de cultivo en el año 2016. El nivel de calcio disponible en suelo se elevó de forma significativa en el año 2016 con respecto al 2015 antes de la siembra del segundo, tercer y cuarto período de cultivo y en el muestreo post-cosecha en el tercer y cuarto período de cultivo. No obstante, se observó un efecto

contrario en el muestro post-cosecha del segundo período de cultivo en el que el año 2015 presentó unos mayores niveles de calcio que en el año 2016.

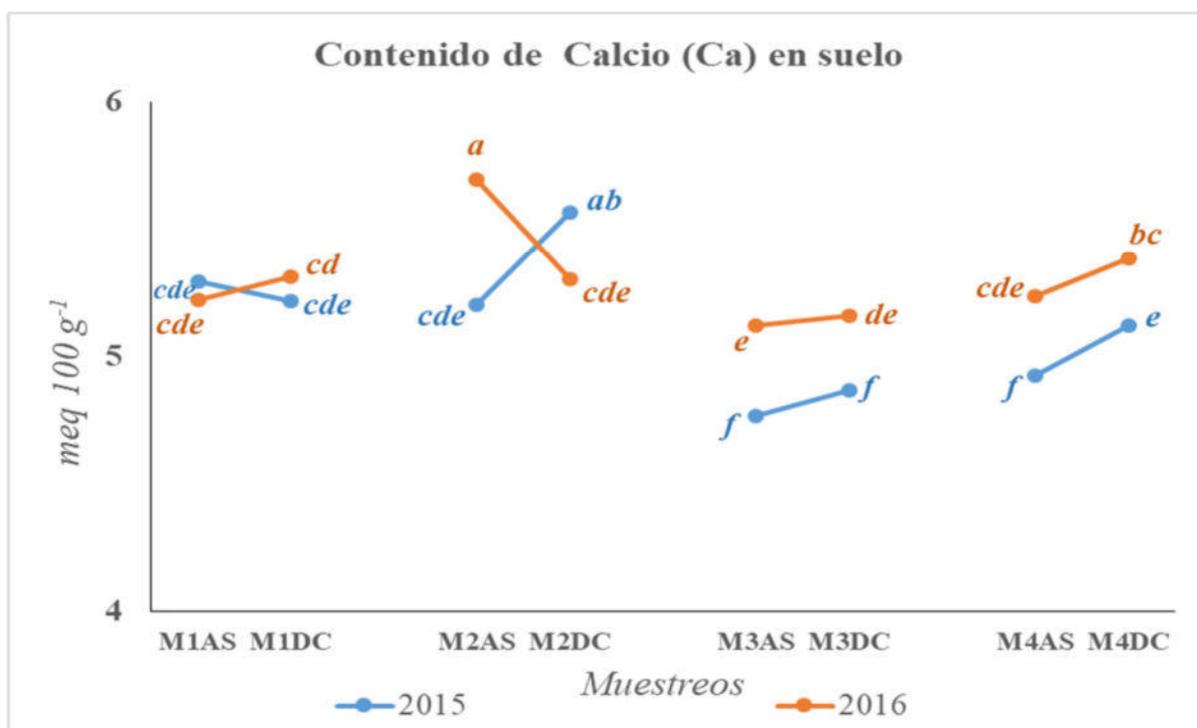


Figura 32 Calcio de cambio en suelo por tratamientos. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos por año. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestro antes de siembra; DC: muestro 90 días después de la cosecha.

El nivel de calcio en suelo difirió entre los tratamientos aplicados en los mismos períodos que la CIC, lo que es consecuencia de que el calcio de cambio es el principal componente de la CIC. Al igual que sucedía con la CIC, tanto la variedad Chaucho como la Huandango cuando se siembran sin leguminosa resultaron presentar una menor capacidad de intercambio catiónico que cuando se empleaba esta leguminosa en el muestro de post-cosecha del 2015 y antes de siembra de 2016 del segundo período de cultivo, encontrándose el efecto contrario en la post-cosecha del tercer período de cultivo del año 2015 cuando se sembraba Chaucho, pero no Huandango. Si nos centramos en Huandango la siembra de esta variedad sin leguminosa sucede lo mismo en el período de cultivo antes de la siembra del año 2016, sin embargo, se encuentra lo contrario en la post-cosecha del tercer período de cultivo en al año 2015. Cuando la leguminosa no acompaña a las variedades de cultivo, no se encontró un efecto de estas variedades sobre el nivel de calcio de cambio en suelo al igual que sucedía con la CIC, a excepción del mejor nivel de calcio de cambio de la variedad huandango comparado con la Chaucho (figura 33). No se detectaron diferencias significativas entre variedades de maíz cuando se sembraron con las leguminosas.

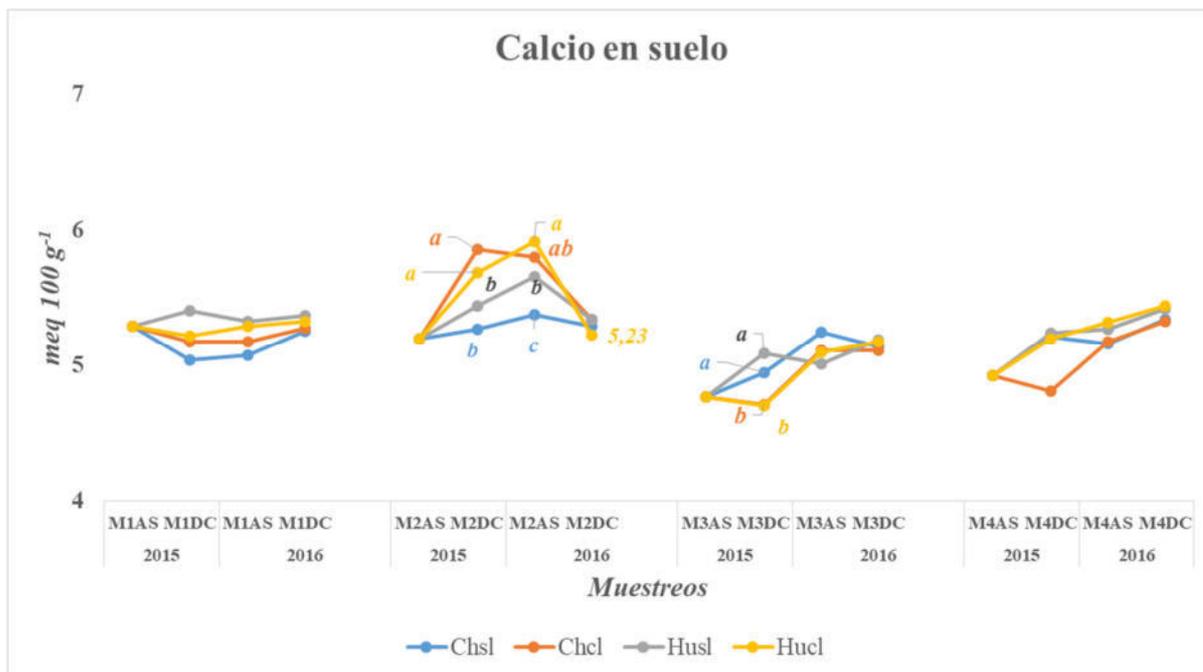


Figura 33 Calcio de cambio en suelo. Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestreo antes siembra; DC: muestreo 90 días tras cosecha. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa

En conclusión, los niveles de calcio de cambio en el suelo resultaron ser los de mayor proporción en la CIC, mostrando que el aporte de rastrojos lo eleva en alguno de los casos, si bien no se encuentra un efecto generalizado de los tratamientos empleados sobre el mismo. Aunque el contenido en calcio de cambio fue más reducido en la variable Chaucho sin leguminosa en comparación con otros tratamientos.

4.1.8. MAGNESIO

Los resultados del ANOVA concentración de Mg de cambio en el suelo se puede observar en la tabla I del Anexo I. De esta tabla se desprenden que hay una interacción significativa de período de cultivo x tratamiento ($p < 0,001$). El rango de maganesio de cambio resultó estar comprendido entre $0,71 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$ - $0,96 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$, con niveles que no resultaron ser deficitarios para las plantas en este elemento. Los valores obtenidos en este estudio se encuentran por debajo del rango definido por Avellaneda y col., (2018) y Rahman y col., (2008) en suelos volcánicos de entre $0,9 - 2,5 \text{ cmol } (+) \text{ kg}^{-1}$ y muy por debajo de los encontrados en el estudio de León-Tapia (2020) para Ecuador en distintos tipos de suelo, en los que los suelos de cultivo suelen presentar unos niveles menores de este elemento en comparación con los suelos poco antropizados. El pH elevado de nuestro experimento eleva los niveles de Calcio de Cambio en suelo, elemento que suele encontrarse en relación inversa con el Magnesio de cambio.

En todo caso, y tal y como se aprecia en la Figura 34 y como sucedía con la mayor parte de los muestreos de suelo con el calcio de cambio, los niveles de magnesio de cambio en el suelo resultaron ser significativaemtnes mayores en el muestreo post-cosecha en comparación con el muestreo de antes de la siembra en el año 2015 con excepción del segundo período de cultivo del año 2015 y en los dos períodos de cosecha iniciales en el año 2016. Por otra parte, todos los muestreos del año 2016 resultaron ser significativamente más elevados que sus

respectivos muestreos en el año 2015 a excepción del muestreo anterior a la siembra del cuarto período de cultivo.

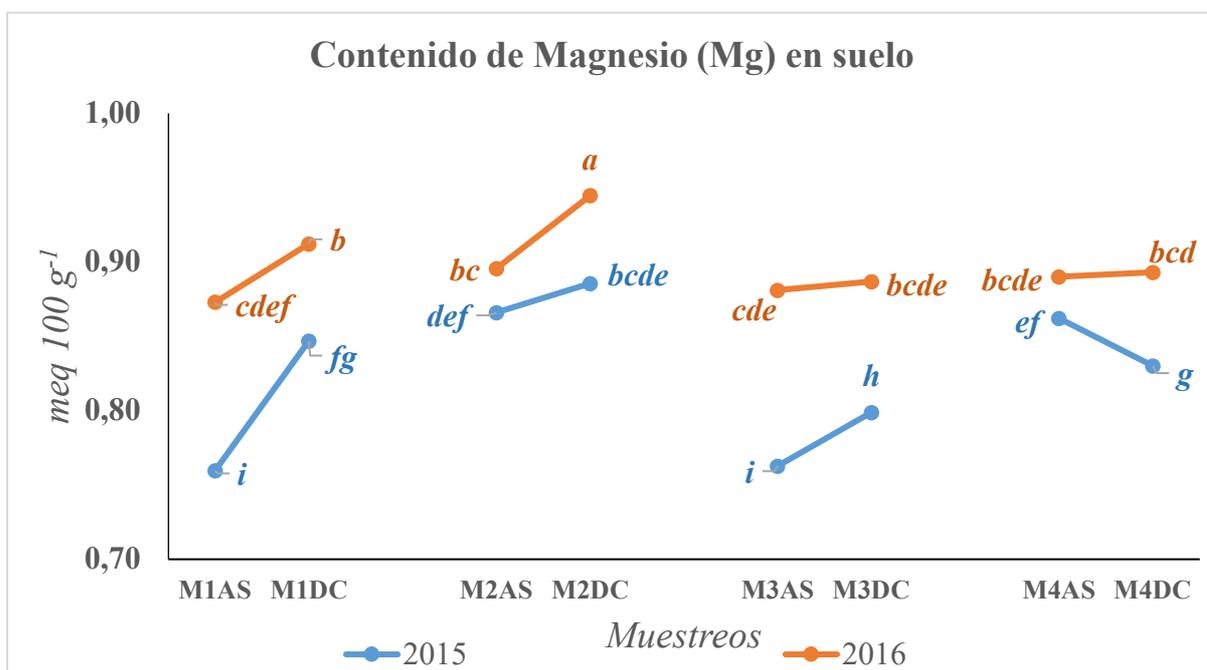


Figura 34 Magnesio de cambio en suelo por tratamientos. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos por año. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestreo antes de siembra; DC: muestreo 90 días después de la cosecha.

El efecto de los tratamientos aplicados sobre el contenido de magnesio de cambio en suelo puede apreciarse en la Figura 35. En ella se observa que es el primer período de cultivo y el muestreo post-cosecha del cuarto período de cultivo el que muestra diferencias significativas. La siembra con leguminosa de la variedad Chaucho incrementa el nivel de magnesio en el suelo en el muestreo anterior a la siembra del primer período de cultivo, si bien ocurre lo contrario en el muestreo post-cosecha del último período de cultivo. En relación a Huandango, solo en el muestreo post-cosecha del último período de cultivo se observa que la siembra con leguminosa incrementa los niveles de magnesio de cambio en suelo. El Chaucho presentó unos menores niveles de magnesio de cambio en el suelo que la variedad Huandango en el muestreo post-cosecha del último período de cultivo. No se encontraron diferencias significativas en cuanto al nivel de magnesio de cambio en suelo entre las variedades de maíz cuando no se sembraban con leguminosas.

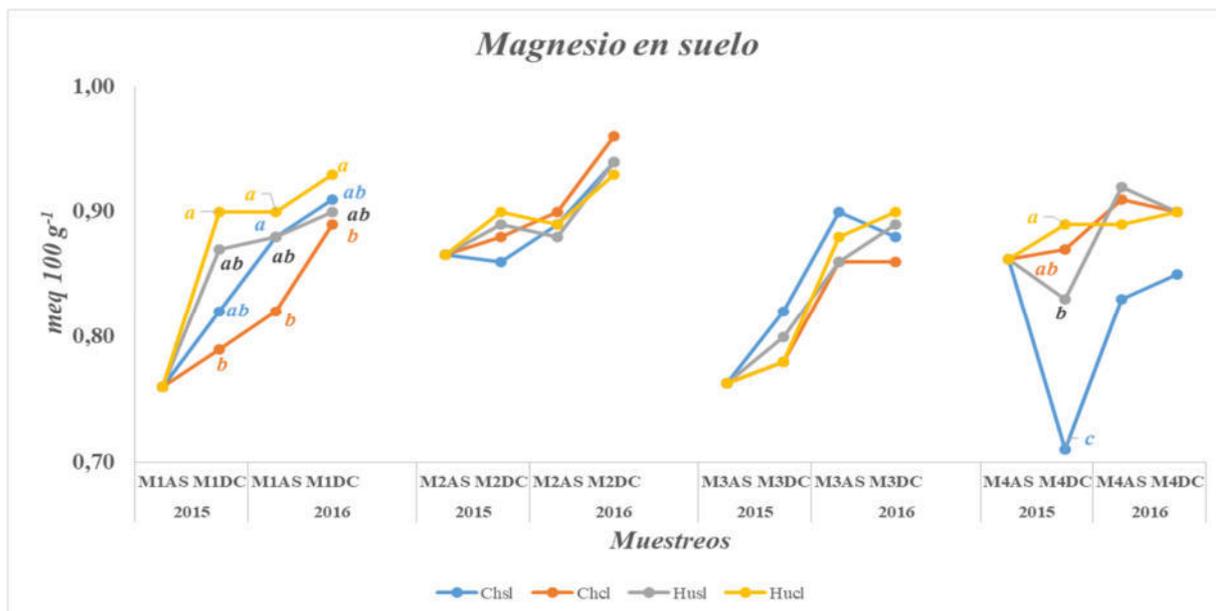


Figura 35 Magnesio de cambio en suelo. Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestreo antes siembra; DC: muestreo 90 días tras cosecha. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa

En general podemos concluir que los niveles de magnesio son por lo general bajos, lo que puede asociarse al pH neutro de los suelos de estudio. Encontramos que la incorporación de los rastrojos al suelo y el barbecho favorecieron el incremento del magnesio de cambio en el suelo.

4.1.9. SODIO

Los resultados del ANOVA concentración de Sodio de cambio en el suelo, se pueden observar en la Tabla I del Anexo I, donde se aprecia que existen diferencias significativas ($p < 0,001$) de la interacción Período de cultivo x tratamiento. El rango de contenido de Na de cambio observado (Figura 36) está comprendido entre 0,18 y 0,23 meq 100 g⁻¹, valores que se encuentran por debajo del rango encontrado por León-Tapia (2020) en suelos de Ecuador (0,50-0,82 meq 100 g⁻¹). No se encontró un efecto claro de los tratamientos aplicados sobre el muestreo post-cosecha con respecto al previo a la cosecha ya que el nivel de sodio de cambio en el muestreo post-cosecha se redujo significativamente en comparación con el de antes de la siembra en el último período de cultivo del año 2015 y lo contrario se encontró en el tercer período del cultivo en el año 2016. Por el contrario, si encontramos cierto patrón entre los niveles de sodio de cambio para el mismo muestreo realizado en distintos años. Los niveles de sodio de cambio resultaron ser significativamente mayores en el año 2016 con respecto al 2015 en el muestreo post-cosecha del segundo, tercero y cuarto período de cultivo al igual que en el muestreo previo a la siembra del cuarto período de cultivo.

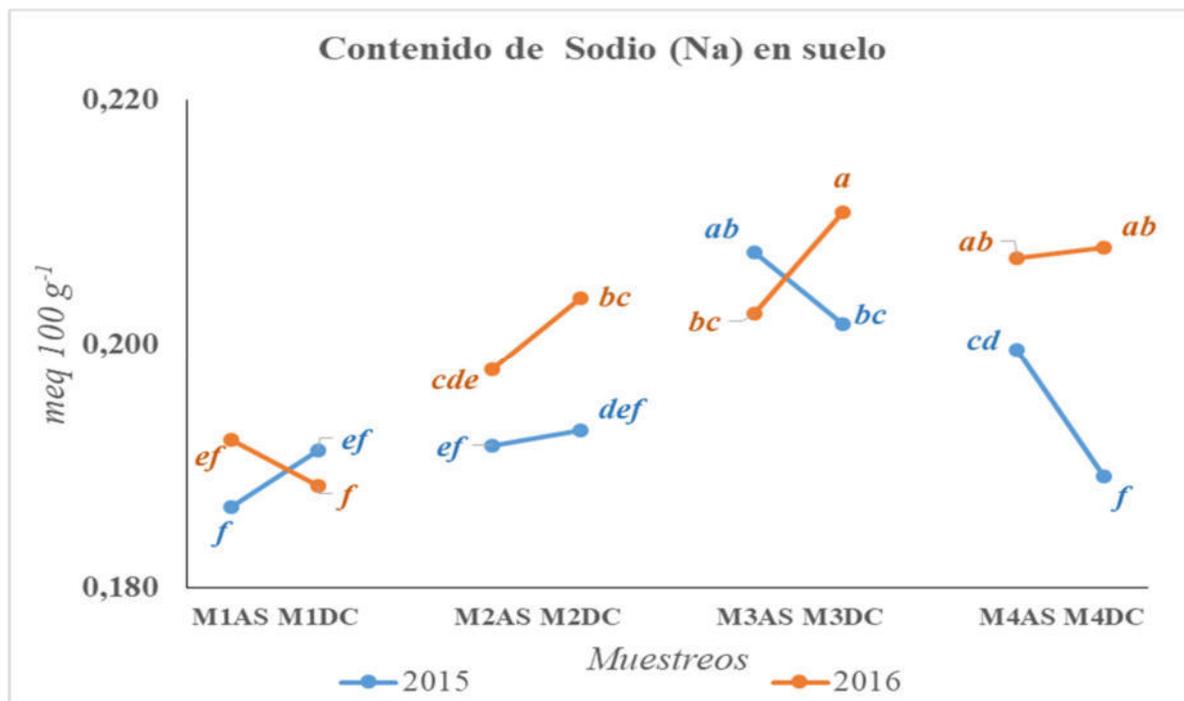


Figura 36 Sodio de cambio en suelo por tratamientos. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos por año. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestro antes de siembra; DC: muestreo 90 días después de la cosecha.

El efecto de los tratamientos sobre los niveles de sodio en el suelo se puede apreciar en la Figura 37. Se encontraron diferencias significativas entre tratamientos en el muestreo anterior a la siembra del segundo período de cultivo, en el tercer período de cultivo y en el muestreo post-cosecha del último período de cultivo. La variedad Chaucho incrementó los niveles de sodio de cambio en suelo cuando se sembraba con leguminosa en el muestreo post-cosecha del cuarto período de cultivo del año 2016. La siembra sin leguminosa de Huandango incrementó el nivel de sodio en el suelo en el muestreo de antes de la siembra del segundo período de cultivo en comparación con la siembra con leguminosa. El mismo efecto se observó en el muestreo post-cosecha del tercer período de cultivo de los años 2015 y 2016, y el efecto contrario en el muestreo post-cosecha del cuarto período de cultivo en el año 2016. Cuando Huandango se sembró sin leguminosa mostró unos niveles de sodio de cambio en suelo mayores a los de Chaucho en el muestreo de antes de la siembra del segundo período de cultivo del año 2016, al contrario de lo que ocurre en el muestreo post-cosecha del tercer período de cultivo del año 2016 cuando los niveles de sodio de cambio en suelo se ven incrementados en Chaucho comparado con Huandango cuando se siembran con leguminosas.

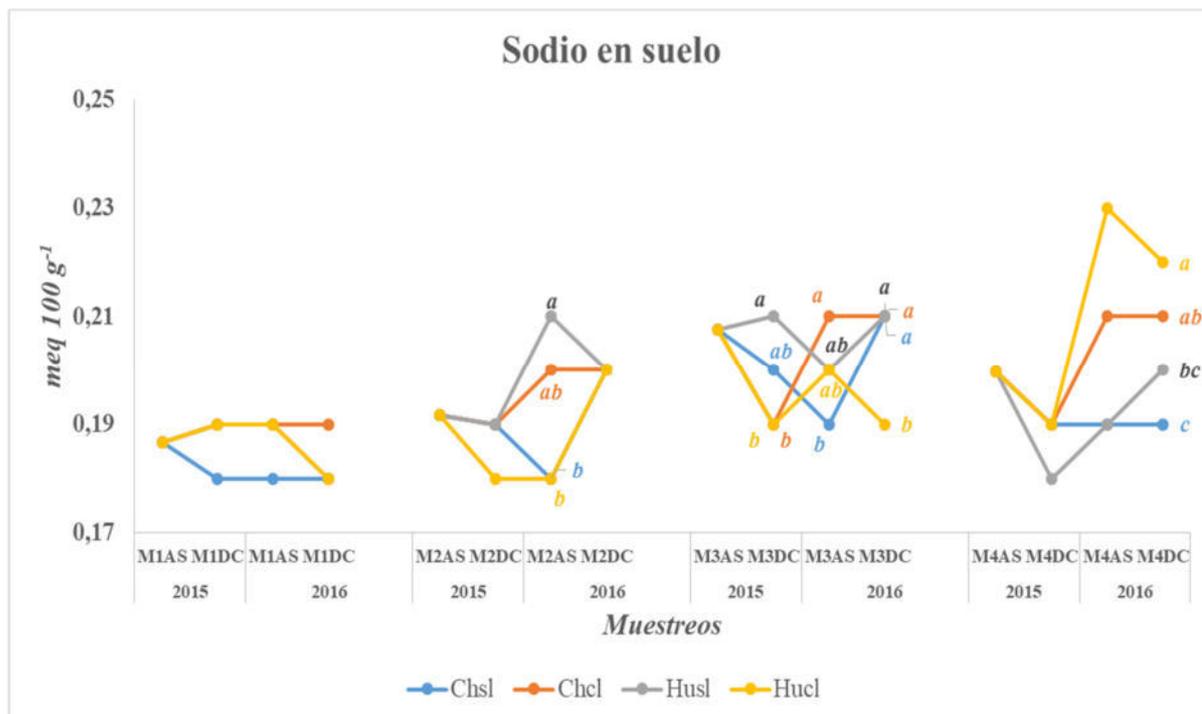


Figura 37 Sodio de cambio en suelo. Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. M1, M2, M3 y M4 indican los cuatro muestreos. AS: muestreo antes siembra; DC: muestreo 90 días tras cosecha. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa

4.2. BIOMASA

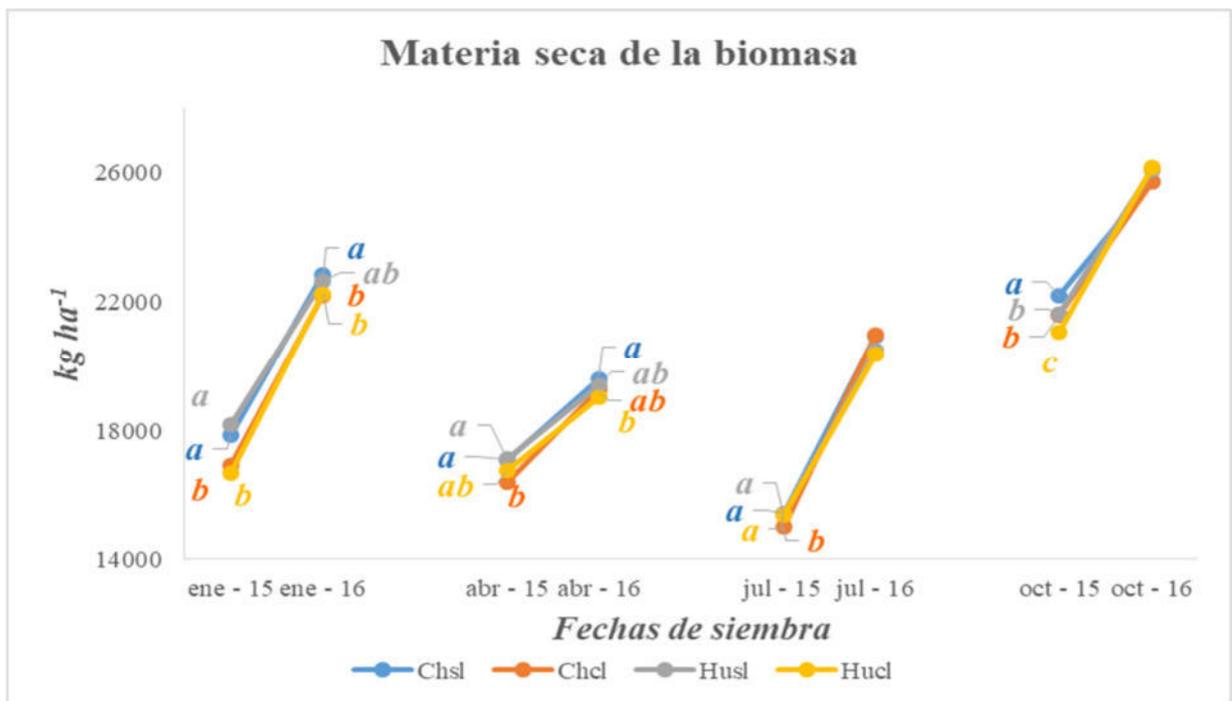
4.2.1. PRODUCCIÓN

4.2.1.1. PRODUCCIÓN DE PLANTA DE MAÍZ

Los resultados del ANOVA en la producción muestran un efecto independiente de los tratamientos y período de cultivo tal y como se puede observar en la Tabla II del Anexo I. La producción de la planta de maíz estuvo comprendida entre 15015,8 y 26154,3 kg ha⁻¹, valores que se pueden considerar adecuados y altos en comparación con otros cultivos, debido a la elevada productividad del maíz por ser una especie C4. La producción de grano resultó estar comprendida entre 700 y 1700 kg ha⁻¹, resultando al igual que la producción de planta de maíz de mayor producción en el cuarto período de cosecha. Estos valores superan los 530 kg ha⁻¹ de grano descritos por Boada y Espinosa (2015). Referente al rendimiento de grano en cultivos de maíz, Badillo (2016), reporta producto de su análisis un rendimiento en seco de 3864 kilogramos por hectárea, equivalente a 85 quintales por hectárea; y un rendimiento en mazorca de 190 sacos por hectárea, equivalente a 50 kilogramos. Por su parte, Basantes (2015), establece que el rendimiento para variedades mejoradas de maíz es de 3,5 a 5 toneladas por hectárea, y de 1 a 2 toneladas por hectárea para variedades criollas.

En la Figura 38 podemos observar que, por lo general, las producciones del segundo año tanto de planta como de grano fueron mucho mayores que las producciones del primer año. En general, todos los niveles de los elementos de cambio, carbono, CIC y pH tendían a ser más elevados en el segundo año con respecto al primero debido a la incorporación de rastrojo al suelo que se refleja en la mayor productividad del cultivo. Es más, se observa que la cosecha del último período del cultivo es más elevada que las anteriores probablemente debido a la

incorporación de restos procedentes del inicio de la estación de lluvias de julio a octubre. La variedad Chaucho presentó unas mayores producciones de maíz cuando se sembraba sin leguminosa que cuando se hacía con estra en en todas las cosechas con excepción de la última. La misma tendencia se observa en el caso de variedad Huandango, si bien no se encuentran diferencias significativas en las cosechas de abril y julio de 2015 y en todas las cosechas del año 2016. En relación a la producción de grano, la variedad chaucho sin leguminosa produjo más grano que cuando se sembraban con legumionosas en el primer período de cultivo de los años 2015 y 2016, no mostrando diferencias significativas en los otros períodos de muestreos. Si nos centramos en la variedad Huandango, la producción de grano cuando esta variedad no se sembraba con leguminosa resultó ser también mayor en el primer período de cultivo para los dos años, en julio de 2015 y en octubre de 2016, resultando por tanto más sensible a la competencia con la leguminosa.



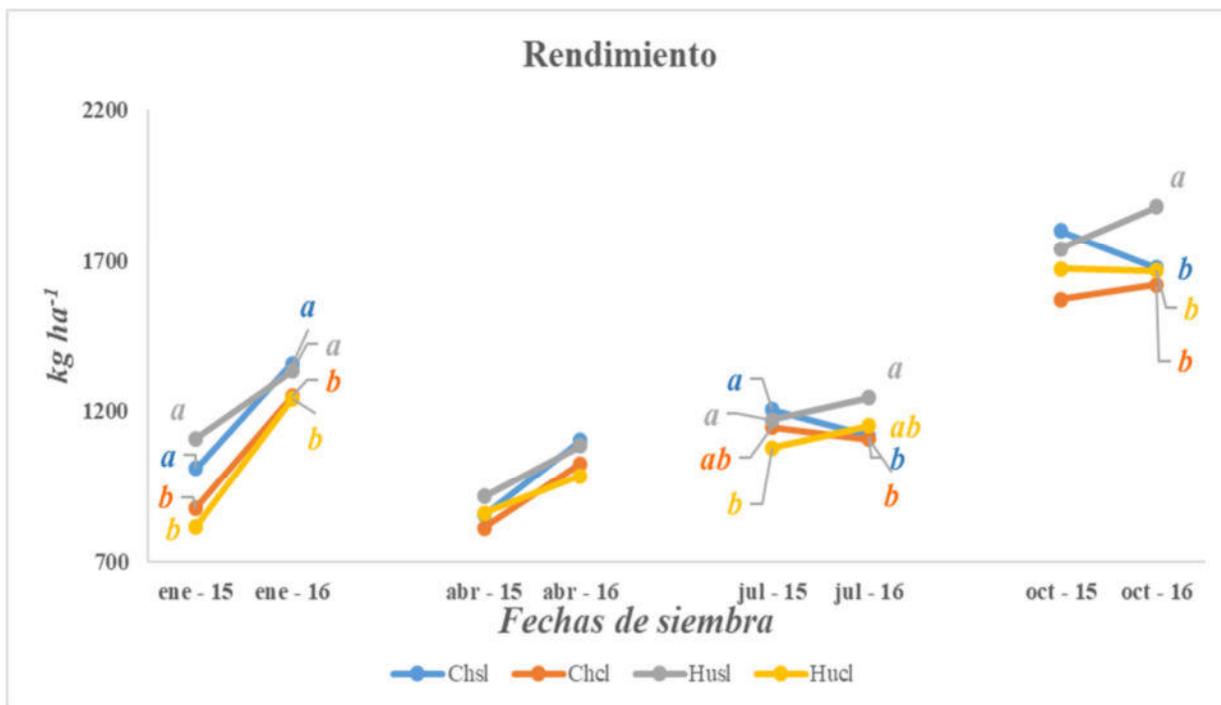


Figura 38 Producción de maíz planta (superior) y maíz grano (inferior) en cada cosecha (enero, abril julio y octubre de 2015 y 2016). Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa

Podemos concluir que la producción de maíz fue adecuada resultando incrementarse en el segundo año con respecto al primero debido a los mejores niveles de fertilidad asociados a un mayor contenido de materia orgánica en el suelo. La combinación de maíz con leguminosas redujo la producción del maíz, siendo más sensible a esta competencia la especie de Chaucho que Huandango cuando hablamos de la producción de planta y más sensible Huandango que Chaucho cuando hablamos de la producción de grano. En todo caso los aportes de nitrógeno en el caso de las mezclas con leguminosas fueron menores, lo que reduce la huella de carbono de la producción con maíz.

4.2.1.2. PRODUCCIÓN COMBINADA DE GRANO DE MAÍZ Y FRIJOL

Los resultados del ANOVA en la variable producción combinada de grano de maíz y frijol, se puede observar en la tabla II del Anexo I en la que se observa que hay un efecto significativo de los tratamientos ($p < 0.01$) y del período de cultivo ($p < 0.01$), pero no de la interacción entre ambos factores.

En la Figura 39 se puede observar que la producción combinada de grano de maíz y frijol se incrementó en el año 2016 con respecto al 2015 en los períodos de cultivo segundo y cuarto, no encontrándose diferencias significativas en el primero y tercero. Este efecto ocurrió en ambas variedades. La mejora edáfica reportada en la mayor parte de las variables edáficas de estudio asociadas a la incorporación del rastrojo y el barbecho mejoran notablemente la producción de del grano de maíz y frijol de forma conjunta. No se encontraron diferencias significativas en la producción de grano maíz+frijol para las dos variedades de estudio, Chaucho y Huandango, cuando se sembraba o no con leguminosas, al contrario de lo ocurrido en la producción de grano de maíz (Figura 38) en donde la producción de grano de maíz se veía incrementada cuando no se empleaban leguminosas. El hecho de que se igualen las

producciones de Chaucho y Huandango con o sin leguminosa nos hace recomendar la leguminosa por el escaso nivel de proteína asociado al maíz, y también porque la leguminosa tiende a mejorar la fertilidad del suelo a medio y largo plazo.

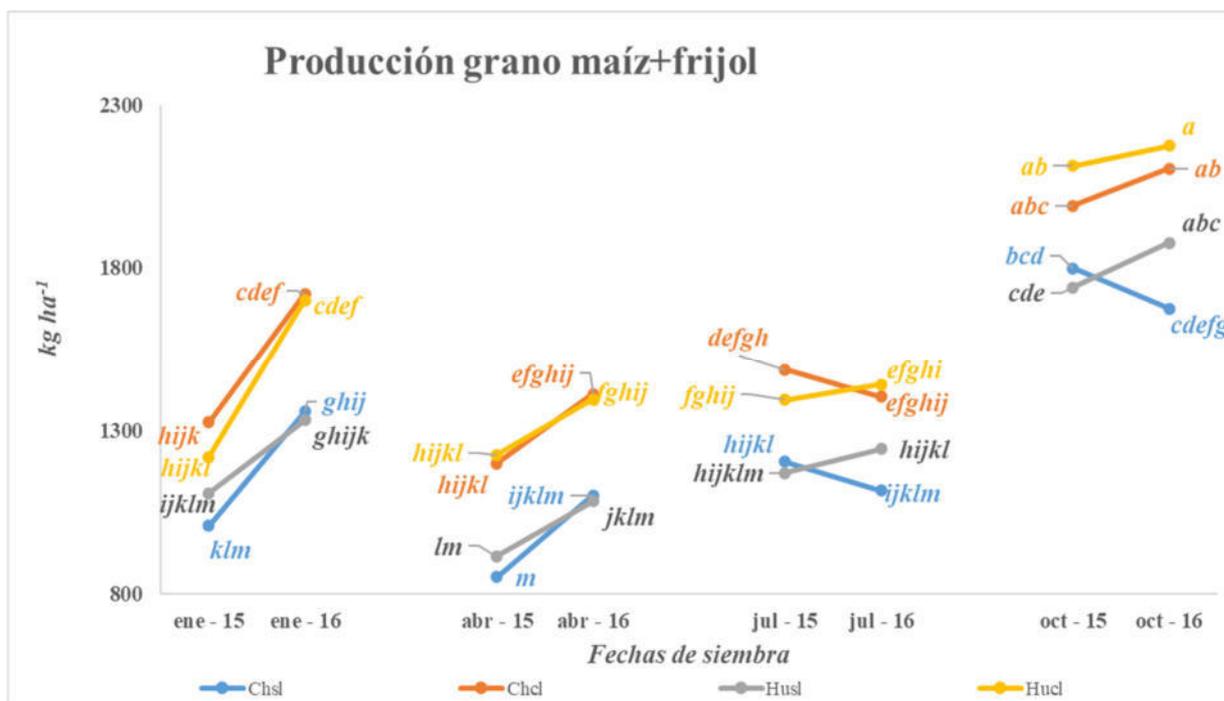


Figura 39 Producción de grano en cada cosecha (enero, abril julio y octubre de 2015 y 2016). Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa.

La mejora edáfica acareada en la mayor parte de las variables climáticas implicó un aumento de la producción conjunta de grano de frijol y maíz en alguna de las cosechas. Las producciones de grano de frijol y maíz se incrementaron notablemente cuando estas dos especies se cultivaron de forma conjunta, a pesar de los menores insumos de nitrógeno, pudiendo contribuir a la mejora de la fertilidad edáfica del suelo a medio y largo plazo.

4.2.1.3. PESO DE 1000 SEMILLAS DE MAÍZ

Los resultados del ANOVA en la variable peso de 1000 semillas de maíz mostraron una interacción significativa de período de cultivo x tratamiento tal y como se puede observar en la Tabla II del Anexo I. Los valores promedio del peso de 1000 semillas varió entre 180,66 y 212,53 gramos. Obando (2019), en su estudio sobre la “Caracterización morfológica de maíz blanco harinoso (*Zea mays* L.)”, un promedio de peso de mil granos de 756,31g, con un peso mínimo de 723,78g y un máximo de 789,56g, resultando presentar nuestras variedades unos valores inferiores a este rango.

En la Figura 40 se aprecia el peso de mil semillas de maíz, que resultó incrementarse en el último período de cultivo tal y como lo hacía la producción de biomasa de maíz. En la variedad Chaucho no se observaron cambios en el peso de mil semillas como consecuencia de la siembra o no con leguminosa, Sin embargo, la siembra de la variedad Huandango en ausencia de leguminosa incrementó el peso de 1000 semillas de esta variedad. Huandango presentó un mayor peso de 1000 semillas que Chaucho en las cosechas de julio y octubre de 2015 si no se

sembraban con leguminosas, si bien no se encontraron diferencias significativas entre las variedades de maíz cuando éstas eran sembradas con leguminosas.

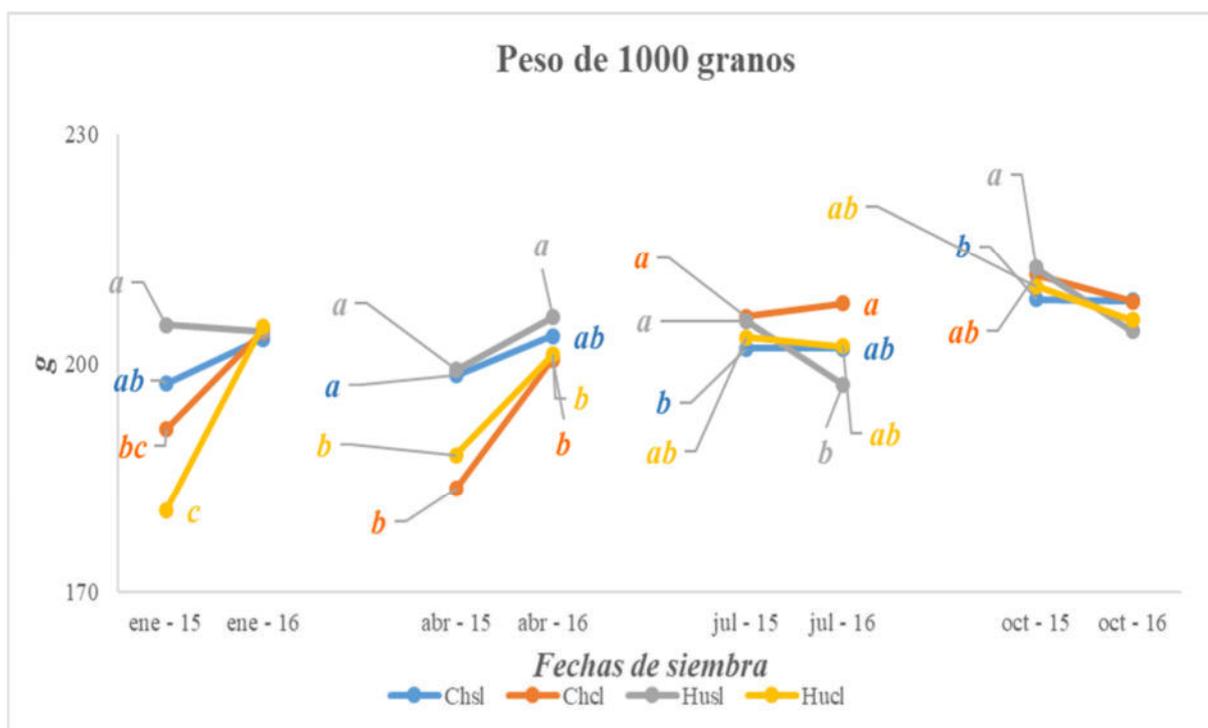


Figura 40 Peso mil semillas de maíz (enero, abril julio y octubre de 2015 y 2016). Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa

El peso de 1000 semillar resultó ser reducido en comparación con otras variedades de maíz, encontrándonos con que la ausencia de siembra con leguminosas puede disminuir el valor del peso de 1000 semillas en la variedad Chaucho.

4.2.2. CALIDAD NUTRITIVA DEL MAÍZ

4.2.2.1. PROTEÍNA

Los resultados del ANOVA en la variable proteína de la planta y grano mostró un efecto significativo de la interacción período de cultivo x tratamientos tal y como se puede observar en la tabla II del Anexo I.

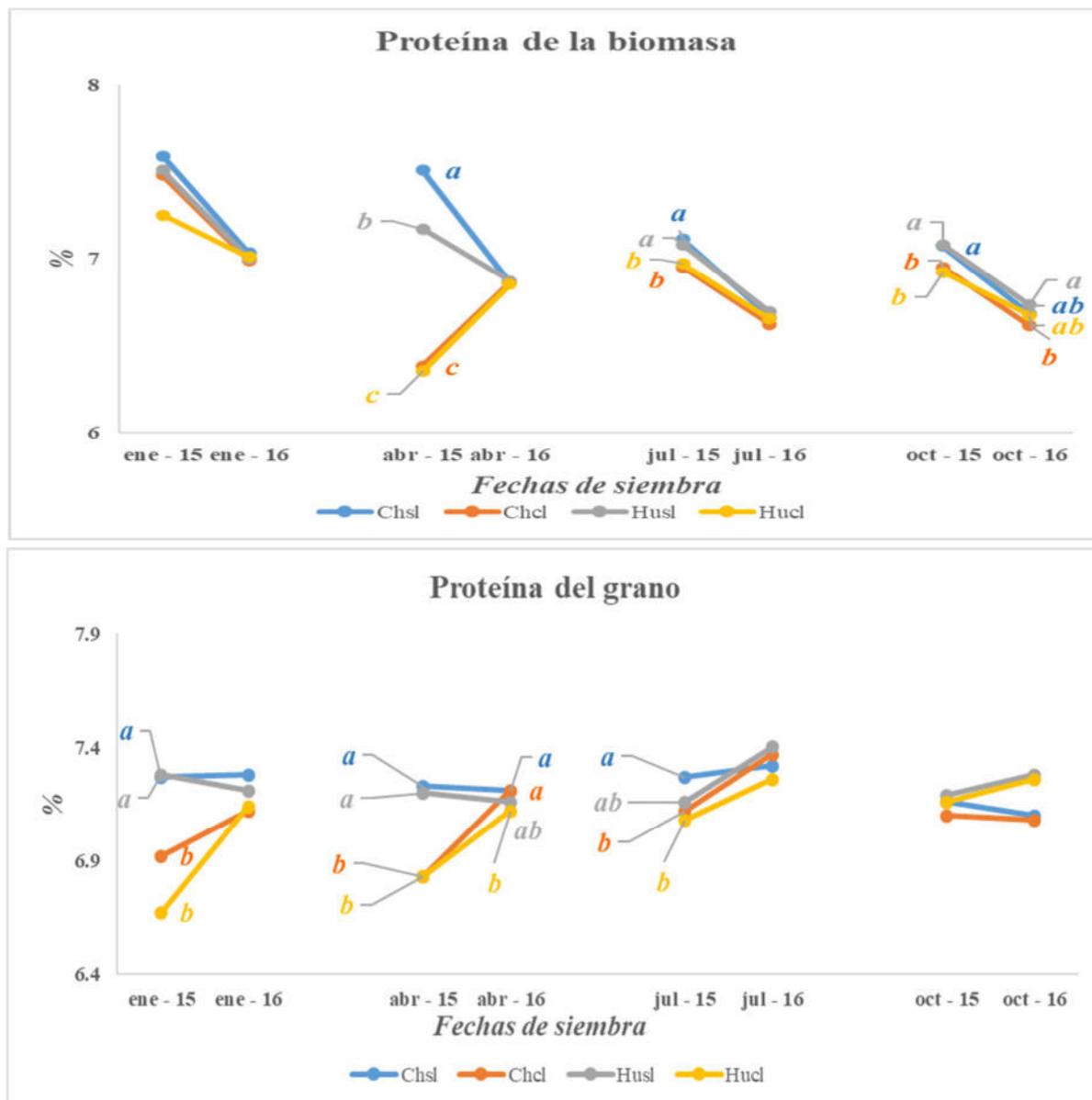


Figura 41 Contenido en proteína de maíz en cada cosecha (enero, abril julio y octubre de 2015 y 2016). Letras indican diferencias significativas entre tratamientos. Ch: Chaucho; Hu: Huandango; cl y sl: con y sin leguminosa

El rango de valores de la variable proteína oscila entre unos mínimos y máximos de 6,35 y 7,59%, respectivamente, siendo más reducidos en el caso del grano (Figura 41). Estos valores de proteína son muy bajos si consideramos su valor proteico, algo que es habitual en la planta de maíz, y obliga, en caso de ser usada como forraje para el ganado a completar con proteína. Esto debería tenerse en cuenta en el caso de siembra conjunta con frijol, que reduciría la necesidad de compra de proteína en forma de soja, por ejemplo, para complementar la ración de los animales. Garay y Cruz (2015), mencionan en su estudio que el maíz tiene bajos contenidos de aceites y proteínas, sin embargo, contienen altos contenidos de hidratos de carbono, lo cual económicamente lo hace más conveniente para acceder a la energía necesaria para elaborar su materia seca, en referencia a otros cultivos. En la variedad Chaucho (INIAP-122) la proporción de proteína descrita es del 9,14% (Guacho, 2014) que es mayor que en el presente estudio

En la Figura 41 también se observa que los niveles de proteína en planta disminuyeron en la cosecha del año 2016 con respecto al 2015, esto se debe a que la producción de biomasa fue mayor, lo que implica por regla general unos menores niveles de proteína en planta. El desarrollo de las variedades Chaucho y Huandango sin leguminosa incrementa el nivel de proteína en planta, probablemente debido al menor desarrollo fenológico cuando se siembra sin leguminosa.

Los niveles de proteína en la biomasa del maíz resultaron ser reducidos y mayores que en el grano. En general en el primer año se observa un efecto significativo negativo del desarrollo de la leguminosa sobre el nivel de proteína en grano y planta tanto en Chaucho como en Huandango, efecto que desaparece en el segundo año, consecuencia probablemente de una introducción de nitrógeno más eficiente en el segundo año.

4.3. MODELIZACIÓN

En la Tabla 18 se observan los bioparámetros del modelo Yield-SAFE resultantes de la calibración del modelo para la producción de biomasa del maíz grano. La mayoría de estos bioparámetros se encuentran dentro de los rangos establecidos como normales para este cultivo en la literatura.

Tabla 18 Bioparámetros utilizados en la calibración del modelo Yield-SAFE para la producción de biomasa de maíz grano.

<i>Bioparámetros</i>	<i>Descripción</i>	<i>Valor</i>
epsc	Crecimiento potencial (g MJ ⁻¹)	5,6
gammac	Agua necesaria para producir 1 g de biomasa (m ³ g ⁻¹)	0,0003
Hlcrop	Índice de cosecha (g g ⁻¹)	0,5
k _c	Coefficiente de extinción de radiación	0,7
(pF _{crit}) _c	Valor crítico de pF para el cultivo (log(cm))	3,2
PWP _c	Punto de marchitez permanente para el cultivo (log(cm))	4,2
SLA	Área foliar específica (m ² g ⁻¹)	0,02

La Figura 42 muestra los resultados de la calibración del modelo Yield-SAFE llevada a cabo con los parámetros indicados en la Tabla 20 para la producción de biomasa del maíz grano de la variedad Chauncho en tres cosechas del año 2015. El modelo Yield-SAFE alcanzó los valores reales de producción de biomasa de la variedad de maíz Chauncho en la mayoría de las cosechas, sobre todo en los días del mes previos a la cosecha del cultivo.

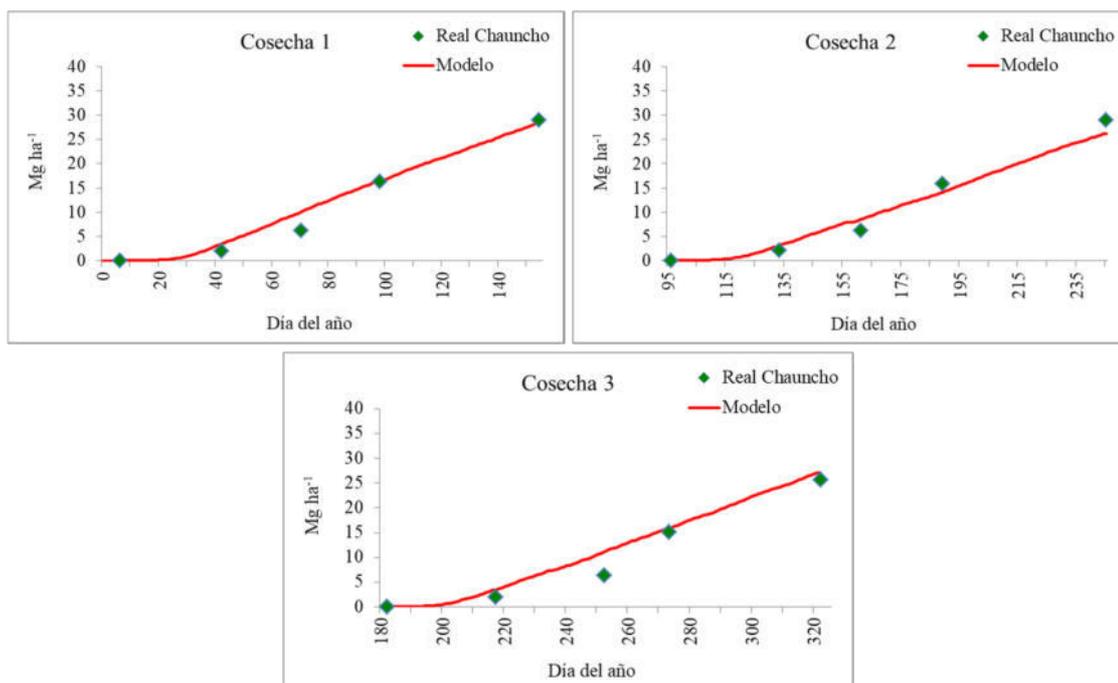


Figura 42 Resultados de la calibración del modelo Yield-SAFE para la producción de biomasa del maíz grano de la variedad Chauncho en tres cosechas del año 2015

En la Figura 43 se pueden ver los resultados de la validación del modelo Yield-SAFE llevada a cabo con los datos de producción de biomasa del maíz grano de la variedad Huandango obtenidos en tres cosechas en el año 2015. Tal y como se observó para la variedad Chauncho, en el caso de la variedad Huandango, el modelo Yield-SAFE también alcanzó los valores reales de producción de biomasa en la mayoría de las cosechas, principalmente debido a que la producción de biomasa obtenida en las dos variedades era muy similar. Por lo tanto, en este estudio el modelo Yield-SAFE fue calibrado y validado con éxito para la producción de maíz grano bajo las condiciones edafoclimáticas de Ecuador. Sin embargo, para poder usar el modelo como una herramienta de gestión en la zona sería necesario validar de nuevo el modelo con datos obtenidos en otras parcelas establecidas en la zona. Además, una vez que el modelo Yield-SAFE es calibrado y validado para un cultivo o una especie forestal, el modelo permite hacer estimaciones de producción y gestión en sistemas agrícolas, forestales y agroforestales bajo diferentes escenarios de cambio climático, utilizando para ello la herramienta CliPick (<http://home.isa.utl.pt/~joaopalma/projects/agforward/clipick/>) que se basa en los escenarios de clima propuestos por el International Panel on Climate Change (IPCC). Actualmente, la herramienta CliPick solo trabaja para países europeos por lo que en este estudio no fue posible establecer escenarios de cambio climático a través del modelo Yield-SAFE. Si embargo, es importante tener en cuenta que el trabajo llevado a cabo en esta tesis con el modelo Yield-SAFE es clave para extender el uso del modelo a zonas del planeta con condiciones edafoclimáticas diferentes a las europeas.

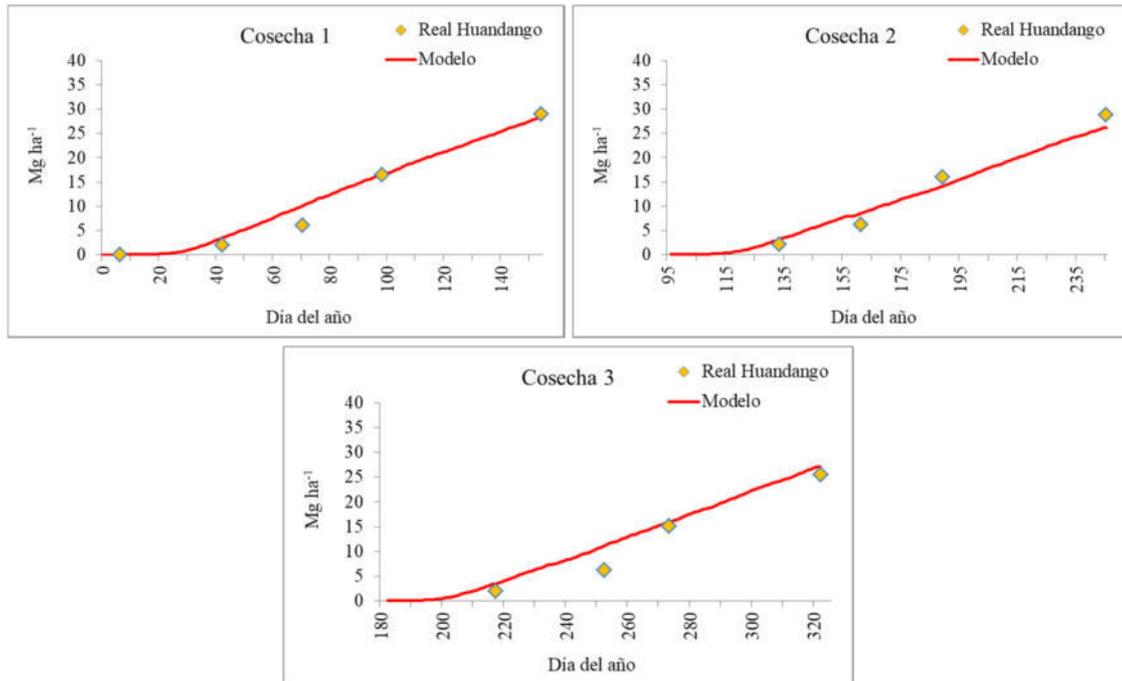


Figura 43 Resultados de la validación del modelo Yield-SAFE para la biomasa del maíz grano de la variedad Huandango en tres cosechas del año 2015

En resumen, el modelo Yield-SAFE fue calibrado y validado para la producción de biomasa de maíz grano en condiciones edafoclimáticas de Ecuador con los datos de biomasa de las variedades Chauncho y Huandango. Sin embargo, una nueva validación del modelo Yield-SAFE es necesaria para poder usar el modelo como una herramienta de gestión en la zona.

5. CONCLUSIONES

El pH del cultivo de maíz, resultó ser muy elevado para los suelos de la zona viéndose afectada levemente modificada por el efecto de los tratamientos, si bien en el período post-cosecha se observan mejora del pH como consecuencia de la incorporación del rastrojo al suelo, la especie Chaucho mostró un mayor efecto sobre el pH que la Huandango.

Los pHs tan elevados probablemente explican los reducidos niveles de **carbono** encontrados en el presente estudio consecuencia de la gestión intensiva del cultivo de maíz con elevados insumos en cuanto a fertilizantes inorgánicos. Al igual que sucedía con el pH el aporte de rastrojos eleva el nivel de carbono y nitrógeno en el suelo y los beneficios asociados al mismo.

La CIC y los elementos principales que la constituyen como el potasio, calcio, el magnesio y sodio se incrementan como resultado de la incorporación de los residuos en el período de post-cosecha (90 días después de la cosecha) y en el año 2016 con respecto al 2015 de forma general, consecuencia del período de barbecho entre cosechas. Estas mejoras edáficas ocasionan una mayor productividad de maíz en el segundo año con respecto al primero.

La combinación de maíz con leguminosas redujo la producción del maíz, siendo más sensible a esta competencia la especie de Chaucho que Huandango cuando hablamos de la producción de planta y más sensible Huandango que Chaucho cuando hablamos de la producción de grano.

La producción de grano de frijol y maíz se incrementó notablemente cuando estas dos especies se cultivaron de forma conjunta, a pesar de los menores insumos de nitrógeno. Esto contribuye a mejorar la sostenibilidad del sistema al aumentar el nivel de proteína del forraje a corto plazo y a la mejora de la fertilidad edáfica del suelo a medio y largo plazo.

Los niveles de proteína en la biomasa del maíz resultaron ser reducidos y mayores que en grano. En general en el primer año se observa un efecto significativo negativo del desarrollo de la leguminosa sobre el nivel de proteína en grano y planta tanto en Chaucho como en Huandango, efecto que desaparece en el segundo año, consecuencia probablemente de una introducción de nitrógeno por parte de la leguminosa de forma más eficiente en el segundo año.

En resumen, el modelo Yield-SAFE fue calibrado y validado para la producción de biomasa de maíz grano en condiciones edafoclimáticas de Ecuador con los datos de biomasa de las variedades Chauncho y Huandango. Sin embargo, una nueva validación del modelo Yield-SAFE es necesaria para poder usar el modelo como una herramienta de gestión en la zona.

6. BIBLIOGRAFÍA

Abadassi, J. (2015). Maize Agronomic Traits Needed in Tropical Zone. *International Journal of Science, Environment*, 4(2), 371–392. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.06.0326>

Acosta, R. (2009). Reseña el cultivo del maíz, su origen y clasificación. *El maíz en cuba. Cultivos Tropicales*, 30(2), 113–120. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/1932/193215047017.pdf>

Agricultura (IICA), I. I. de C. para la, Salvador), M. de A. y G. (El, Salvador), C. N. de T. A. y F. (El, Cooperación, A. S. para el D. y la, & Deras Flores, H. (2020). *Guía técnica: El cultivo de maíz*. 42.

Aguilar, C., Escalante, J., Aguila, I., & Perez, A. (2017). Crecimiento, rendimiento y rentabilidad del maíz VS-535 en función del biofertilizante y nitrógeno. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(12), 475–483. <https://doi.org/10.19136/era.a4n12.1000>

Aguinaga, J. P. (2014). Manejo de Nutrientes por Sitio Específico con dos variedades de maíz (INIAP-122 y Chaucho Guandango), en la provincia de Imbabura. *Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE*, 36–44.

Ahmadi, S. H., Mosallaeepour, E., Akbar Kamgar-Haghighi, A., & Sepaskhah, A. R. (2015). Modeling Maize Yield and Soil Water Content with AquaCrop Under Full and Deficit Irrigation Managements. *Water Resour Manage*, 29, 2837–2853. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0973-3>.

Ahumada, R., Velázquez, G., Flores, E., & Romero, J. (2014). Impactos potenciales del cambio climático en la producción de maíz. *Investigación y Ciencia*, 61, 48–53. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67431579007>

Aita, C., Ceretta, C. A., Thomas, A. L., Pavinato, A., & Bayer, C. (1994). Espécies de inverno como fonte de nitrogênio para o milho no sistema de cultivo mínimo e feijão em plantion direto. *Revista brasileira de ciência do solo*, 18(1).

ANAPO. (2016). Anapo en Cifras. Retrieved from http://anapobolivia.org/images/publicacion_documentos/Anapo en Cifras Diciembre 2016.pdf

Anónimo. (1999). *Popol Vuh: las antiguas historias del Quiché de Guatemala* (octava; Gabriel Silva Rincón, Ed.). Retrieved from <https://www.guao.org/sites/default/files/biblioteca/Popol Vuh.pdf>

AOAC. (2002). *AOAC Official Methods of Analysis*. In Association of Official Agricultural Chemists. Washington, D.C. (Vol. 15th).

Arruda Coelho, M. J., Ruiz Diaz, D., Hettiarachchi, G. M., Dubou Hansel, F., & Pavinato, P. S. (2019). Soil phosphorus fractions and legacy in a corn-soybean rotation on Mollisols in Kansas, USA. *Geoderma Regional*, 18, e00228. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00228>.

Atandi, J. G., Haukeland, S., Kariuki, G. M., Coyne, D. L., Karanja, E. N., Musyoka, M. W., Fiaboe, K. K. M., Bautze, D., & Adamtey, N. (2017). Organic farming provides improved management of plant parasitic nematodes in maize and bean cropping systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 247(April), 265-272. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.07.002>

Badillo, A. (2016). Evaluación del aporte de gallinaza fresca en el rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mais*) variedad Iniap 122, en dosis diferentes, en la parroquia Malchinguí, cantón Pedro Moncayo, Provincia Pichincha [Universidad Nacional de Loja].

Avellaneda L., León, T., Torres, E. (2018). Impact of potato cultivation and cattle farming on physicochemical parameters and enzymatic activities of Neotropical high Andean Páramo ecosystem soils. *Science of the Total Environment*. 631–632: 600–1610.

Baldock, J. O., & Musgrave, R. B. (1980). Manure and Mineral Fertilizer Effects in Continuous and Rotational Crop Sequences in Central New York 1. *Agronomy Journal*, 72(3), 511-518. <https://doi.org/10.2134/agronj1980.00021962007200030024x>

Bao, T., Sun, T., & Sun, L. (2012). Effect of cadmium on physiological responses of wheat and corn to iron deficiency. *Journal of Plant Nutrition*, 35(13), 1937–1948. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.716130>

Bar-Tal, A., Feigenbaum, S., & Sparks, D. L. (1991). Potassium-salinity interactions in irrigated corn. *Irrigation Science*, 12(1), 27-35. <https://doi.org/10.1007/BF00190706>

Basantes, E. (2015). Manejo de cultivos andinos del Ecuador. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Barber, R., Rodríguez, M., Shaw, G. y Van Huystee, R. (1995). Structural influence of calcium on the heme cavity of cationic peanut peroxidase as determined by ¹H-NMR spectroscopy. *Eur. J. Biochem.* 232, 825-833

Basantes, R. (2015). Manejo de cultivos andinos del Ecuador (Primera ed). Retrieved from www.repositorio.espe.edu.ec.

Bayer, C., Mielniczuk, J., & Pavinato, A. (1998). Sistemas de manejo do solo e seus efeitos sobre o rendimento do milho. *Ciência Rural*, 28(1), 23-28. <https://doi.org/10.1590/s0103-84781998000100004>

Bertol, I., Albuquerque, J. A., Leite, D., Amaral, A. J., & Zoldan Junior, W. A. (2004). Physical soil properties of conventional tillage and no-tillage, in crop rotation and succession, compared with natural pasture. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 28(1), 155-163. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832004000100015>

Bhattarai, M., Secchi, S., & Schoof, J. (2017). Projecting corn and soybeans yields under climate change in a Corn Belt watershed. *Agricultural Systems*, 152, 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.12.013>

Bleiholder, H., Buhr, L., Feller, C., Hack, H., Hess, M., Klose, R., ... Weber, E. (1998). Compendio para la identificación de los estadios fenológicos de especies mono- y dicotiledóneas cultivadas escala BBCH extendida. Aktiengesellschaft, Postfach 120, D-67114 Limburgerhof. Alemania: BASF.

Blevins, R. L., Thomas, G. W., Smith, M. S., Frye, W. W., & Cornelius, P. L. (1983). Changes in soil properties after 10 years continuous non-tilled and conventionally tilled corn. *Soil and Tillage Research*, 3(2), 135-146. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(83\)90004-1](https://doi.org/10.1016/0167-1987(83)90004-1)

Bloodnick, E. (2021). La función del sodio y del cloruro en el cultivo de plantas | PRO-MIX. <https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/la-funcion-del-sodio-y-del-cloruro-en-el-cultivo-de-plantas/>

Boada, R., & Espinosa, J. (2016). Factores que limitan el potencial de rendimiento del maíz de polinización abierta en campos de pequeños productores de la Sierra de Ecuador. *Siembra*, 3(2016), 67–82.

Bracco, M., Cascales, J., Hernández, J. C., Poggio, L., Gottlieb, A. M., Lia, V. V., ... Stuber, C. (2016). Dissecting maize diversity in lowland South America: genetic structure and geographic distribution models. *BMC Plant Biology*, 16(1), 186. <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0874-5>

Bradley, N. L., Carl Leopold, A., Ross, J., & Huffaker, W. (1999). Phenological changes reflect climate change in Wisconsin. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 96, 9701–9704. Retrieved from www.pnas.org.

Brian, M., & Hazelton, P. (2016). *Interpreting Soil Test Results: What Do All the Numbers Mean?* (C. Publishing, Ed.).

Bueno, A. (1979). Leaf area estimation, growth analysis, and yield evaluation in grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench.) (Iowa State University). Retrieved from <https://lib.dr.iastate.edu/rtd/7268>.

Buol, W., F. Hole, R.J. MacCracken. 1980. Soil genesis and classification, 2d ed. The Iowa State University Press, Ames, Iowa.

Burbano, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 34(1), 82–96. <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.85>.

Cacciavillani, M., Capaldi, G., Salvadori, A., & Valfre, G. (2017). Evaluación del impacto de prácticas de manejo sobre el rendimiento del cultivo de maíz. Retrieved from [https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/6012/Cacciavillani - Capaldi - Salvadori - Valfre. Evaluación del impacto de prácticas...pdf?sequence=1](https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/6012/Cacciavillani%20-%20Capaldi%20-%20Salvadori%20-%20Valfre%20Evaluacion%20del%20impacto%20de%20practicas...pdf?sequence=1).

Cáceres, L. (2013). Determinación de Materia Orgánica en Suelos y Sedimentos. Procedimiento operativo estándar. In *Química Análítica Aplicada Inorgánica QMC-613*.

- Caires, E. F., Itacir, Feldhaus, C., Barth, G., Fernando, & Garbuio, J. (2002). Lime and gypsum for wheat crop lime and gypsum application on the wheat crop. En *Scientia Agricola*, v (Vol. 59, Número 2).
- Campos, M., Herrador, D., Manuel, C., & McCall, M. (2013). Estrategias de Adaptación al cambio climático en dos comunidades rurales de México y el Salvador. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, (61), 329–350.
- Candelaria, B., Ruíz, O., Gallardo, F., Pérez, P., Martínez, A., & Vargas, L. (2011). Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión. In *Tropical and Subtropical Agroecosystems* (Vol. 14). Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n3/v14n3a4.pdf>
- Carpio, C., Escalante, J., & Aguilar, I. (2015). Análisis de crecimiento y rendimiento de maíz en clima cálido en función del genotipo, biofertilizante y nitrógeno. *Terra latinoamericana*, 33(1), 51–62. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/573/57335800004.pdf>
- Carrillo, C. (2009). El origen del maíz naturaleza y cultura en Mesoamérica. *Ciencias*, 92–93, 4–13. Retrieved from <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=64412119003>
- Carvalho, J. L. N., Avanzi, J. C., Silva, M. L. N., de Mello, C. R., & Cerri, C. E. P. (2010). Potential of soil carbon sequestration in different biomes of Brazil. En *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* (Vol. 34, Número 2, pp. 277-289). *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832010000200001>
- Caselles, A. (2008). Modelización y Simulación de Sistemas Complejos. Publicacions de la Universitat de València.
- Castillo, M., Rojas-Bourrillón, A., & WingChing-Jones, R. (2009). Valor nutricional del ensilaje de maíz cultivado en asocio con vigna (*Vigna radiata*). *Agronomía Costarricense*, 33(1), 133–146. <https://doi.org/0377-9424 / 2009>
- Castro, P., González, A., Prada, D. 1990. Determinación simultánea de nitrógeno y fósforo en muestras de pradera. XXX Reunión científica de la Sociedad Española para el Estudio de los Pastos: 200-207
- CEPAL. (2013). Impactos potenciales del cambio climático sobre los granos básicos en Centroamérica. Mexico, D.F.
- Cerliani, C., Esposito, G., Morla, F., Balboa, G., & Naville, R. (2018). Relación entre la densidad óptima agronomica y el número de granos por planta en maíz (*Zea Mays* L.). *European Scientific Journal*, 14(9), 29–45. <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n9p29>
- Cervantes, L. (2015). Modelización matemática Principios y aplicaciones (Primera ed). <https://doi.org/10.6084/M9.FIGSHARE.2061504>
- Chang, S., & Zhang, Y. (2017). Protein Analysis. In D. R. Heldman (Ed.), *Food Analysis* (pp. 315–331). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45776-5>

Chimonyo, V., Thembinkosi, A., & Mabhaudhi, T. (2015). Perspective on crop modelling in the management of intercropping systems. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61(11), 1511–1529. <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1017816>

Choudhary, M., Jat, H. S., Datta, A., Yadav, A. K., Sapkota, T. B., Mondal, S., Meena, R. P., Sharma, P. C., & Jat, M. L. (2018). Sustainable intensification influences soil quality, biota, and productivity in cereal-based agroecosystems. *Applied Soil Ecology*, 126(February), 189-198. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.02.027>

CIMMYT. (1997). I Curso Internacional Sobre Diagnóstico y Enfermedades en Maíz Seminario Taller de Cosecha de Maíces de la Zona Andina (p. 86). p. 86. Retrieved from <http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/4968/1/095.pdf>

Corwin, D. L., & Lesch, S. M. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1-3 SPEC. ISS.), 11-43. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.10.005>

Corwin, D. L., & Plant, R. E. (2005). Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture. En *Computers and Electronics in Agriculture* (Vol. 46, Números 1-3 SPEC. ISS., pp. 1-10). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.10.004>

Costa, N. R., Andreotti, M., Mascarenhas Lopes, K. S., Yokobatake, K. L., Ferreira, J. P., Pariz, C. M., Dos Batista Bonini, C. S., & Longhini, E. V. Z. (2015). Atributos do solo e acúmulo de carbono na integração lavoura-pecuária em sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 39(3), 852-863. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140269>

Crane, T. A. (2014). Bringing science and technology studies into agricultural anthropology: Technology development as cultural encounter between farmers and researchers. *Culture, Agriculture, Food and Environment*, 36(1), 45–55. <https://doi.org/10.1111/cuag.12028>

Cruz, O. (2013). Manual para el cultivo de maíz en Honduras. DICTA" Published on the Internet:". <http://www.dicta.hn/files/2013,-Manual-cultivo-de-maiz--G.pdf>. 2013

D.G.G.M. (1980). Mapa Geológico del Ecuador Hoja 82 CT-ÑII-D (p. 1). p. 1. Quito Ecuador: Dirección General de Geología y Minas.

Da Silva, T. O., & Menezes, R. S. C. (2007). Organic fertilization of potato with manure and, or, *Crotalaria juncea*. II - Soil N, P, and K availability throughout the growing season. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 31(1), 51-61. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832007000100006>.

Dalal, R. C., Henderson, P. A., & Glasby, J. M. (1991). Organic matter and microbial biomass in a vertisol after 20 yr of zero-tillage. *Soil Biology and Biochemistry*, 23(5), 435-441. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(91\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(91)90006-6)

De la Fuente, E., & Suárez, S. (2008). Problemas ambientales asociados a la actividad humana: la agricultura. *Ecología Austral*, 18, 239–252. Retrieved from <http://www.scielo.org.ar/pdf/ecoaus/v18n3/v18n3a01.pdf>

De Oliveira, F. L., Ribas, R., & Modesto, R. (2002). Uso do pré-cultivo de crotalaria juncea e de doses crescentes de «cama» de aviário na produção do repolho sob manejo orgânico. *Agronomia*, 37(2), 60-66.

Delgado, R., Escalante, J., Díaz, R., Trinidad, A., Morales, E., & Sosa, E. (2014). Defoliación en maíz y su efecto sobre el rendimiento de frijol-maíz en asociación. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(6), 1015–1027. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v5n6/v5n6a9.pdf>

De Souza, L. R. y D. O. González. 2001. Modelo de desarrollo sustentable en una comunidad rural. Grupo para promover la educación y el desarrollo rural A.C. México, D.F.

Díaz, G., Sabando, F., Zambrano, S., & Vásquez, G. (2009). Evaluación productiva y calidad del grano de cinco híbridos de maíz (*Zea mays* L.) en dos localidades de la provincia de Los Ríos. *Ciencia y Tecnología*, 15–23.

Dokoochaki, H., Gheysari, M., Mousavi, S.-F., Zand-Parsa, S., Miguez, F. E., Archontoulis, S. V., & Hoogenboom, G. (2016). Coupling and testing a new soil water module in DSSAT CERES-Maize model for maize production under semi-arid condition. *Agricultural Water Management*, 163, 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.002>.

du Plessis, J. (2003). Maize production. Retrieved from www.nda.agric.za/publications.

Duque, D., Acurio, C., Chimbolema, S., & Aguirre, X. (2016). Análisis del carbono secuestrado en humedales altoandinos de dos áreas protegidas del Ecuador. *Ecología Aplicada*, 15(2), 2016. <https://doi.org/10.21704/rea.v15i2.756>

Ebelhar, S. A., Frye, W. W., & Blevins, R. L. (1984). Nitrogen from Legume Cover Crops for No-Tillage Corn 1. *Agronomy Journal*, 76(1), 51-55. <https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600010014x>

Echeverría, J., & Muñoz, C. (1988). Maíz: Regalo de los Dioses. Retrieved from <http://www.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/54445.pdf>

Endicott, S., Brueland, B., Keith, R., Schon, R., Bremer, C., Farnham, D., DeBruin, J., Clausen, C., Strachan, S., & Carter, P. (2015). Maíz, crecimiento y desarrollo. DuPont Pioneer.

Espinosa, E., Mendoza, M. C., & Ortiz, J. (2004). Rendimiento de grano y sus componentes en poblaciones prolíficas de maíz, en dos densidades de siembra. In *Revista Fitotecnia Mexicana* (Vol. 27). Retrieved from <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/27-1Especial1/8a.pdf>

Espinoza, L., Slaton, N., & Mozaffari, M. (2012). Como Interpretar los Resultados de los Análisis de Suelos. Cooperative Extension Service, University of Arkansas, US Department of Agriculture, and county governments cooperating. *Agricultura y recursos naturales*, 1-4.

Fageria, N. K., & Nascente, A. S. (2014). Management of soil acidity of South American soils for sustainable crop production. En *Advances in Agronomy* (Vol. 128). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802139-2.00006-8>

Falconí, F., Ramos-Martin, J., & Cango, P. (2017). Caloric unequal exchange in Latin America and the Caribbean. *Ecological Economics*, 134, 140–149. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.01.009>

FAO. (2017). El futuro de la alimentación y la agricultura. Tendencias y desafíos. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i6881s.pdf>

Fassio, A., Carriquiry, A., Tojo, C., & Romero, R. (1998). Maíz, aspectos sobre la fenología. Unidad de Difusión de Información Tecnológica del INIA.

Fassio, A., Carriquiry, A., Tojo, C., & Romero, R. (1998). Maiz: Aspectos sobre fenología (INIA, Ed.). Retrieved from <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2844/1/111219240807135855.pdf>

Fernandes, L. A., Furtini Neto, A. E., Vasconcellos, C. A., & Guedes, G. A. A. (1998). Preparo do solo e adubação nitrogenada na produtividade do milho em latossolo sob vegetação de cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22(2), 247-254. <https://doi.org/10.1590/s0100-06831998000200010>

Fernández, L., Rojas, N., Roldán, T., Ramíerez, M., Zegarra, H., Hernández, R., ... Arce, J. (2006). Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados (Instituto Mexicano del Petróleo. Secretaría de Medio Ambiente Y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, Ed.). Retrieved from <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CG008215.pdf>

Fernández, M. (2013a). Efectos del cambio climático en el rendimiento de tres cultivos mediante el uso del Modelo AquaCrop. Retrieved from http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Informe+Final+_Efectos+del+CC+en+el+rendimiento+de+cultivos+agrícolas.pdf/77713cce-eef6-4eb9-9ad6-02985c72b76b

Fernández, M. (2013b). Efectos del cambio climático en la producción y rendimiento de cultivos por sectores: evaluación del riesgo agroclimático por sectores. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Efectos+del+Cambio+Climatico+en+la+agricultura.pdf/3b209fac-f078-4823-afa0-1679224a5e85>

Filho, J. T., & Tessier, D. (2009). Characterization of soil structure and porosity under long-term conventional tillage and no-tillage systems. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 33(6), 1837-1844. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832009000600032>

- FIRA. (2016). Maíz 2016. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200637/Panorama_Agroalimentario_Ma_z_2016.pdf
- Fleming, A. A., Giddens, J. E., & Beaty, E. R. (1981). Corn Yields as Related to Legumes and Inorganic Nitrogen 1. *Crop Science*, 21(6), 977-980. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100060041x>
- Flores, H.; Ojeda, W.; Flores, H.; Sifuentes, E.; Mejía, E. (2013). Simulación del rendimiento de maíz (zea mays l.) en el norte de sinaloa usando el modelo aquacrop. *Agrociencia*, 47, 347–359. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v47n4/v47n4a4.pdf>
- Foster, T., Brozović, N., Butler, A. P., Neale, C. M. U., Raes, D., Steduto, P., ... Hsiao, T. C. (2017). AquaCrop-OS: An open-source version of FAO's crop water productivity model. *Agricultural Water Management*, 181, 18–22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.11.015>
- Fuentes, J., & Garcia, G. (1999). *Técnicas de Riego - Sistemas de riego en la agricultura (Primera)*. Mexico, D.F.: Mundi Prensa México, S.A. de C.V.
- Fuentes-Yagüe, J. (1995). *El suelo y los fertilizantes*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario. Ed. Mundi-Prensa.
- Fundación Chile. (2011). *Manual de recomendaciones cultivo de maíz grano*. chrome-extension://oemmnadbldboiebnladdacbfmadadm/https://www.indap.gob.cl/docs/default-source/default-document-library/cultivo-maiz-de-grano.pdf?sfvrsn=0
- GAD-I. (2015). *Actualización plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón ibarra 2015-2023*. Retrieved from <https://www.ibarra.gob.ec/web/index.php>
- Garay, J., & Cruz, J. (2015). *El cultivo de maíz en San Luis*. INTA Ediciones. Información Técnica 188. EEA INTA San Luis. ISSN 0327-425X/ Marzo.
- García, F., & Díaz-Zorita, M. (2015). *La fertilidad de los suelos y el uso de nutrientes en la producción agrícola extensiva de Argentina*. Retrieved from <http://dev.sjia.gov.ar/>
- García, M., Treto, E., & Alvarez, M. (2000). Los abonos verdes: Una alternativa para la economía del nitrógeno en el cultivo de la papa: I. Estudio comparativo de diferentes especies. *Cultivos Tropicales*, 21(1), 13–19.
- Garrido, Ma. S. (1994). *Interpretación de análisis de suelos (Vol. 5)*. Rivadeneyra, S.A.
- Gidey, T. (2016). Using Yield-SAFE model to assess climate change impact on yield of coffee (*Coffea arabica*) under agroforestry and monoculture systems Mediterranean Forestry and Natural Resources Management (Universidad de Lisboa). Retrieved from https://www.repository.utl.pt/bitstream/10400.5/13004/1/Final_theis_tesfay_gidey_bezabeh_CD.pdf

Giménez, L. (2017). Respuesta del maíz y la soja a diferentes disponibilidades hídricas en distintas etapas de desarrollo. *Agrociencia Uruguaya*, 21(2), 77–90.

Gorenstein, S., & Ortiz, R. (2018). Natural resources and primary sector-dependent territories in Latin America. *Natural resources and primary sector-dependent territories in Latin America. Area Development and Policy*, 3(1), 42–59. <https://doi.org/10.1080/23792949.2018.1431555>

Guerrero, A. (1996). *El suelo, los abonos y la fertilización de los cultivos*. Ediciones Mundi-Prensa, Bilbao, España. 206p.

Granados, R., & Sarabia, A. (2013). Cambio climático y efectos en la fenología del maíz en el DDR-Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícola*, 4(3), 435–446.

Graves AR, Burgess PJ, Palma JHN, Herzog F, Moreno G, Bertomeu M, Dupraz C, Liagre F, Keesman K, van der Werf W, de Nooy K, van den Briel JP (2007) Development and application of bioeconomic modelling to compare silvoarable, arable, and forestry systems in three European countries. *Ecol. Eng.* 29: 434–449.

Graves AR, Burgess PJ, Palma J, Keesman KJ, van der Werf W, Dupraz C, van Keulen H, Herzog F, Mayus M (2010) Implementation and calibration of the parameter-sparse Yield-SAFE model to predict production and land equivalent ratio in mixed tree and crop systems under two contrasting production situations in Europe. *Ecol. Model.* 221: 1744-1756.

González, B., Torres, E., Giunta, I., Muñoz, J. & Díaz, G. (2007). Respuestas campesinas frente a la apertura comercial: evaluación situacional de la agricultura a nivel de pequeños productores en la zona central de la Costa ecuatoriana. *Los Ríos*, Ecuador:

Groffman, P. M., Hendrix, P. F., & Crossley, D. A. (1987). Nitrogen dynamics in conventional and no-tillage agroecosystems with inorganic fertilizer or legume nitrogen inputs. *Plant and Soil*, 97(3), 315-332. <https://doi.org/10.1007/BF02383222>

Guacho, E. (2014). Caracterización agro-morfológica del maíz (*Zea mays* l.) de la localidad San José de Chazo [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <chrome-extension://oemmnadbldboiebfnladdacbfmadadm/https://core.ac.uk/download/pdf/234574936.pdf>

Guamán, R. N. G., Vera, T. X. D., abril, Á. F. V., Cortázar, S. M. U., & Salguero, E. J. R. (2020). Evaluación del desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) utilizando cuatro híbridos. *Siembra*, 7(2), 047–056. <https://doi.org/10.29166/siembra.v7i2.2196>

Hamid Ahmadi, S., Mosallaeepour, E., Akbar Kamgar-Haghighi, A., & Reza Sepaskhah, A. (2015). Modeling Maize Yield and Soil Water Content with AquaCrop Under Full and Deficit Irrigation Managements. *Water Resour Manage*, 29, 2837–2853. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0973-3>

Hart, T. (2016). Ancient Agriculture in Agricultural Education. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Thomas_Hart3/publication/308513173_Ancient_Agricul

[ture_in_Agricultural_Education/links/57e52a8b08ae9022415a40b9/Ancient-Agriculture-in-Agricultural-Education.pdf](#)

Heckman, J. R., & Kamprath, E. J. (1992). Potassium Accumulation and Corn Yield Related to Potassium Fertilizer Rate and Placement. *Soil Science Society of America Journal*, 56(1), 141. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600010022x>

Hernández, C., Martínez, J., & Calvete, H. (2011). Modelos para la simulación dinámica del Crecimiento y desarrollo de pastos. *Pastos*, 41 (2) (January), 127–162.

Hernández, N., Soto, F., & Caballero, A. (2009). Modelos de simulación de cultivos: Características y usos. *Cultivos Tropicales*, 30(1), 73–82. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3356.1207>

Hidalgo, G. (2018). Evaluación morfológica y fisiológica de arquetipos de maíz [Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas].

Hodges, T., Botner, D., Sakamoto, C., & Hays Haug, J. (1987). Using the CERES-MAIZE model to estimate production for the U.S. cornbelt. *Agricultural and Forest Meteorology*, 40, 293–303.

Huang, X., Huang, G., Yu, C., Ni, S., & Yu, L. (2017). A multiple crop model ensemble for improving broad-scale yield prediction using Bayesian model averaging. *Field Crops Research*, 211, 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.06.011>

Humberto Souza, L., Ferreira Novais, R., Hugo Alvarez, V. V., & Mercês de Albuquerque Villani, E. (2010). Efeito do ph do solo rizosférico e não rizosférico de plantas de soja inoculadas com bradyrhizobium japonicum na absorção de boro, cobre, ferro, manganês e zinco (1). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34(5), 1641-1652.

Humblot, P., Jayet, P. A., & Petsakos, A. (2017). Farm-level bio-economic modeling of water and nitrogen use: Calibrating yield response functions with limited data. *Agricultural Systems*, 151, 47–60. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.11.006>

Hwang, C., Correll, M. J., Gezan, S. A., Zhang, L., Bhakta, M. S., Vallejos, C. E., ... Jones, J. W. (2017). Next generation crop models: A modular approach to model early vegetative and reproductive development of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L). *Agricultural Systems*, 155, 225–239. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.10.010>

IBPGR (Ed.). (1991). Descriptors for Maize. Retrieved from https://www.biodiversityinternational.org/fileadmin/user_upload/online_library/publications/pdfs/104.pdf

Ibrikli, H., Uiger, A. C., Cakir, B., Buyuk, G., & Guzel, N. (2008). Modeling Approach to Nitrogen Uptake by Field-Grown Corn. *Journal of plant nutrition*, 21(9), 1943–1954. <https://doi.org/10.1080/01904169809365535>

Inagaki, T. M., de Moraes Sá, J. C., Caires, E. F., & Gonçalves, D. R. P. (2017a). Why does carbon increase in highly weathered soil under no-till upon lime and gypsum use? *Science of*

The Total Environment, 599-600, 523-532.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.04.234>

Inagaki, T. M., de Moraes Sá, J. C., Caires, E. F., & Gonçalves, D. R. P. (2017b). Why does carbon increase in highly weathered soil under no-till upon lime and gypsum use? *Science of The Total Environment*, 599-600, 523-532.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.04.234>

INEC, I. N. de E. y C. (2017). Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua. Retrieved June 13, 2018, from Estadísticas Agropecuarias website:
<http://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/>

INIAP. (2003). Catálogo de Recursos Genéticos de Maíces de Altura Ecuatorianos (Carlos Yáñez G.; José Luis Zambrano M.; Marlon Caicedo V.; Victor H. Sánchez A.; Jorge Heredia, Ed.). Retrieved from
<http://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/handle/41000/43/iniapsc201.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

INIAP. (2004). INIAP 426 Canario “Siete Colinas” (p. 2). p. 2. Quito.

INIAP. (2008). Estado de los Recursos Fitogenéticos para la Agricultura y la Alimentación en Ecuador. A mas uso mas conservación. Retrieved from [http://www.fao.org/pgrfa-gpa-archive/ecu/archivos/Informe 2008 Plan de Accion Mundial Ecuador.pdf](http://www.fao.org/pgrfa-gpa-archive/ecu/archivos/Informe%202008%20Plan%20de%20Accion%20Mundial%20Ecuador.pdf)

INIAP. (2011). Manejo integrado del cultivo de maíz de altura (p. 56). p. 56. Retrieved from
<http://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/3302/1/iniapscpm190.pdf>

Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias. (1990). Información técnica de la variedad de maíz INIAP-122 “Chaucho mejorado”, para la Provincia de Imbabura.

Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias. (1997). Variedad de maíz amarillo harinoso precoz para la Provincia de Imbabura.

INTA. (2018). Maiz Actualización 2018. Retrieved from
https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_maiz_actualizacion2018_eeamj.pdf

Intagri. (2018). El Índice de Área Foliar (IAF) y su Relación con el Rendimiento del Cultivo de Maíz | Intagri S.C. <https://www.intagri.com/articulos/cereales/el-indice-de-area-foliar-iaf>

Intriago, R., Gortaire Amézcu, R., Bravo, E., & O’connell, C. (2017). Agroecology in Ecuador: historical processes, achievements, and challenges. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 41(3–4), 311–328. <https://doi.org/10.1080/21683565.2017.1284174>

Intergovernmental Panel On Climate Change. IPCC (2021). WHO, UNEP. Headline Statements from the Summary for Policymakers. Sixth Assessment reporte. Working Group I- The Physical Science Basis

IPNI. (2002). Archivos agronómicos No. 3 Requerimientos nutricionales de los cultivos (pp. 1–4). pp. 1–4. Retrieved from [http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/0B4CDA48FABB666503257967007DD076/\\$FILE/AA_3.pdf](http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/0B4CDA48FABB666503257967007DD076/$FILE/AA_3.pdf)

Izquierdo, R. (2012). Evaluación del cultivo de maíz (*Zea mays*), como complemento a la alimentación de bovinos de leche en épocas de escasez de alimento. Cayambe—Ecuador [Universidad Politécnica Salesiana].

Jing, Q., Shang, J., Huffman, T., Qian, B., Pattey, E., Liu, J., ... Tremblay, N. (2017). Using the CSM-CERES-Maize model to assess the gap between actual and potential yields of grain maize. *Journal of Agricultural Science*, 155(2), 239–260. <https://doi.org/10.1017/S0021859616000290>

Johnston, R. Z., Sandefur, H. N., Bandekar, P., Matlock, M. D., Haggard, B. E., & Thoma, G. (2015). Predicting changes in yield and water use in the production of corn in the United States under climate change scenarios. *Ecological Engineering*, 82, 555–565. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.05.021>

Jones, C. A., Dyke, P. T., Williams, J. R., Kiniry, J. R., Benson, V. W., & Griggs, R. H. (1991). EPIC: An operational model for evaluation of agricultural sustainability. *Agricultural Systems*, 37(4), 341–350. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(91\)90057-H](https://doi.org/10.1016/0308-521X(91)90057-H)

Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., ... Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. In *European Journal of Agronomy* (Vol. 18). [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)

Kai-lou, L., Ya-zhen, L., Li-jun, Z., Yan, C., Qing-hai, H., Xi-chu, Y., & Da-ming, L. (2018). Comparison of crop productivity and soil microbial activity among different fertilization patterns in red upland and paddy soils. *Acta Ecologica Sinica*, 38(3), 262–267. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2017.08.003>

Kamali, B., Abbaspour, K. C., Lehmann, A., Wehrli, B., & Yang, H. (2018). Uncertainty-based auto-calibration for crop yield – the EPIC+procedure for a case study in Sub-Saharan Africa. *European Journal of Agronomy*, 93(May 2017), 57–72. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.10.012>

Kapetanaki, G., & Rosenzweig, C. (1997). Impact of climate change on maize yield in central and northern Greece: A simulation study with CERES-MAIZE. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 1, 1, 251–271.

Kato, T., Mapes, C., Mera, L., Serratos, J., & Bye, R. (2009). Origen y diversificación del maíz: una revisión analítica. (Primera Ed; U. N. A. de México, Ed.). Mexico, D.F.: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

Keating, B. A., Carberry, P. S., Hammer, G. L., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzworth, D., Smith, C. J. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems

simulation. *European Journal of Agronomy*, 18, 267–288. Retrieved from www.apsim-help.tag.csiro.au

Kheng, L., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T., & Steduto, P. (2009). Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 488–498. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0029xs>

Kumar, M., & Kumar, P. (2011). Guía para la identificación y el manejo de la deficiencia de nutrientes en cereales. Retrieved from http://conservacion.cimmyt.org/es/component/docman/doc_view/2185-guia-para-la-identificacion-y-manejo-de-la-deficiencia-de-nutrientes-y-cereales

Kumar, S. N., & Singh, C. P. (2001). Growth analysis of maize during long and short duration crop seasons: influence of nitrogen source and dose. *Indian J. Agric*, 35(1), 13–18.

Lassaletta, L., & Rovira, J. (2005). Agricultura industrial y cambio global. *El Ecologista*, (45), 52–55. Retrieved from <http://www.globalizate.org/documents/Agriculturaintensivaycambiloglobal.pdf>

Leng, G., & Gan, J. (2017). Recent changes in county-level corn yield variability in the United States from observations and crop models. *Science of the Total Environment*, 607, 683–690. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.017>

León –Tapia, D. Mosquera-Losada, M.R. Roca-Perez, L. (2020). Biodiversidad microbiana y almacenamiento de carbono en suelos con distinto uso en la provincia de Carchi (República de Ecuador) Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela

Liang, B. C., & Mackenzie, A. F. (1992). Changes in soil organic carbon and nitrogen after six years of corn production. *Soil Science*, 153(4), 307–313. <https://doi.org/10.1097/00010694-199204000-00007>

Luedeling, E., Smethurst, P. J., Baudron, F., Bayala, J., Huth, N. I., van Noordwijk, M., ... Sinclair, F. L. (2016). Field-scale modeling of tree-crop interactions: Challenges and development needs. *Agricultural Systems*, 142, 51–69. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.11.005>

Machado, R., & Serralheiro, R. (2017). Soil Salinity: Effect on Vegetable Crop Growth. Management Practices to Prevent and Mitigate Soil Salinization. *Horticulturae*, 3(2), 30. <https://doi.org/10.3390/horticulturae3020030>

Magaia, E., Famba, S., Wesström, I., Brito, R., & Joel, A. (2017). Modelling maize yield response to plant density and water and nitrogen supply in a semi-arid region. *Field Crops Research*, 205, 170–181. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.025>

MAGAP. (2016). La política agropecuaria ecuatoriana: hacia el desarrollo territorial rural sostenible: 2015-2025 I Parte. Retrieved from <http://www.competencias.gob.ec/wp-content/uploads/2017/06/01PPP2016-POLITICA01.pdf>

- Mallarino, P. (2022). Interpreting results of the Mehlich-3 ICP Soil Phosphorus test. <https://crops.extension.iastate.edu/encyclopedia/interpreting-results-mehlich-3-icp-soil-phosphorus-test>
- Mansilla, P. (2018). Evaluación del valor nutricional de maíces especiales (*Zea mays* L.): Selección para calidad agroalimentaria [Universidad Nacional de Córdoba].
- Manziona, R. L., & Zimback, C. R. L. (2011). Análise espacial multivariada aplicada na avaliação da fertilidade do solo. *Revista engenharia na agricultura - reveng*, 19(3), 227-235. <https://doi.org/10.13083/reveng.v19i3.181>
- Marín-González, O., Parsons, D., Arnes-Prieto, E., & Díaz-Ambrona, C. G. H. (2018). Building and evaluation of a dynamic model for assessing impact of smallholder endowments on food security in agricultural systems in highland areas of central America (SASHACA). *Agricultural Systems*, 164(May), 152–164. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.02.005>
- Martelo, M. T. (1998). El fenómeno de el niño. *Comuniica*, 3(9), 48–55. Retrieved from <http://repiica.iica.int/docs/B1760e/B1760e.pdf>
- Martín, G. M., & Rivera, R. (2015). Influencia de la inoculación micorrízica en los abonos verdes. Efecto sobre el cultivo principal. Estudio de caso: el maíz. *Cultivos Tropicales*, 36, 34–50. Retrieved from <https://ediciones.inca.edu.cu>
- Martínez Cruz, M., Ortiz Pérez, R., & Raigón, M. D. (2017). Contenido de fósforo, potasio, zinc, hierro, sodio, calcio y magnesio, análisis de su variabilidad en accesiones cubanas de maíz. *Cultivos Tropicales*, 38(1), 92–101.
- Martínez, A., & Leyva, A. (2014). La biomasa de los cultivos en el agroecosistema. Sus beneficios agroecológicos. Ministerio de Educación Superior. Cuba Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, 35(1), 11–20.
- Mayorga, N. (2016). El maíz entre los pueblos indígenas. *El Sol de México*, pp. 2–3.
- McCown, R. L., Hammer, G. L., Hargreaves, J. N. G., Holzworth, D. P., & Freebairn, D. M. (1996). APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*, 50(3), 255–271. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(94\)00055-V](https://doi.org/10.1016/0308-521X(94)00055-V)
- McKean, S. (1993). *Manual De Analisis De Suelos Y Tejido Vegetal*. CIAT.
- Mendenhall, C. D., Shields-Estrada, A., Krishnaswami, A. J., Daily, G. C., & Levin, S. A. (2016). Quantifying and sustaining biodiversity in tropical agricultural landscapes. *PNAS*, 113(51), 14544–14551. <https://doi.org/10.1073/pnas.1604981113>
- Meng, H., Xu, M., Lu, J., He, X., Li, J., Shi, X., Peng, C., Wang, B., & Zhang, H. (2013). Soil pH Dynamics and Nitrogen Transformations Under Long-Term Chemical Fertilization in Four Typical Chinese Croplands. *Journal of Integrative Agriculture*, 12(11), 2092-2102. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60398-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60398-6)

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2018). Geoportal SIGTIERRAS. Retrieved July 5, 2018, from <http://ide.sigtierras.gob.ec:8080/geoportal/>

Mitchell, C. C., Westerman, R. L., Brown, J. R., & Peck, T. R. (1991). Overview of Long-Term Agronomic Research. *Agronomy Journal*, 83(1), 24-29. <https://doi.org/10.2134/agronj1991.00021962008300010010x>

Mokhtarpour, H., Teh, C. B. S., Saleh, G., Selamat, A. B., Asadi, M. E., Kamkar, B., ... Asadi, A. B. (2010). Non-destructive estimation of maize leaf area, fresh weight, and dry weight using leaf length and leaf width. In *Communications in Biometry and Crop Science* (Vol. 5). Retrieved from International Journal of the Faculty of Agriculture and Biology website: <http://agrobiol.sggw.waw.pl/cbcs>

M.R. Mosquera-Losada, J.J. Santiago-Freijanes, M. Rois-Díaz, G. Moreno, M. den Herder, J.A. Aldrey-Vázquez, N. Ferreiro-Domínguez, A. Pantera, A. Pisanelli, A. Rigueiro-Rodríguez, (2018) Agroforestry in Europe: A land management policy tool to combat climate change, *Land Use Policy*, Volume 78, Pages 603-613, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.06.052>.

Mosquera-Losada M.R. Santiago-Freijanes J., M.Rois-DíazacG.MorenodM.den HerdercJ.A.Aldrey-VázquezbN.Ferreiro-DomínguezaeA.Pantera fA.PisanelligA.Rigueiro-Rodrígueza. (2018). Agroforestry in Europe: A land management policy tool to combat climate change. *Land Use Policy*. (78). 603-613.

Mosquera-Losada M.R., González-Rodríguez A. Y Rigueiro-Rodríguez A. (1999) *Ecología y manejo de praderas*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España.

Mosquera-Losada, M., Cuiña-Cotarelo, R., Rigueiro-Rodríguez, A. (2011). Effect of understory vegetation management through liming and sewage sludge fertilisation on soil fertility and *Pinus radiata* D. Don growth after reforestation. *European Journal of Forest Research* (in press). 130 (6): 997-1008.

Navarrete, A., Chaves C., Arnaldo, M, y Mui Tsai., S (2013). Molecular detection on culture medium of Acidobacteria from Amazon soils. *Microbiology Discovery* 2013, <http://www.hoajonline.com/journals/pdf/2052-6180-1-1>.

Navarro, G., y Navarro, S. (2013). *Química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas* 3ª edición. Mundiprensa. 480 p.

Najafinezhad, H., Tahmasebi Sarvestani, Z., Modarres Sanavy, S. A. M., & Naghavi, H. (2015). Evaluation of yield and some physiological changes in corn and sorghum under irrigation regimes and application of barley residue, zeolite and superabsorbent polymer. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61(7), 891–906. <https://doi.org/10.1080/03650340.2014.959938>

Nicolás, N., Uribe, S., López, E., Camacho, R., & Turrent, A. (1999). El sistema maíz-leguminosa-frijol y la fertilización mineral en terrazas de muro vivo. *Agronomía Mesoamericana*, 10(2), 59–67.

- Nziguheba, G., Merckx, R., & Palm, C. A. (2005). Carbon and nitrogen dynamics in a phosphorus-deficient soil amended with organic residues and fertilizers in western Kenya. *Biology and Fertility of Soils*, 41(4), 240-248. <https://doi.org/10.1007/s00374-005-0832-0>
- Obando, E. (2019). Caracterización morfológica de maíz blanco harinoso (*Zea mays* l.) material nativo “chazo” de la Provincia de Chimborazo [Universidad Técnica de Ambato].
- Olguín, J., Guevara, R., Carranza, J., Scopel, E., Barreto, O., Mancilla, O., & Talavera, A. (2017). Producción y rendimiento de maíz en cuatro tipos de labranza bajo condiciones de temporal. *IDESIA (Chile)*, 35(1), 51–61. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292017005000018>.
- Ordóñez, M., Galicia, L., Figueroa, A., Bravo, I., Peña, J. (2015). Effects of peasant and indigenous soil management practices on the biogeochemical properties and carbon storage services of Andean soils of Colombia. *European Journal of Soil Biology*. 71: 28-36.
- Ortiz Escobar, M. E., & Hue, N. V. (2008). Temporal changes of selected chemical properties in three manure—Amended soils of Hawaii. *Bioresource Technology*, 99(18), 8649-8654. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.04.069>
- Ortiz, A. (2016). Evaluación de la Respuesta del Maíz (*Zea Mays* l.) ante cambios en la Densidad de Siembra y Dosis de Nitrógeno. *Revista Sobre Estudios e Investigaciones Del Saber Académico*, 10, 82–85.
- Osorio, G. (2008). Agricultura sustentable. Una alternativa de alto rendimiento. *Ciencia UANL*, 11(1), 77–81. Retrieved from <http://redalyc.uaemex.mx>
- Overman, A. R., & Brock, K. H. (2003). Analysis Model Analysis of Corn Response to Applied Nitrogen and Tillage Model Analysis of Corn Response to Applied Nitrogen and Tillage. *Communications in soil science and plant analysis*, 34(15–16), 2177–2191. <https://doi.org/10.1081/CSS-120024056>
- Overman, A. R., & Scholtz III, R. V. (2004). Model of Dry Matter and Plant Nitrogen Partitioning between Leaf and Stem for Coastal Bermudagrass. II. Dependence on Growth Interval. *Journal of plant nutrition*, 27(9), 1593–1600. <https://doi.org/10.1081/PLN-200026002>
- Overman, A., & Scholtz III, R. (2004). Model Analysis for Growth Response of Corn Model Analysis for Growth Response of Corn. *Journal of Plant Nutrition*, 27(5), 885–906. <https://doi.org/10.1081/PLN-120030677>
- Overman, A., & Scholtz III, R. (2011). Model of yield response of corn to plant population and absorption of solar energy. *PLoS ONE*, 6(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016117>
- Overman, Allen R., R. V. S. I. (2002). Mathematical Models of Crop Growth and Yield. <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.1145>
- Pachico, D. (1989). Trends in world common bean production. En Howard F. Schwartz and Macial A. Pastor-Corrales (Eds), *Bean production problems in the tropics*. (pp. 1-8). Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

Paradelo, R., van Oort, F., Barré, P., Billiou, D., & Chenu, C. (2016). Soil organic matter stabilization at the pluri-decadal scale: Insight from bare fallow soils with contrasting physicochemical properties and macrostructures. *Geoderma*, 275, 48-54. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.04.009>.

Palma J, Graves A, Bunce R, Burgess P, De Filippi R, Keesman K, van Keulen H, Mayus M, Reisner Y, Liagre F, Moreno G, Herzog F (2007) Modelling environmental benefits of silvoarable agroforestry in Europe. *Agric. Ecosyst. Environ.* 119: 320–334.

Palma JHN, Oliveira T, Crous-Duran J, Graves A, Garcia de Jalon S, Upson M, Paulo J, Tomé M, Ferreiro-Domínguez N, Mosquera-Losada MR, Gonzalez-Hernández MP, Kay S, Mirk J, Kanzler M, Smith J, Moreno G, Pantera A, Mantovani D, Rosatti A, Luske B, Hernansen J (2017) Modelling agroforestry at field and farm-scale. Report for the deliverable 6.17 of the AGFORWARD project, Lisbon.

Parr Instrument Company. (2018). Oxygen Bomb Calorimeters - Parr Instrument Company. Retrieved June 15, 2018, from <https://www.parrinst.com/products/oxygen-bomb-calorimeters/>

Pérez, A., & Landeros, C. (2009). Agricultura y deterioro ambiental. *Elementos*, 73, 19–25. Retrieved from <https://elementos.buap.mx/num73/pdf/19.pdf>

Pérez, A., Quero, A., Escalante, J., Rodríguez, T., Garduño, S., & Miranda, L. (2018). Fenología, biomasa y análisis de crecimiento de cultivares de sorgo forrajero en valles altos. *42(2)*, 108–117.

Pfister, F., Bader, H.-P., Scheidegger, R., & Baccini, P. (2005). Dynamic modelling of resource management for farming systems. *Agricultural Systems*, 86(1), 1–28. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2004.08.001>

Pirasteh-Anosheh, H., Emam, Y., & Pessarakli, M. (2013). Changes in Endogenous Hormonal Status in Corn (*Zea Mays*) Hybrids Under Drought Stress. *Journal of Plant Nutrition*, 36(11), 1695–1707. <https://doi.org/10.1080/01904167.2013.810246>

PMC. (2015). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014 (Fernando Paz Pellat & Julio C. Wong González, Eds.). Retrieved from http://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/Libro_Merida_2014_PMC_ISBN-web.pdf

Prefectura de Imbabura. (2015). Actualización del plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la provincia de imbabura 2015-2035 (p. 509). p. 509. Retrieved from http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/1060000180001_PDOT_IMBABURA_2015-2035_SIGAD_15-08-2015_22-50-42.pdf.

Porta, J. (1999). Técnicas y experimentos en Edafología. Universidad politécnica de Catalunya.

Purakayastha, T. J., Bera, T., Bhaduri, D., Sarkar, B., Mandal, S., Wade, P., Kumari, S., Biswas, S., Menon, M., Pathak, H., & Tsang, D. C. W. (2019). A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: Pathways to climate

change mitigation and global food security. *Chemosphere*, 227, 345-365. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2019.03.170>

Quiroz, D., & Merchán, M. (2016). Guía para facilitar el aprendizaje en el manejo integrado del cultivo de Maíz Duro (*Zea mays*. L) (p. 129). p. 129. Quevedo-Ecuador: INIAP.

Rahman, M., Okubo, A., Sugiyama, S., Mayland, H. (2008). Physical, chemical and microbiological properties of an Andosol as related to land use and tillage practice. *Soil y Tillage Research*. 101: 10-19.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2009). Aquacrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3), 438–447. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>

Ramírez, Z., López, J., Briones, F., Varela, S., & Mendoza, M. C. (2013). Efecto de la Temperatura sobre las Fases de Floración de Maíz Tropical en Tamaulipas. Universidad Autónoma de Tamaulipas, 4.

Razquin, C. J., Maddonni, G. A., & Vega, C. R. C. (2017). Estimación no destructiva del área foliar en plantas individuales de maíz (*Zea mays* L.) creciendo en canopeos. *AgriScientia*, 34(1), 27–38.

Recalde, E. (2016). Anuario Agroclimático años 2009-2015 (Ponticia Universidad Católica del Ecuador sede Ibarra; Consejo de Publicaciones de la Universidad de los Andes Venezuela, Ed.). Mérida, Venezuela, 2016: Gráficas el Portatítulo Mérida, Venezuela, 2016.

REDES-AT. (2003). Maiz sustento y culturas en América Latina Los impactos destructivos de la globalización (C. Améndola, Ed.). Retrieved from www.redes.org.uy

Regalado, A., Peralta, E., & González, C. (2008). Cómo hacer un modelo matemático. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 12(35), 9–18. Retrieved from http://www.utm.mx/edi_anteriores/temas035/2_ensayo-35.pdf

Reichardt, K., Libardi, P. L., Victoria, R. L.; & Viegas, G. P. (1979). Dinâmica do nitrogênio num solo cultivado com milho. *R. Bras. Ci. Solo*, 3, 17-20.

Reid, J. B. (2017). A preliminary model of sweet corn growth and yield. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 45(2), 130–149. <https://doi.org/10.1080/01140671.2016.1264078>.

Reijneveld, J.A., Kuikman, P.J., Oenema, O., 2010. Changes in soil organic matter content of grassland and maize land in the Netherlands between 1970 and 2009. *Grassl. Sci. Eur.* 15, 3-32.

Rheinheimer, D. dos S., Fornari, M. R., Bastos, M. C., Fernandes, G., Santanna, M. A., Calegari, A., dos Santos Canalli, L. B., Caner, L., Labanowski, J., & Tiecher, T. (2019). Phosphorus distribution after three decades of different soil management and cover crops in

subtropical region. *Soil and Tillage Research*, 192(May), 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.018>.

Rogg, H. (2000). *Manual de Entomología Agrícola de Ecuador* (E. Abya-Yala, Ed.). Quito, Ecuador.

Román, E., García, F., Guzmán, E., & Ayala, M. (2016). El maíz ancho pozolero (*Zea mays* L.) como estrategia para la seguridad alimentaria. *Revista Etnobiología*, 14(3), 39–49.

Roscoe, R., Madari, B. E., Luiz, P., De Almeida, O., José, B., Alves, R., De Campos, D. V., Pozzi, C., Sisti, J., Urquiaga, S., Michael, R., Mercante, M., De, L., Mendes, C., Bueno, F., Júnior, R., Cezar, J., Santos, F. Dos, Hungria, M., ... Cesar, B. (2006). Dinâmica da Matéria Orgânica do Solo em Sistemas Conservacionistas. En *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária—EMBRAPA* (pp. 1-14).

Ruíz, A., & Pabón, J. (2013). Efecto de los fenómenos de El Niño y La Niña en la precipitación y su impacto en la producción agrícola del departamento del Atlántico (Colombia). *Cuadernos de Geografía*, 22(2), 35–54. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/rcdg/v22n2/v22n2a03.pdf>

Ruiz-González, R. O., & Victorino-Ramírez, L. (2015). Respuesta del policultivo jamaica-frijol-maíz a tratamientos de fertilización en Villaflores, Chiapas, México. *Agrociencia*, 49(5), 545–557.

Saffigna, P. G., Powlson, D. S., Brookes, P. C., & Thomas, G. A. (1989). Influence of sorghum residues and tillage on soil organic matter and soil microbial biomass in an australian vertisol. *Soil Biology and Biochemistry*, 21(6), 759-765. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(89\)90167-3](https://doi.org/10.1016/0038-0717(89)90167-3)

Sage, C. (2017). Food Security. In *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0791>

Salazar, L., Kogan, F., & Roytman, L. (2008). Using vegetation health indices and partial least squares method for estimation of corn yield. *International Journal of Remote Sensing*, 29(1), 175–189. <https://doi.org/10.1080/01431160701271974>

Sánchez, D., Ligarreto, G., & Leiva, F. (2012). Variabilidad del Crecimiento y Rendimiento del Cultivo de Maíz para Choclo (*Zea mays* L.) como Respuesta a Diferencias en las Propiedades Químicas del Suelo en la Sabana de Bogotá, Colombia. *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellí*, 65(2), 6579–6583.

Sánchez, H. (2004). *Manual tecnológico del maíz amarillo duro y de Buenas Practicas Agrícolas para el valle de Huaura Departamento de Lima* (Chávez J.; & F. Rojas, Eds.). Retrieved from <http://repiica.iica.int/docs/B0343e/B0343e.pdf>.

Sandoval, M., Stolpe, N., Zagal, E., Mardones, M., & Junod, J. (2003). El secuestro de carbono en la agricultura y su importancia con el calentamiento global. *Theoria*, 12, 65–71. Retrieved from <http://www.ubiobio.cl/theoria/v/v12/5.pdf>

- Sangoi, L. (2001). Understanding plant density effects on maize growth and development: An important issue to maximize grain yield. *Ciência Rural*, 31, 159–168. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782001000100027>
- Santana, F., Granillo, R., Espinoza, F., Aguilar, J., & Ortega, J. (2018). Caracterización de la cadena de valor del maíz. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de La Escuela Superior de Cd. Sahagún*, 5(9).
- Sawin, J. (2015). Renewables 2015 global status report Annual Reporting on Renewables: Ten years of excellence. Retrieved from http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf
- Schulte, L. A., Niemi, J., Helmers, M. J., Liebman, M., Arbuckle, J. G., James, D. E., ... Witte, C. (2017). Prairie strips improve biodiversity and the delivery of multiple ecosystem services from corn-soybean croplands. *PNAS*, 114(50), 11247–11252. <https://doi.org/10.1073/pnas.1620229114>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis., Pub. L. No. NOM-021-RECNAT-2000, martes 31 de diciembre de 2002 1
- Serratos, J. (2009). El origen en el continente del maíz y la diversidad americano. Retrieved from <https://www.greenpeace.org/mexico/Global/mexico/report/2009/3/el-origen-y-la-diversidad-del.pdf>
- Silva, W., Alfaro, Y., & Jiménez, R. (2009). Evaluación de las características morfológicas y agronómicas de cinco líneas de maíz amarillo en diferentes épocas de siembra. *Revista Científica UDO Agrícola*, 9(4), 743–755.
- SKARBØ, K. (2012). Reconfiguration of Andean fields: culture, climate and agrobiodiversity by. The University of Georgia.
- Solórzano, E. (2007). Guías fenológicas para cultivos básicos. Ed. Trillas.
- Staller, J. E. (2010). Ethnohistory: Impressions and Perceptions of Maize. In *Maize Cobs and Cultures: History of Zea Mays L.* (pp. 7–83). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-04506-6>.
- Stanford, G. (1973). Rationale for Optimum Nitrogen Fertilization in Corn Production. *Journal of Environmental Quality*, 2(2), 159-166. <https://doi.org/10.2134/jeq1973.00472425000200020001x>.
- Steduto, P., Hsiao, T., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426–437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>

Steduto, Pasquale. (2003). Biomass water-productivity comparing the growth-engines of crop models. FAO Expert Meeting on Crop Water Productivity Under Deficient Water Supply, 26–28.

Sumba, L. (2014). Producción Histórica de Maíz Duro Seco. Magap, 15.

Taiz, L., & Zeiger, E. (2003). Plant Physiology (3 edition). <https://doi.org/10.1093/aob/mcg079>

Taiz, L., & Zeiger, E. (2006). Fisiología vegetal: Vol. IV (Sinauer Associates, Inc.). Publicaciones de la Universitat Jaume I.

Tapia, C. (2015). Identificación de áreas prioritarias para la conservación de razas de maíz en la sierra de Ecuador Memoria (Universidad Politécnica de Madrid). Retrieved from http://oa.upm.es/35522/1/CESAR_GUILLERMO_TAPIA_BASTIDAS.pdf

Tapia, C., Paredes, N., Naranjo, E., Tacán, M., Monteros, A., Pérez, C., & Valverde, Y. (2017). Caracterización morfológica de la diversidad de razas de Zea mays en la Sierra norte de Ecuador. La Técnica, 18, 6–17.

Tarui, A., Matsumura, A., Asakura, S., Yamawaki, K., Hattori, R., & Daimon, H. (2013). Evaluation of Mixed Cropping of Oat and Hairy Vetch as Green Manure for Succeeding Corn Production. Plant Production Science, 16(4), 383–392. <https://doi.org/10.1626/pps.16.383>

Teixeira, L. A. J., Testa, V. M., & Mielniczuk, J. (1994). Nitrogênio do solo, nutrição e rendimento de milho afetados por sistemas de cultura. Revista brasileira de ciência do solo, 18(2).

Todoalimentos.org. (2021). Tabla Nutricional: Grano de maíz, amarillo. <http://www.todoalimentos.org/grano-de-maiz-amarillo/>

Tokatlidis, I. (2013). Adapting maize crop to climate change. Agronomy for Sustainable Development, 33(1), 63–79. 33(1), 63–79.

Torres, E., Quishpe, D., Sánchez, A., Reyes, M., González, B., Torres, A., Cedeño, A., Haro, A. (2013). Caracterización de la producción de frijol en la provincial de Cotopaxi Ecuador: Caso comuna Panyatug. Ciencia y Tecnología 6(1):23-31.

Tróchez, J., Valencia, M., & Salazar, J. (2018). Los efectos del Tratado de Libre Comercio con Estados Unidos y los precios del maíz colombiano. Apuntes Del CENES, 37(65), 151–172. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.19053/01203053.v37.n65.2018.5988>

Turc, O., Bouteillé, M., Fuad-Hassan, A., Welcker, C., & Tardieu, F. (2016). The growth of vegetative and reproductive structures (leaves and silks) respond similarly to hydraulic cues in maize. New Phytologist, 212(2), 377–388. <https://doi.org/10.1111/nph.14053>

Umar, M., & Taiwo, U. (2016). Leaf area determination for maize (zea mays l), okra (Abelmoschus esculentus L) and cowpea (Vigna unguiculata L) CROPS USING LINEAR MEASUREMENTS. Journal of Biology, Agriculture and Healthcare, 6(4), 103–111. Retrieved from www.ijste.org

- van Breemen, N. (1993). Soils as biotic constructs favouring net primary productivity. En *Geoderma* (Vol. 57, Número 3, pp. 183-211). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(93\)90002-3](https://doi.org/10.1016/0016-7061(93)90002-3)
- van der Werf, W., Keesman, K., Burgess, P., Graves, A., Pilbeam, D., Incoll, L. D., ... Dupraz, C. (2007). Yield-SAFE: A parameter-sparse, process-based dynamic model for predicting resource capture, growth, and production in agroforestry systems. *Ecological Engineering*, 29(4), 419–433. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.017>
- van Diepen, C. A., Wolf, J., van Keulen, H., & Rappoldt, C. (1989). WOFOST: a simulation model of crop production. *SOIL USE AND MANAGEMENT*, 5(1), 16–24. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/29360545.pdf>
- van Ittersum, M. K., Leffelaar, P. A., van Keulen, H., Kropff, M. J., Bastiaans, L., & Goudriaan, J. (2003). On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy*, 18, 201–234. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00106-5](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00106-5)
- Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L. K., ... Mejias Moreno, P. (2014). AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling and Software*, 62(August), 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.005>
- Vargas, L. (2014). El maíz, viajero sin equipaje. *Anales de Antropología*, 48(I), 123–137. [https://doi.org/10.1016/S0185-1225\(14\)70492-8](https://doi.org/10.1016/S0185-1225(14)70492-8)
- Vasconcellos, C. A., Campolina, D. C. A., Santos, F. G., Exel Pitta, G. V., & Marriel, I. E. (1999). Resposta da soja e da biomassa de carbono do solo aos resíduos de cinco genótipos de sorgo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 23(1), 69-77. <https://doi.org/10.1590/s0100-06831999000100009>
- Verhulst, N., François, I., & Bram, G. (2015). Agricultura de conservación y captura de carbono en el suelo: Entre el mito y la realidad del agricultor. Retrieved from http://conservacion.cimmyt.org/en/component/docman/doc_view/1504-captura-de-carbono-2015
- Villarreal, D., & García, P. (2016). El uso de las cenizas como posible precursor de la nixtamalización en el oeste de Mesoamérica. *Revista de Geografía Agrícola*, 57, 7–18.
- Villers, L., Arizpe, N., Orellana, R., Conde, C., & Hernández, J. (2009). Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interciencia*, 34(5), 322–329.
- Wang, R., Bowling, L. C., & Cherkauer, K. A. (2016). Estimation of the effects of climate variability on crop yield in the Midwest USA. *Agricultural and Forest Meteorology*, 216, 141–156. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.10.001>
- Wendling, B., Jucksch, I., De Sá Mendonça, E., & Neves, J. C. L. (2005). Organic carbon and aggregate stability of a Red Latossol under different managements. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 40(5), 487-494. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2005000500010>

Williams, M. R., King, K. W., Duncan, E. W., Pease, L. A., & Penn, C. J. (2018). Fertilizer placement and tillage effects on phosphorus concentration in leachate from fine-textured soils. *Soil and Tillage Research*, 178(July 2017), 130-138. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.010>

Wong, M. H., & Wong, J. W. C. (1989). Germination and seedling growth of vegetable crops in fly ash-amended soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 26(1), 23-35. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(89\)90035-2](https://doi.org/10.1016/0167-8809(89)90035-2)

Yanez, C; Zambrano, J.; Caicedo, M.; Heredia, J. (2013). Guía de producción de maíz para pequeños agricultores y agricultoras (p. 28). p. 28. Quito, Ecuador: INIAP, Programa de Maíz.

Yeung, V., Miller, D., & Rutzke, M. (2017). Atomic Absorption Spectroscopy, Atomic Emission Spectroscopy, and Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. In D. R. Heldman (Ed.), *Food Analysis* (pp. 129–150). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45776-5>

Zambrano, E., Limongi, J., Alarcón, F., Villavicencio, J., Caicedo, M., Eguez, J., & Zambrano, J. (2017). Interacción Genotipo Ambiente de híbridos de maíz bajo temporal en Manabí y Los Ríos, Ecuador. *Revista Espamciencia*, 8(1), 7–14.

Zebrowski, C., & Sourdat, M. (1992). Los factores de la pedogénesis y los suelos en el Ecuador. En A. Winckell (Ed.), *los paisajes naturales del Ecuador Geografía Basica del Ecuador* (Vol. iv, pp. 97-129). IGM.

Zehetner, F., & Miller, W. P. (2006). Soil variations along a climatic gradient in an Andean agro-ecosystem. *Geoderma*, 137(1-2), 126-134. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.07.005>

Zhang, D., Zhang, C., Tang, X., Li, H., Zhang, F., Rengel, Z., ... Shen, J. (2016). Increased soil phosphorus availability induced by faba bean root exudation stimulates root growth and phosphorus uptake in neighbouring maize. *The New Phytologist*, 209(2), 823–831. <https://doi.org/10.1111/nph.13613>

Zizumbo, D., & Colunga, P. (2017). La milpa del occidente de Mesoamérica: profundidad histórica, dinámica evolutiva y rutas de dispersión a Suramérica. *Revista de Geografía Agrícola*, 58, 33–46. <https://doi.org/10.5154/r.rga.2017.58.001>.

7. ANEXO I

Tabla I Análisis de varianza múltiple para las variables del suelo

<i>Variable</i>	<i>Tratamiento</i>	<i>Período de cultivo</i>	<i>Período de cultivo*tratamiento</i>
<i>pH</i>	ns	***	***
<i>Carbono</i>	ns	***	*
<i>Nitrógeno</i>	ns	***	**
<i>Fósforo Olsen</i>	***	***	***
<i>Capacidad de intercambio catiónico</i>	***	***	***
<i>Potasio</i>	**	***	*
<i>Calcio</i>	**	***	***
<i>Magnesio</i>	***	***	***
<i>Sodio</i>	***	***	***

Tabla II Análisis de varianza múltiple para de la producción de biomasa

<i>Variable</i>	<i>Tratamiento</i>	<i>Período de cultivo</i>	<i>Período de cultivo*tratamiento</i>
<i>Producción</i>	***	***	ns
<i>Producción grano maíz</i>	***	***	ns
<i>Producción grano maíz+frijol</i>	***	***	ns
<i>Peso 1000 semillas</i>	ns	***	***
<i>Proteína maíz</i>	***	***	***
<i>Proteína grano</i>	***	***	***

ns= no significativo; **= significativo p <0,001; ***= significativo p<0,0001



En relación a la producción de maíz tiene un rendimiento comparable con los promedios nacionales para variedades criollas o nativas; con un incremento en el segundo año con respecto al primero debido a la mejora del nivel de fertilidad asociados a un mayor contenido de materia orgánica en el suelo. La producción de grano de maíz y frijol es significativamente superior cuando se computa de forma conjunta el grano del maíz y el frijol en las parcelas en las que se sembró maíz y frijol que cuando se evalúa la producción de maíz grano en las parcelas en las que se sembraba maíz de forma exclusiva. La calibración del modelo Yield-SAFE para las dos variedades de maíz Chaucho y Huandango, se ajusta muy bien a la producción de maíz en la mayoría de las cosechas, principalmente debido a la similitud de las variedades