



**ZONIFICACIÓN AGROCLIMÁTICA PARA
EL MANEJO DEL AGUA DE LA PALMA
DE ACEITE EN EL DEPARTAMENTO DEL
MAGDALENA**

**AGROCLIMATIC ZONING FOR OIL
PALM WATER MANAGEMENT IN THE
DEPARTMENT OF MAGDALENA**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

Presentado por:

D^a TULIA ESPERANZA DELGADO REVELO

Dirigido por:

Dr. JUAN ANTONIO PASCUAL AGUILAR

Alcalá de Henares, a 22 de septiembre de 2023

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis agradecimientos en primer lugar a Dios por brindarme las oportunidades y retos de estudio y laborales en mi vida. Agradezco a mi madre, que, aunque no está con nosotros, siempre ha sido y será mi apoyo para lograr todos mis propósitos. A mi hijo, que es mi motor y compañero para seguir adelante ante las adversidades y poder cumplir con nuestros proyectos de vida.

Incluyo en estos agradecimientos a mis compañeros de trabajo, principalmente a Leonardo Torres y Greydy Ladino por su apoyo en el desarrollo de estos trabajos y al Doctor Nolver Arias por sus consejos y asesoramiento.

Finalmente, agradezco al profesor Juan Antonio Pascual Aguilar, por sus valiosos aportes, por su paciencia y comprensión en el desarrollo de mi trabajo de fin de máster.

ÍNDICE

RESUMEN.....	8
1. INTRODUCCIÓN: JUSTIFICACIÓN y OBJETIVOS.....	9
1.1. JUSTIFICACIÓN.....	9
1.2. OBJETIVOS.....	11
2. METODOLOGÍA.....	12
2.1. Zona de estudio	12
2.2. Método de trabajo para la zonificación agroclimática	13
2.2.1. Recolección de información.....	14
2.2.2. Pre-procesamiento de información.....	14
2.2.3. Cálculo de la Evapotranspiración potencial o de referencia (ET _o).....	17
2.2.4. Generación de los mapas y gráficos de las variables meteorológicas.....	19
2.3. Zonificación agroclimática	19
2.4. Balance hídrico por zona agroclimática identificada	20
3. RESULTADOS.....	21
3.1. Análisis de datos meteorológicos	21
3.1.1. Precipitación.....	21
3.1.2. Temperatura, humedad relativa, Radiación solar y Velocidad del viento.....	28
3.1.3. Evapotranspiración de referencia (ET _o):.....	31
3.1.4. Balance hídrico climático.....	35
3.1.5. Evapotranspiración del cultivo de la palma de aceite en el departamento del Magdalena.....	37
3.1.6. Caracterización suelos en el departamento del Magdalena.....	38
3.1.7. Topografía del departamento del Magdalena.....	40
3.2. Zonificación agroclimática del departamento del Magdalena	41
3.2.1 Análisis de cada una de las zonas agroclimáticas.....	42
4. DISCUSIÓN.....	53
5. CONCLUSIONES.....	57
6. BIBLIOGRAFÍA.....	59
7. ANEXOS.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización Zona de estudio.....	12
Figura 2. Marco conceptual: Zonificación agroclimática para la palma de aceite en el departamento del Magdalena.	13
Figura 3. Distribución de estaciones meteorológicas empleadas en el departamento del Magdalena.....	22
Figura 4. Correlación precipitación vs altitud.....	23
Figura 5. Precipitación acumulada anual del departamento del Magdalena – periodo 1991-2021.	23
Figura 6. Precipitación acumulada mensual multianual del departamento del Magdalena para el periodo 1991-2021.....	24
Figura 7. Distribución de la precipitación acumulada multianual en el departamento del Magdalena (1991-2021).....	25
Figura 8. Representación de la precipitación acumulada mensual multianual en el departamento del Magdalena (1991-2021).	26
Figura 9. Precipitaciones probables para el departamento del Magdalena (1991-2021). .	27
Figura 10. Temperatura mensual multianual en el departamento del Magdalena (a) y regresión lineal (b) para la serie de datos del 1991-2021.....	28
Figura 11. Distribución espacial de la temperatura media multianual en el departamento del Magdalena (1991-2021).....	29
Figura 12. (a) Radiación solar mensual multianual y (b) regresión lineal para los datos multianuales en el departamento del Magdalena (1991-2021).....	30
Figura 13. (a) Humedad relativa mensual multianual y (b) Velocidad del viento mensual multianual para el periodo 1991-2021.....	31
Figura 14. Distribución espacial de la HR (a) y la VV (b) media multianual en el departamento del Magdalena	31
Figura 15. Evapotranspiración de referencia acumulada anual del departamento del Magdalena (1991-2021).....	32
Figura 16. Tendencia de la ETo diaria en el periodo de evaluación 1991-2021.	32
Figura 17. ETo mensual multianual para el departamento del Magdalena (1991-2021)...	33
Figura 18. ETo diaria para el departamento del Magdalena (1991-2021).....	33
Figura 19. Distribución de la ETo acumulada multianual en el departamento del Magdalena (1991-2021).....	34
Figura 20. Distribución de la ETo acumulada multianual en el departamento del Magdalena (1991-2021).....	35
Figura 21. Balance hídrico climático del departamento del Magdalena para el periodo de	

1991-2021.	35
Figura 22. Balance hídrico climático del departamento del Magdalena	36
Figura 23. Evapotranspiración media de la palma de aceite joven y adulta en del departamento del Magdalena.	37
Figura 24. Evapotranspiración del cultivo acumulada anual para para palma de aceite joven (b) y adulta (a).	38
Figura 25. Distribución espacial de la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo a 60 cm de profundidad	39
Figura 26. Mapa altimétrico del departamento del Magdalena.	40
Figura 27. Dendograma para el departamento del Magdalena generado mediante leguaje Phyton.	41
Figura 28. Zonificación agroclimática del departamento del Magdalena para la palma de aceite.	42
Figura 29. Balance hídrico de la zona agroclimática 5.	46
Figura 30. Balance hídrico de la zona agroclimática 6.	47
Figura 31. Balance hídrico de la zona agroclimática 7.	48
Figura 33. Balance hídrico de la zona agroclimática 9.	49
Figura 34. Balance hídrico de la zona agroclimática 10.	50
Figura 35. Balance hídrico de la zona agroclimática 11.	51
Figura 36. Balance hídrico de la zona agroclimática 12.	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relación precipitación del departamento del Magdalena con los fenómenos El Niño y La Niña.-----	27
Tabla 2. Principales características de las zonas agroclimáticas para manejo del agua en el cultivo de la palma de aceite en el Magdalena.-----	44
Tabla 3. Características de la zona agroclimática 5 -----	45
Tabla 4. Balance hídrico de la zona agroclimática 5, para un año normal. -----	45
Tabla 5. Características de la zona agroclimática 6 -----	46
Tabla 6. Balance hídrico de la zona agroclimática 6, para un año normal. -----	46
Tabla 7. Características de la zona agroclimática 7 -----	47
Tabla 8. Balance hídrico de la zona agroclimática 7, para un año normal. -----	47
Tabla 9. Características de la zona agroclimática 9 -----	48
Tabla 10. Balance hídrico de la zona agroclimática 9, para un año normal.-----	48
Tabla 11. Características de la zona agroclimática 10-----	49
Tabla 12. Balance hídrico de la zona agroclimática 10, para un año normal. -----	49
Tabla 13. Características de la zona agroclimática 11 -----	50
Tabla 14. Balance hídrico zona de la agroclimática 11, para un año normal. -----	50
Tabla 15. Características de la zona agroclimática 12-----	51
Tabla 16. Balance hídrico de la zona agroclimática 12, para un año normal. -----	51

TABLA DE ABREVIATURAS

COPERNICUS: Programa de observación de la tierra de la Unión Europea

ERA5: Es la quinta generación de análisis ECMWF para el clima y el tiempo globales de las últimas 8 décadas. Los datos están disponibles a partir de 1940.

ECMWF: European Center for Medium-Range-Weather Forecasts (Centro Europeo de previsiones Meteorológicas a plazo medio)

UNESCO: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

WWF: World Wild Fundation (Fundación mundial para la naturaleza)

IGAC: Instituto geográfico Agustín Codazzi

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

LAA: Lámina de agua aprovechable

LARA: Lámina de agua rápidamente aprovechable

ET_o: Evapotranspiración de referencia

ET_c: Evapotranspiración del cultivo

K_c: Coeficiente del cultivo

RESUMEN

Con el fin de contribuir a un manejo eficiente del agua en el cultivo de palma de aceite en el departamento del Magdalena (Colombia) bajo las condiciones actuales y escenarios críticos futuros, en el presente trabajo se planteó realizar la zonificación agroclimática y de la demanda hídrica del cultivo en la región. Para el desarrollo de esta zonificación se procedió con la obtención, procesamiento y análisis espacial de datos climáticos, de las características del suelo, topografía y de los requerimientos hídricos del cultivo estimados para diferentes etapas fenológicas. Como resultado se tiene la identificación de 12 zonas agroclimáticas, de las cuales 7, corresponden a las áreas donde está establecido el cultivo de palma. Como principales características de estas zonas es que presentan déficits hídricos considerables, entre -600 y -1500 mm/año, siendo las zonas 7 y 6 las más críticas y que pueden considerarse restrictivas para el adecuado desarrollo del cultivo. Llevar a un mayor detalle la caracterización de una zona, es fundamental para acercarse a un manejo óptimo y ajustado a la realidad de las necesidades riegos y drenajes de los cultivos. En este caso, se sugiere incrementar la implementación de riegos eficientes como goteo y aspersión, ya que las fuentes hídricas no pueden suplir con las necesidades hídricas del cultivo, principalmente en la zona 6, 7 y 11 ya que están afectando a la Ciénaga Grande de Santa Marta.

1. INTRODUCCIÓN: JUSTIFICACIÓN y OBJETIVOS

1.1. JUSTIFICACIÓN

El agua es un recurso natural vital para el desarrollo de las regiones y de los hábitats naturales, sin embargo, cada vez es más limitado a nivel mundial, debido a la explosión demográfica de las últimas décadas, su sobreexplotación por la gran demanda de volúmenes de agua para la agricultura y por las difíciles condiciones presentadas por efecto del cambio y variabilidad climáticos. En Colombia, como consecuencia de estos fenómenos, en los últimos años se han presentado eventos climáticos extremos con una mayor frecuencia e intensidad (IDEAM, 2022). La región Caribe, ubicada al norte de Colombia, ha sido la zona más afectada, ya que se han registrado fuertes sequías con disminuciones significativas de la precipitación representando un riesgo significativo en la disponibilidad de agua para satisfacer las necesidades básicas de la población, para la actividad agropecuaria y conservar la salud de los ecosistemas.

Tal es el caso del departamento del Magdalena, el cual es una de las regiones más vulnerables, pues de acuerdo con el último estudio nacional del agua para el país (ENA, 2022), presenta un riesgo hídrico alto, principalmente en los índices del uso del agua (demanda vs oferta), de regulación hídrica de sus cuencas y de la variabilidad del recurso hídrico en condiciones extremas a partir de las presiones sobre la oferta hídrica natural. De acuerdo con este estudio, en esta región, principalmente en la subzona hidrográfica Ciénaga Grande de Santa Marta, existe una presión grande de demanda hídrica, siendo el 95% por el sector agrícola y pecuario. Dentro de los principales cultivos establecidos en este departamento están como perennes la palma de aceite, banano y la yuca y transitorios como el arroz de riego, el maíz, entre otros cultivos, concentrando cerca del 80% de la demanda hídrica total (riego).

La sostenibilidad de estos sistemas productivos y entre ellos, el cultivo de la palma de aceite se ven amenazados cada vez más no sólo por la escasez de agua, sino también por las prácticas de riego ineficientes que aún son usados ampliamente por los agricultores, la presencia de inundaciones y sequías

intensas y frecuentes y debido al cambio climático (J. Bazin et al, 2022). En la época seca (5 a 6 meses al año), la disminución de los caudales de los ríos también restringe el acceso al agua. Estas condiciones han generado que los distritos de riego sólo habiliten agua ciertos días y horarios a sus usuarios, impidiendo que estos suministren los requerimientos hídricos adecuados a sus cultivos, obteniendo como resultado la disminución en sus producciones. Así mismo, los estudios llevados a cabo por WWF Colombia & CORPAMAG (2020), el IDEAM (2022) y por Avendaño (2018), concuerdan en que la descarga de la mayoría de los ríos en esta región no es suficiente para mantener el caudal ambiental aguas abajo, afectando los manglares y a la población pesquera en la ciénaga.

Así mismo, de acuerdo con los pronósticos del efecto del cambio climático para este departamento (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) se tiene que para el 2040, el Índice de Disponibilidad Hídrica (IDH) presentará una amenaza alta a muy alta, debido a los aumentos de temperatura y reducción de las precipitaciones. Estos efectos impactarán principalmente a los municipios de Ariguaní, Ciénaga, El Piñón, El Retén, Guamal, Pueblo Viejo, Sabanas de San Ángel y San Zenón. Por lo tanto, es fundamental el trabajo en acciones de mitigación de estos riesgos de desabastecimiento en las épocas secas, ya que esto implica condiciones futuras adversas para el sector agrícola en la región. Entre ellos, el del cultivo de la palma de aceite, el cual representa el 9% de la producción nacional (Fedepalma, 2022), pues en el Magdalena, se cultivan alrededor de 57.000 hectáreas, que corresponde al 9.4% del área sembrada en Colombia.

Como se mencionó anteriormente, en este sector productivo de la palma de aceite, en la zona, a pesar de las problemáticas de escasez de agua, todavía se sigue regando en mayor medida con riego por inundación, el cual de acuerdo con el estudio de Kaune et al (2020), no se considera un método rentable para la región, así mismo, predispone al cultivo a condiciones fitosanitarias no favorables. Esto se debe, principalmente por un desconocimiento de las condiciones del territorio y de la operación de tecnologías eficientes bajo estos escenarios. Es por ello, que el centro de investigación de la Palma de Aceite

(CENIPALMA) viene investigando en diferentes tecnologías que mejoren la eficiencia del uso del recurso hídrico en el cultivo, tales como el uso de riegos eficientes como el de aspersión y goteo, la determinación de los requerimientos hídricos, técnicas de conservación de humedad entre otros, pero también se plantea el manejo y conservación de las cuencas donde se encuentra establecido el cultivo, su zonificación agroclimática y agroecológica para favorecer la efectividad de estas tecnologías y que sirvan como herramienta para la toma de decisiones del manejo del agua de acuerdo a cada condición.

En Colombia, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) han realizado una zonificación climática para el país, sin embargo, para el manejo del agua de los cultivos, se requiere de mayor detalle y que estén cercanos a la realidad actual de las características agroclimáticas de la región y su relación suelo-agua-planta, para favorecer a un uso sostenible del agua.

1.2. OBJETIVOS

Objetivo general: contribuir a la planificación y manejo de este recurso hídrico en el sector de la palma de aceite dentro del Departamento del Magdalena mediante su zonificación agroclimática y la determinación de la demanda hídrica del cultivo en estas zonas homogéneas.

Objetivos específicos:

- (1) Analizar los datos meteorológicos y de suelos en el área de estudio mediante el lenguaje de programación Python,
- (2) Estimar la Evapotranspiración de Referencia (ET_o) por el método de Penman Monteith (FAO, 2066)
- (3) Generar los mapas climáticos, topográficos y de suelos
- (4) Determinar la zonificación agroclimática del departamento del Magdalena mediante técnicas de análisis multivariado
- (5) Determinar la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y el balance hídrico para cada zona agroclimática

2. METODOLOGÍA

2.1. Zona de estudio:

El área de estudio para la zonificación agroclimática corresponde a el departamento del Magdalena el cual se encuentra localizado en la Costa Norte del Caribe Colombiano, enmarcado entre las coordenadas $8^{\circ} 56' 21''$ y $11^{\circ} 36' 58''$ de latitud norte, y entre $73^{\circ} 32' 59''$ y $74^{\circ} 55' 51''$ de longitud oeste (Figura 1). Está dividido en 30 municipios y 198 corregimientos y cuenta con una extensión de 23188 Km² (Gobernación del Magdalena, 2022). Este departamento hace parte de las regiones naturales de la Sierra Nevada de Santa Marta y Valle Bajo Magdalena y sus principales ríos son el Ariguani, Aracataca, Fundación, Frío, Tucurínca y el Magdalena que cubre la parte baja y plana del departamento hasta desembocar en el Mar Caribe (Gobernación del Magdalena, 2022).

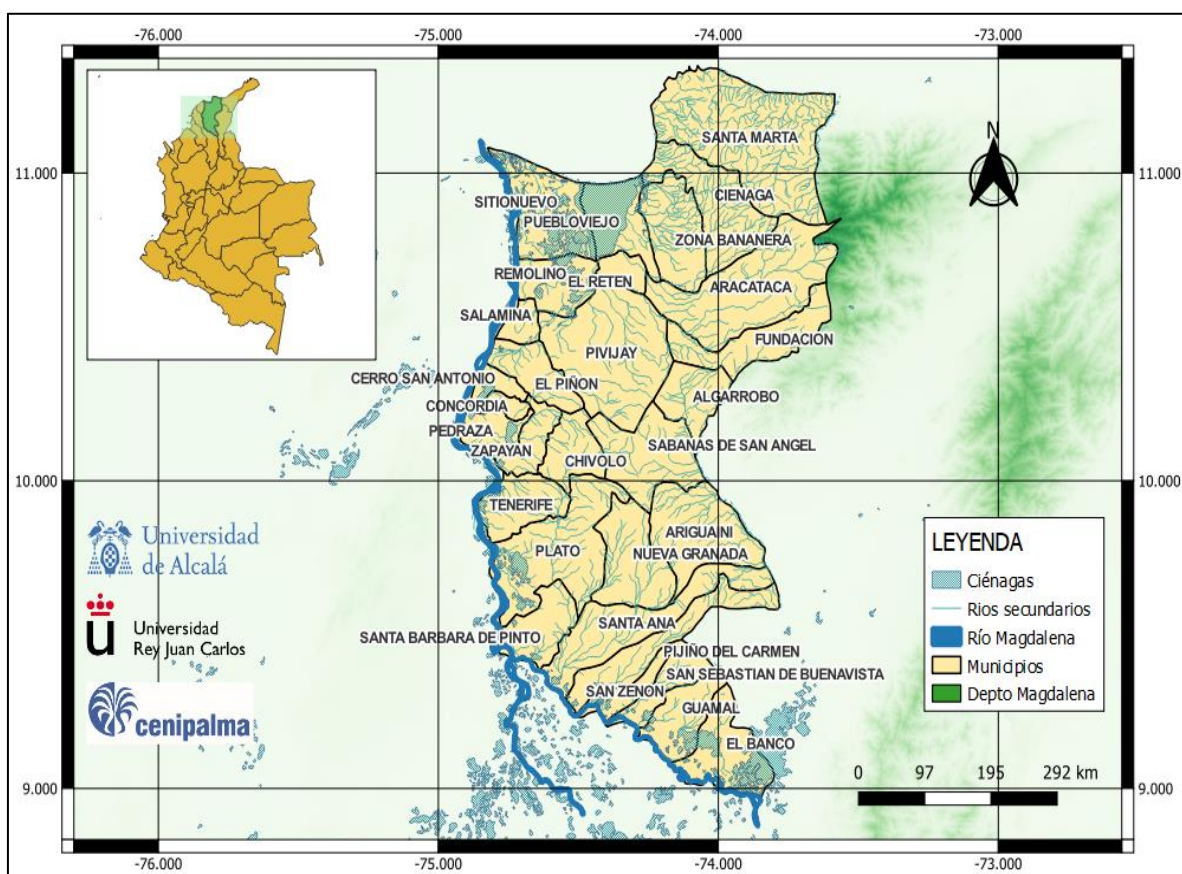


Figura 1. Localización Zona de estudio.

2.2. Método de trabajo para la zonificación agroclimática:

Para la determinación de la zonificación agroclimática para la palma de aceite en el departamento del Magdalena, se formuló un método de trabajo para hacer un uso óptimo de la información hidro climatológica y ambiental existente en la zona de estudio, que permita ajustar herramientas de apoyo en la toma de decisiones en cuanto al manejo del recurso hídrico en el cultivo en las zonas homogéneas que se identifiquen. En resumen, como desarrollo de este trabajo, en primer lugar, se procedió con la obtención y control de calidad de los datos meteorológicos mediante el lenguaje de programación Phyton. Debido a que, para el departamento, no se encontraron series de datos completos de Evapotranspiración de Referencia (ETO), fue estimada con la ecuación de Penman Monteith (FAO, 2006), y los parámetros climáticos involucrados fueron obtenidos a través del procesamiento y validación de imágenes satelitales. Luego, se procedió con la elaboración de los mapas climáticos, topográficos y de suelos, los cuales fueron el insumo para la generación de la zonificación agroclimática mediante un análisis multivariado. Con la información resultante se calculó el Balance hídrico para cada subzona (Figura 3). La explicación detallada de cada componente se presenta posteriormente.

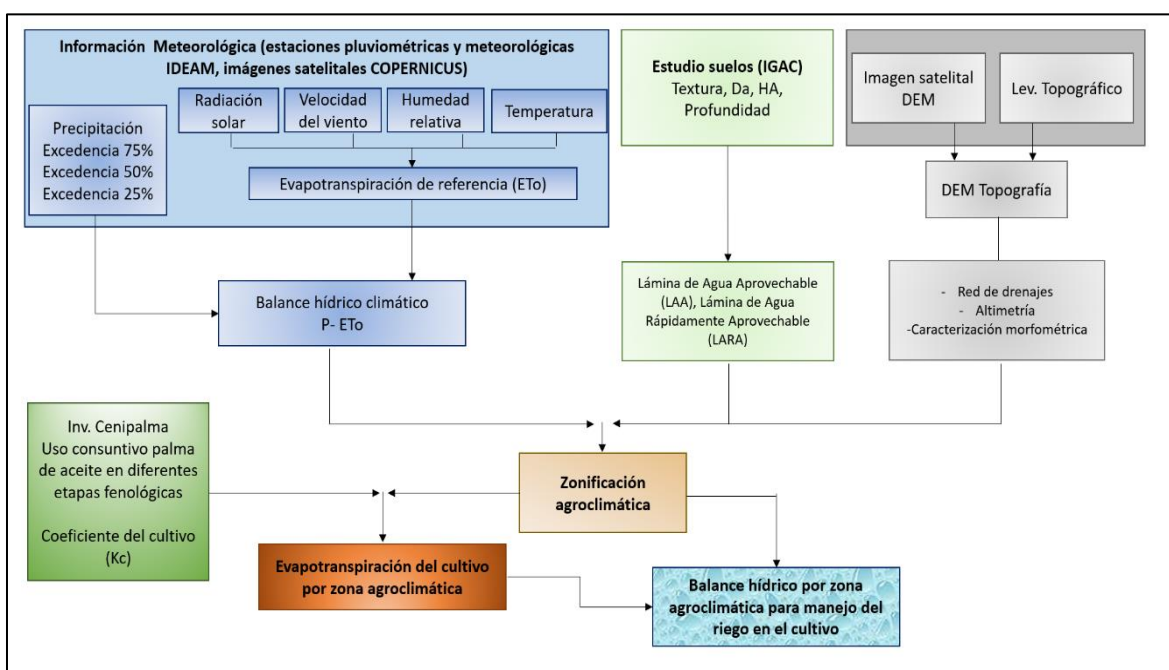


Figura 2. Marco conceptual: Zonificación agroclimática para la palma de aceite en el departamento del Magdalena.

2.2.1. Recolección de información:

Inicialmente se construyó un archivo de datos con la información disponible para las zonas de estudio, tanto para el departamento del Magdalena, como la cuenca del Río Ariguaní. Dentro de la información que se recolectó, a continuación, se listan los registros, documentos, mapas y estudios:

- Para la zonificación, se colectaron registros mensuales de precipitación de estaciones meteorológicas y pluviométricas, principalmente de la red meteorológica del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM)
- Para la modelación hidrológica, registros diarios de precipitación de estaciones meteorológicas y pluviométricas y registros diarios de estaciones hidrológicas.
- Registros de imágenes satelitales COPERNICUS para las variables de temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento
- Cartografía básica: cartografía referente al mapa político y administrativo de Colombia, el mapa político y administrativo del departamento del Magdalena y la red hídrica del país a escala 1:25,000 y 1:100,000 disponible en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) para toda la zona de estudio.
- Modelo digital de elevación de la zona de estudio disponible en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).
- Estudio de suelos del departamento del Magdalena disponible en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) para toda la zona de estudio
- Estudios sobre requerimientos hídricos del cultivo de la palma de aceite a diferentes etapas fenológicas en condiciones de la Zona de estudio (CENIPALMA)

2.2.2. Pre-procesamiento de información:

2.2.2.1. *Control de calidad de datos meteorológicos*

En el presente estudio, el control de calidad de los datos meteorológicos se realizó mediante el lenguaje de programación Python, principalmente con la librería Pandas, la cual es una librería de análisis estadístico. El análisis incluyó la selección

de datos atípicos (outliers), el llenado de datos faltantes y las pruebas de homogeneidad según lo especificado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2017, 2018).

Para garantizar la calidad de los datos se seleccionaron estaciones con menos del 30% de datos faltantes, a los cuales posteriormente se les hizo una validación de datos mediante un análisis de regresión lineal y curvas de doble masas (OMM, 2018), el cual determina las inconsistencias de una estación en comparación con datos confiables de otras estaciones próximas, situadas en zonas climáticas similares. Si las nubes de puntos se alinean en una recta, indica homogeneidad, y, por el contrario, si presenta un cambio de pendiente en la recta, revela un error sistemático o aleatorio y se procede con la homogeneización de datos.

Para el llenado de datos faltantes, con el lenguaje Phyton se estableció una metodología de redes neurales basada en regresiones lineales múltiples (método de Pearson). El valor faltante se predijo mediante un modelo de regresión a través de estaciones que se encuentran altamente correlacionadas. Este ajuste fue ejecutado por interacciones múltiples, las cuales fueron ejecutadas en el funcionamiento de la red neuronal, que contó con 2 entradas, 5000 iteraciones y una salida.

Por otro lado, para la eliminación de los datos atípicos o valores que se alejan de la tendencia seguida por los demás datos registrados en las estaciones se tuvo en cuenta la metodología del rango Inter cuartil (Hernández, 2015), para ellos se generaron las gráficas de cajas y bigotes para cada una de las series de datos reportados por las estaciones y se consideraron atípicos, por un lado, los valores que sobrepasan el extremo más bajo del acumulado al 25% (Q24) y el extremo más alto el acumulado al 75% (Q75).

Con relación a las variables como temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar, para lograr series homogéneas distribuidas en toda el área de estudio se utilizó la red climatológica satelital Copernicus ERA-5, estas también fueron analizadas con la herramienta computacional Phyton permitiendo obtener su análisis estadístico descriptivo y su correspondiente validación con las estaciones

meteorológicas que tienen series de datos completas en el periodo de evaluación seleccionado.

2.2.2.2. *Periodo de las series de datos meteorológicos*

Con el fin de obtener una zonificación ajustada y representativa para la zona de estudio, se tuvo en cuenta lo recomendado por la OMM para la obtención de normales climatológicas (OMM, 2017). Para este estudio se seleccionó un periodo mínimo de 31 años, entre los años 1991 a 2021. Estos periodos largos, según la OMM, son fundamentales para el estudio del clima de una región, ya que permiten tener una referencia del comportamiento de las diferentes variables meteorológicas y con ello, identificar las estrategias de manejo de los cultivos, para su óptimo desarrollo.

Por otro lado, después de realizar el control de calidad y el llenado de los datos, y haber definido el periodo de análisis de 31 años, tanto para precipitación, como la evapotranspiración se determinó sus excedencias de ocurrencias del 25%, 50% y 75% mediante la ecuación propuesta por Weibull en 1951.

$$Px_i = \frac{m}{n + 1} \quad (\text{ec. 1})$$

Donde:

Pxi = Dato de probabilidad

m= Número de orden

n= Número de datos

2.2.2.3. *Topografía*

Para el presente estudio, se generó un Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) con una resolución igual a 30 metros. Este fue obtenido de la información geográfica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi de Colombia (IGAC) a escala 1:25.000 y curvas de nivel cada 25 o 50 metros.

2.2.2.4. *Suelos: Capacidad de retención de humedad del suelo*

Con el fin de tener un mejor entendimiento del balance de agua para el manejo del riego del cultivo en la zona de estudio, se requirió conocer las propiedades

hidrodinámicas de los suelos, principalmente las relacionadas con la capacidad de retención de agua del suelo, la cual fue determinada a partir del estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento del Magdalena (IGAC, 2009). La escala de este estudio es de 1:100.000, y las propiedades que se tuvieron en cuenta fueron, profundidad efectiva, densidad aparente y las humedades del suelo a Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP). A cada punto analizado por el IGAC se calculó la Lámina de Agua Aprovechable (LAA) y Lámina de Agua Rápidamente Aprovechable (LARA), parámetros que desde el punto de vista agronómico son importantes para la determinación la humedad que interesa para el desarrollo de los cultivos (humedad aprovechable).

A continuación, se indican las ecuaciones utilizadas:

$$\mathbf{LAA} = \frac{AA (\%)}{100} * \rho * Per \quad (\text{ec. 2})$$

$$\mathbf{LARA} = \frac{AA (\%)}{100} * \rho * fa * Pe \quad (\text{ec. 3})$$

Donde:

LAA (%) = lámina de agua aprovechable (mm)

LARA (%) = lámina de agua rápidamente aprovechable (mm)

ρ = Peso específico del suelo (adimensional). $\rho = D_a / D_w$; D_w : densidad del agua

D_a = densidad aparente (g cm^{-3})

D_w = Densidad del agua (1 g cm^{-3})

fa = factor de agotamiento que normalmente es 0.5

Pe = profundidad efectiva de raíces (mm)

Para el caso del cultivo de la palma de aceite se tiene que la profundidad efectiva es de 60 cm, ya que hasta esta profundidad se encuentra la mayor proporción o concentración de raíces (raíces activas).

2.2.3. Cálculo de la Evapotranspiración potencial o de referencia (ET_o):

La ET_o se define como la tasa de evapotranspiración (evaporación + transpiración) de una superficie de referencia (cultivo hipotético de gramíneas), que ocurre sin restricciones de agua (FAO, 2006). Este cultivo de referencia debe estar muy bien regado, abonado, en buen estado sanitario y sin restricciones de humedad. Bajo

estas condiciones, los únicos factores que afectan la ETo son los parámetros climáticos, por lo tanto, también puede ser estimada a partir de datos meteorológicos, según la FAO (2006), el método más apropiado es el de Penman-Monteith (Allen et al., 1994), por lo que fue utilizado en el presente estudio:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (\text{ec. 4})$$

Donde:

ETo= evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

R_n= radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹)

R_a= radiación extraterrestre (mm día⁻¹)

G= flujo del calor de suelo (MJ m⁻² día⁻¹)

T= temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)

u₂= velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹)

e_s= presión de vapor de saturación (kPa)

e_a= presión de vapor de saturación (kPa)

(e_s-e_a) = déficit de presión de vapor (kPa)

Δ= pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹)

γ= constante psicrométrica (kPa °C⁻¹)

En el análisis de los registros de las estaciones meteorológicas del IDEAM, se observó que no existen series de datos constantes de los parámetros involucrados (radiación solar, velocidad del viento, temperatura máxima, media y mínima y humedad relativa) en el periodo utilizado, y, por ende, no permite hacer el correspondiente análisis estadístico de los datos. Por lo tanto, estas variables climáticas fueron obtenidas a través del procesamiento y validación de imágenes satelitales (Copernicus ERA-5).

Por otro lado, es importante tener claro que la ETo expresa el poder evaporante de la atmósfera en alguna región y época del año específicas y no considera las características del cultivo y suelo (FAO, 2006) y, por ende, para estimar la evapotranspiración del cultivo (ETc), se tuvo en cuenta la relación de la ETo con el coeficiente del cultivo (Kc), en este caso, los estimados por CENIPALMA (Centro de investigación de Palma de Aceite) para diferentes etapas fenológicas de la

palma de aceite y mediante la siguiente ecuación:

$$ETc = ETo * Kc \quad (ec.5)$$

Seguido de su estimación, se procedió con su análisis espacial y la generación de los mapas de evapotranspiración del cultivo de palma de aceite bajo las condiciones del departamento del Magdalena.

2.2.4. Generación de los mapas y gráficos de las variables meteorológicas

Después del análisis de los datos meteorológicos y de suelos se procedió con su análisis espacial usando el software de información geográfica QGIS 3.22. Se generaron los mapas mediante el método de interpolación de Distancia Inversa Ponderada (IDW) propuesta por Watson y Philip (1985), ya que es el más utilizado para la construcción de mapas de distribución espacial de las tendencias de variables climáticas. Este es un método determinístico que asigna un mayor peso al punto más cercano y este disminuye a medida que la distancia aumenta.

Los datos interpolados fueron: precipitación acumulada (P), evapotranspiración de referencia, temperatura máxima (Tmx), temperatura mínima (Tmn), humedad relativa (Hr), radiación solar (Rs) y velocidad del viento (vv). Por su parte, con relación a las características de suelo, se generó el mapa de capacidad de retención de agua del suelo. Así mismo, se procedió con la generación de los mapas de la zonificación y las gráficas correspondientes a los balances hídricos de cada zona.

2.3. Zonificación agroclimática:

Para la obtención de la zonificación agroclimática de manera objetiva, en este estudio se utilizó como técnica de agrupamiento un análisis clúster (Teran, Jiménez, González, & Villaneda, 1998), el cual es un método que se basa en el análisis multivariado, que permite identificar grupos de gran homogeneidad y mayor diferencia entre los grupos (Arévalo, 2019). Específicamente se usó un análisis de clúster jerárquico con redes neuronales no supervisadas, mediante la función de Dendograma con el método Ward, el cual establece que la distancia entre dos clústeres se define por el aumento de la suma de los cuadrados y que, por el contrario, su unión genera el mínimo incremento del error cuadrático. Todo este análisis se realizó en el lenguaje de programación Python.

Adicional a lo anterior, buscando que esta zonificación sea detallada y representativa a las condiciones de la región para el manejo del agua en el cultivo de la palma de aceite, se consideraron no sólo las variables climáticas, sino también la topografía del terreno y aquellas que son consideradas de gran importancia para la agricultura, tales como los requerimientos hídricos del cultivo (demanda hídrica), su profundidad efectiva y las características del suelo, principalmente las relacionadas con la capacidad de retención de humedad de los suelos.

Una vez identificados los clústeres o zonas homogéneas, se procedió a determinar cada una de sus características de clima y suelo y con los resultados de requerimiento hídrico del cultivo de la palma realizado por CENIPLMA, se estimó la evapotranspiración del cultivo y se realizó el cálculo de balance hídrico en cada zona (Figura 3).

2.4. Balance hídrico por zona agroclimática identificada

El Balance Hídrico (BH) es una herramienta que consiste en contabilizar las diferentes entradas (Precipitación) y salidas de agua (Evapotranspiración, escorrentía, percolación profunda) en un volumen de control (Zona de raíces de los cultivos) a través del tiempo (Pereira et al, 2010). De esta manera permite determinar los posibles excesos o déficits de humedad en el suelo, a continuación, se presenta la ecuación general del BH (UNESCO, 1971).

$$\Delta S = P + I \pm qd - ET - R \quad \text{ec. 6}$$

Donde:

ΔS : cambio en contenido de humedad en el suelo

P : precipitación, mm

I : riego aplicado, mm

qd : agua perdida o ganada por filtraciones de drenaje o ascenso capilar, mm

ET : evapotranspiración, mm

R : escorrentía, mm

Para el presente estudio, con la información resultante, se calculó el BH en cada zona agroclimática identificada para establecer las áreas que son más favorables o restrictivas para el cultivo de la palma de aceite. Así mismo, permitirá determinar para cada zona, las épocas críticas donde la evapotranspiración del cultivo supera la precipitación y el almacenamiento de agua en el suelo y, por lo tanto, el cultivo sufre de estrés hídrico y se requiere de riegos suplementarios (requerimientos de riego).

Las entradas para estos balances hídricos fueron: precipitación con el 75% de ocurrencia, la evapotranspiración del cultivo joven ($K_c = 0.7$) y adulto ($K_c=0.9$), y la capacidad de retención de humedad del suelo.

3. RESULTADOS

3.1. Análisis de datos meteorológicos

3.1.1. Precipitación

Con relación a los datos de precipitación, para tener un cubrimiento total de la zona de estudio, se analizó los datos de 70 estaciones, de las cuales 57 son de tipo pluviométricos (PM), que sólo registra precipitación y 13 meteorológicas, entre climáticas principales (CP), climáticas ordinarias (CO) y agro-climatológicas (AC) (Figura 3). La diferencia entre estas 3 clases de estaciones meteorológicas definidas por el IDEAM está que la climatológica principal, registra precipitación, temperatura (máx. y min) a 2 m, humedad, viento, radiación, brillo solar, evaporación, cantidad de nubes, fenómenos especiales, por su parte una climática ordinaria, por lo general sólo registra precipitación, temperatura (máx. y min) a 2m y humedad. Con relación a la agrometeorológica, en adición a registros meteorológicos hacen determinaciones de la relación clima-plantas y registran temperatura del suelo a diferentes profundidades. El estudio de la calidad de información permitió escoger 55 estaciones, con las cuales se realizó el análisis de esta variable.

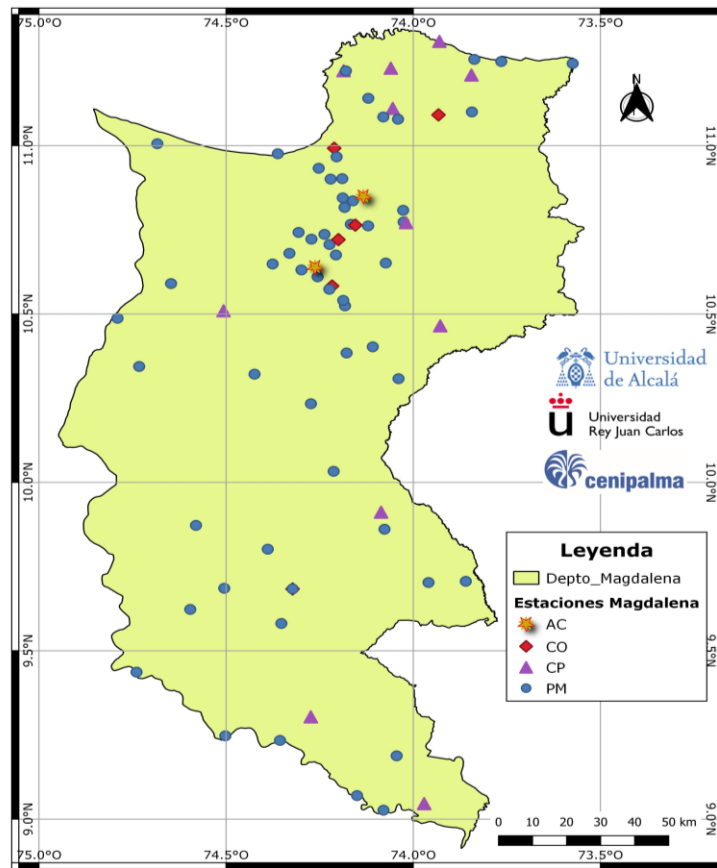


Figura 3. Distribución de estaciones meteorológicas empleadas en el departamento del Magdalena.

La precipitación varió entre 974 hasta 2467 mm y cubrieron rangos altitudinales entre los 4 y 2200 msnm. Se realizó un análisis de la precipitación en función a la altura en las estaciones evaluadas mediante los métodos de correlación de Pearson y de Spearman, dando como resultado un r de 0.57 y r de 0.48 respectivamente, indicando una correlación positiva moderada entre las dos variables (Precipitación y altitud), significando que a medida que una variable aumenta, la otra variable también tiende a aumentar, pero no necesariamente en la misma proporción (Figura 4). Conociendo la relación existente entre la precipitación y la altitud se realizó correcciones en el llenado de datos faltantes, con el método de la relación altitud-precipitación, que se basa en la relación empírica entre la precipitación y la altitud. Esta relación se establece a partir de datos observados en estaciones meteorológicas y se utiliza para estimar la precipitación en altitudes donde no se tienen datos.

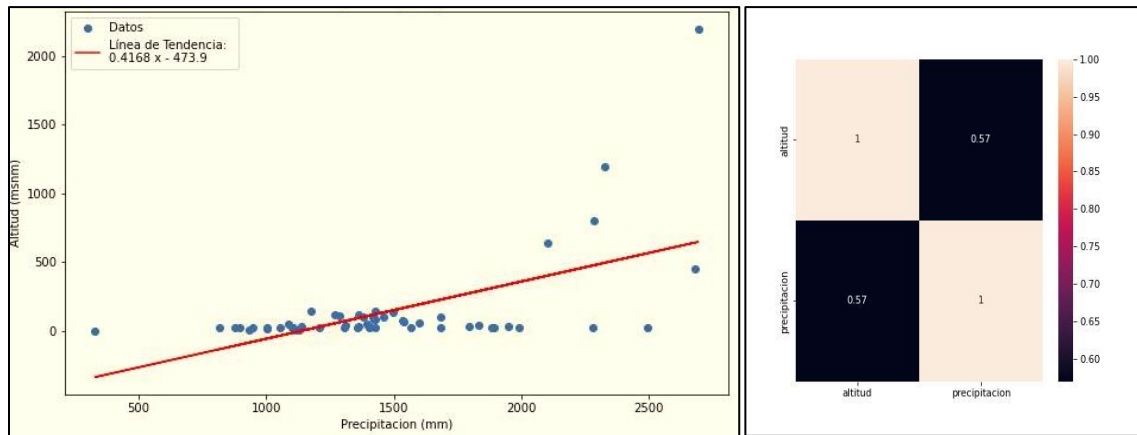


Figura 4. Correlación precipitación vs altitud.

Con esto realizado, se estimó la precipitación acumulada multianual (Figura 5) y la precipitación acumulada mensual multianual para la zona de estudio en el periodo de 1991-2021 (Figura 6). Con relación a la precipitación acumulada anual se destaca la variación de la precipitación para los diferentes años, siendo el valor máximo acumulado anual de 2327 mm/año registrado en el año 2010, que corresponde a el Fenómeno de La Niña y el valor más bajo de 974 mm/año para el año 2015, relacionado con la ocurrencia del fenómeno de El Niño. Sin embargo, es importante aclarar, que, dentro de este valor medio, en ciertas zonas del departamento, se registraron valores mínimos de precipitación entre 564 y 670 mm/año. Así mismo, se resalta que las menores precipitaciones se presentan en la zona baja del departamento. Esto puede detallarse en los mapas generados y que se presentan más adelante en este documento.

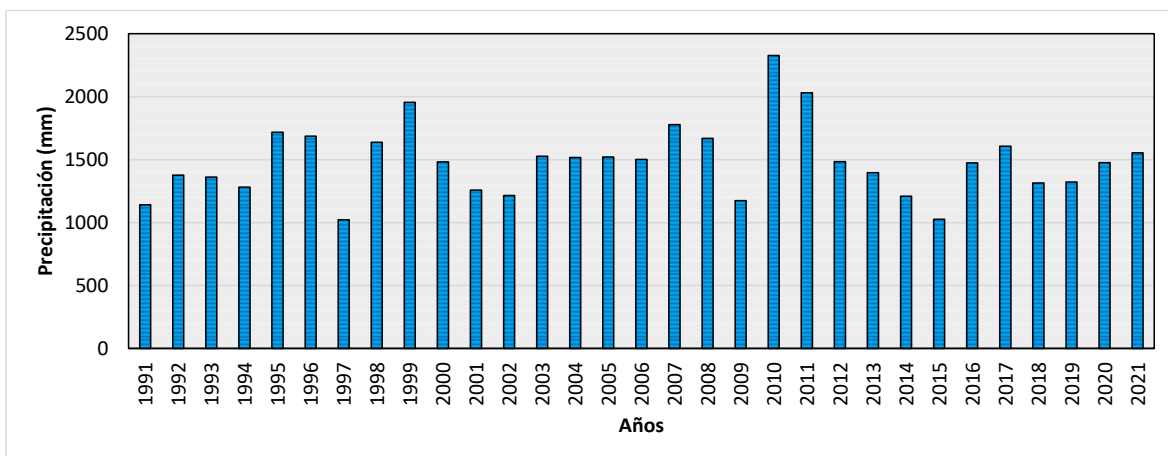


Figura 5. Precipitación acumulada anual del departamento del Magdalena – periodo 1991-2021.

Por otra parte, respecto a la precipitación acumulada mensual multianual (Figura

6), se identifica un comportamiento bimodal a lo largo del año, donde el periodo seco va entre los meses de diciembre a marzo, y se presentan dos temporadas de lluvia, la primera, entre abril y mayo y la segunda entre septiembre y noviembre, registrándose los picos de lluvia en los meses de septiembre y octubre con valores medios de 208 y 240 mm respectivamente, mientras que el mes más seco es enero con precipitaciones inferiores a los 15 mm. También se observa una temporada de menor intensidad de lluvia entre los meses de junio y agosto.

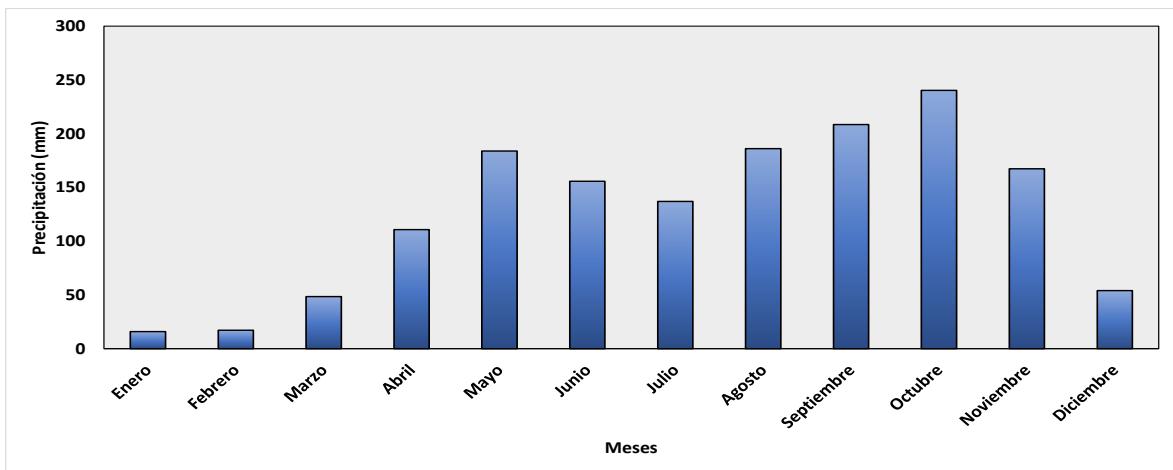


Figura 6. Precipitación acumulada mensual multianual del departamento del Magdalena para el periodo 1991-2021.

A partir de series anuales y mensuales multianuales de la precipitación acumulada para las 55 estaciones meteorológicas, se generaron los mapas de precipitación para observar su distribución. En la Figura 7, se muestra el promedio de la precipitación acumulada anual para el departamento del Magdalena y en la Figura 8, la precipitación acumulada mensual multianual para la normal climatológica de 1991-2021. En general, se puede decir que los menores valores de precipitación se registran en la parte central del departamento.

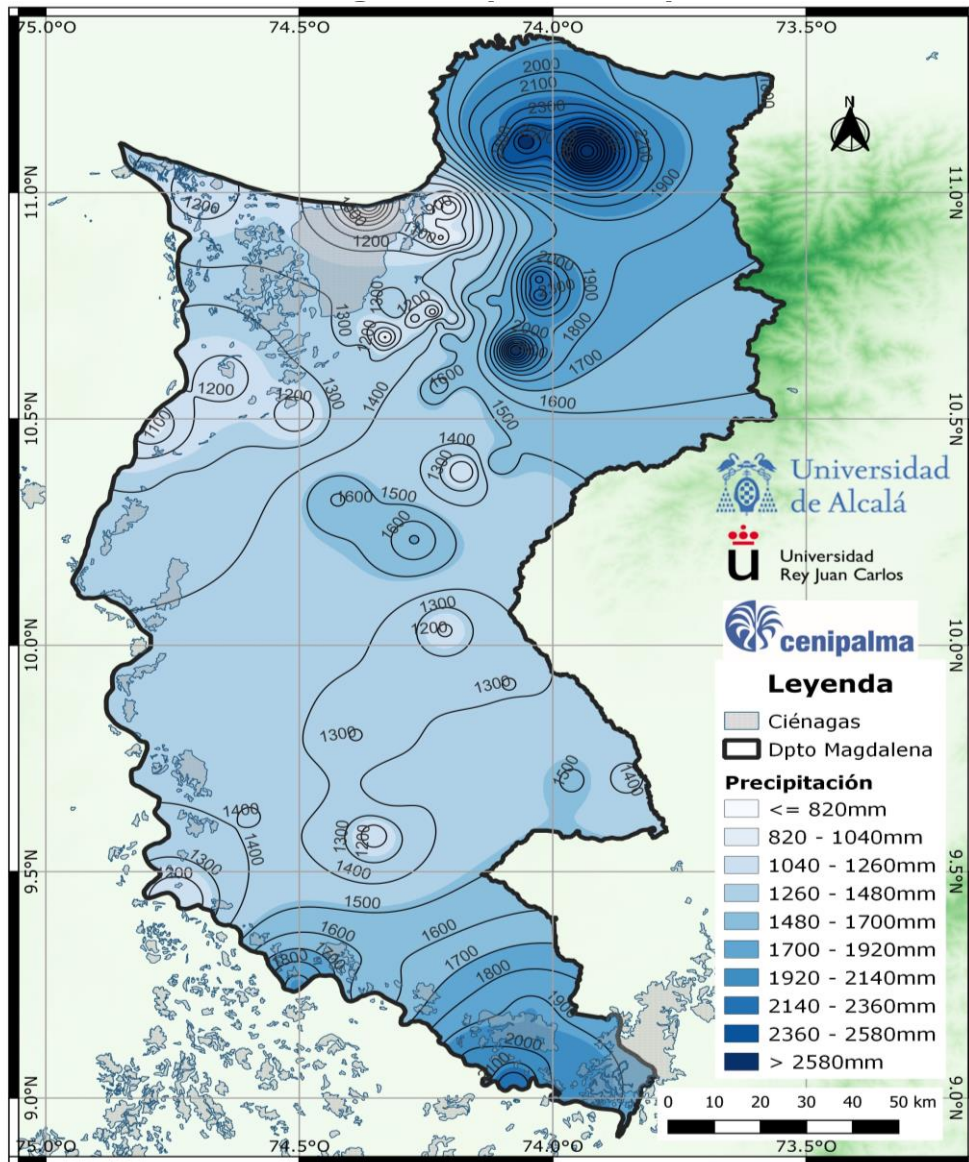
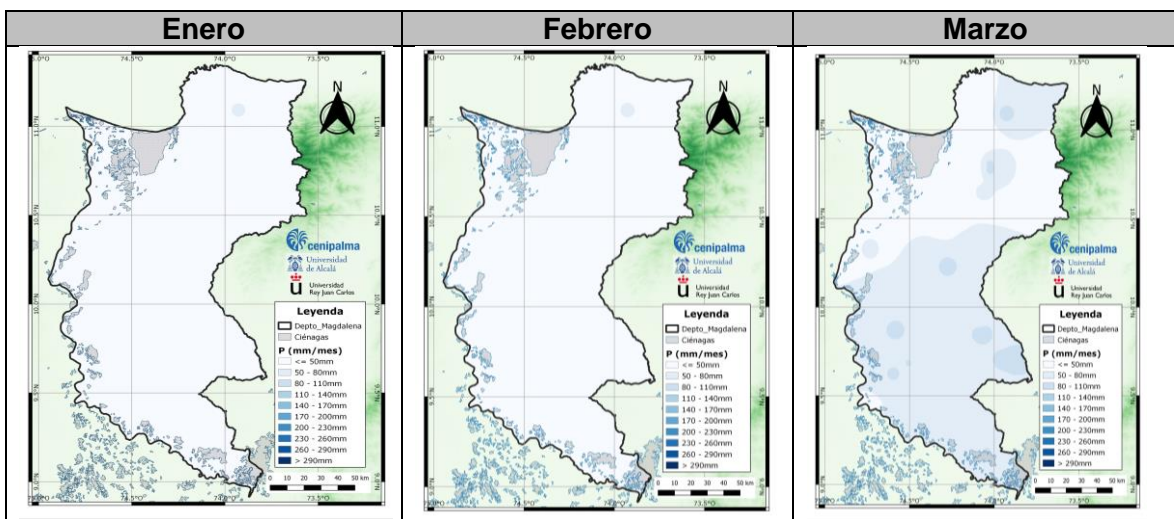


Figura 7. Distribución de la precipitación acumulada multianual en el departamento del Magdalena (1991-2021).



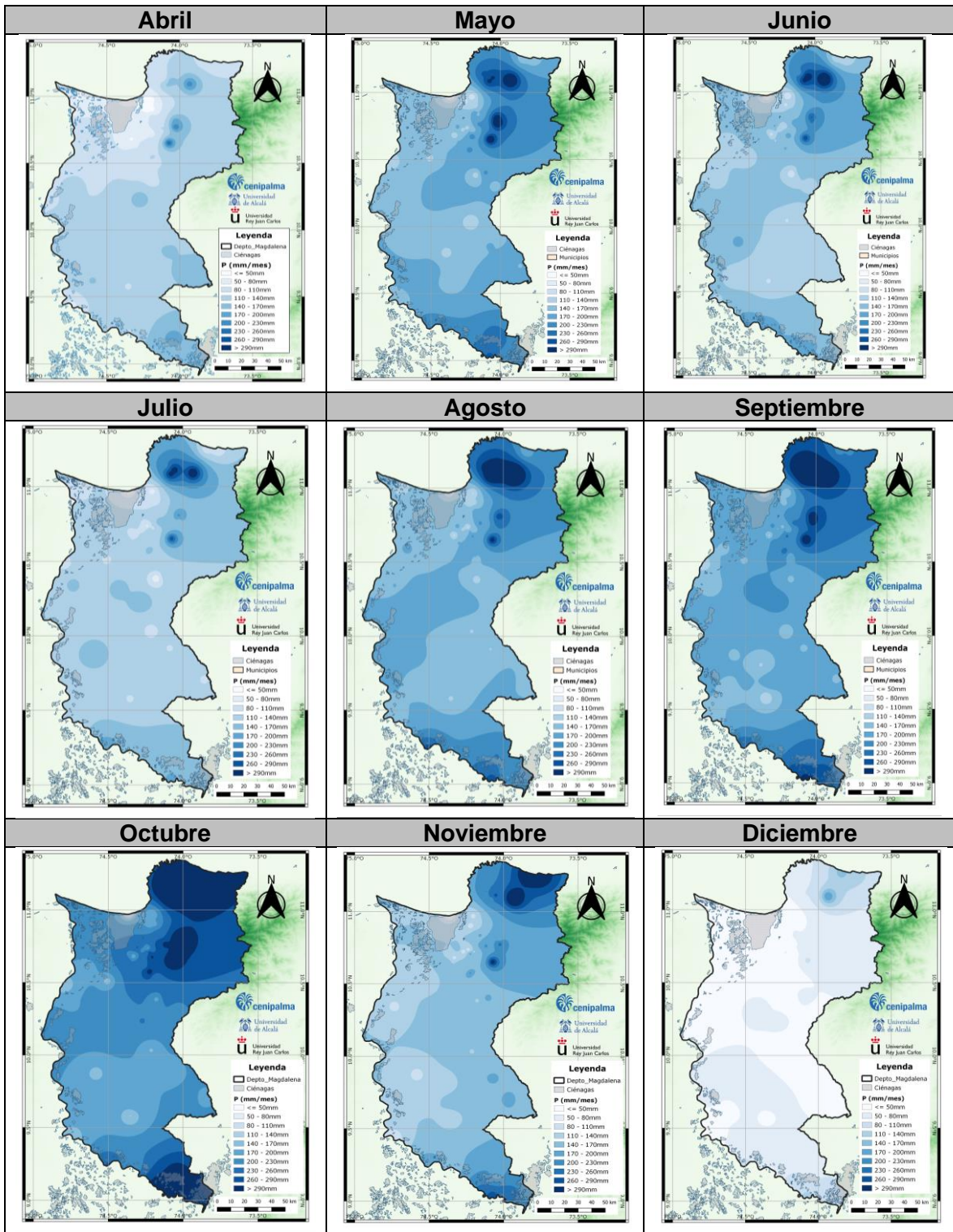


Figura 8. Representación de la precipitación acumulada mensual multianual en el departamento del Magdalena (1991-2021).

Continuando con el análisis de la precipitación en el departamento del Magdalena, se determinó el comportamiento probabilístico de la lluvia mensual (probabilidad de Weibull) para el periodo de 31 años, lo cual brinda credibilidad a la tendencia que resultó. Se seleccionaron las probabilidades de excedencia de 75% y 25%, en

donde se encontró una precipitación acumulada de 1150 mm/año y 1808 mm/año respectivamente (Figura 9). Teniendo en cuenta que la precipitación del 75% probable es un valor que se encuentra por debajo de la precipitación promedio (50%) de 1426 mm/año, se puede considerar como un año seco, y, así mismo, para la probabilidad del 25% que está por encima de la media, se puede relacionar con los años húmedos, esto se pudo corroborar con los datos publicados por la OMM y el IDEAM sobre los fenómenos naturales de El Niño y La Niña ocurridos durante el periodo evaluado (Tabla 1).

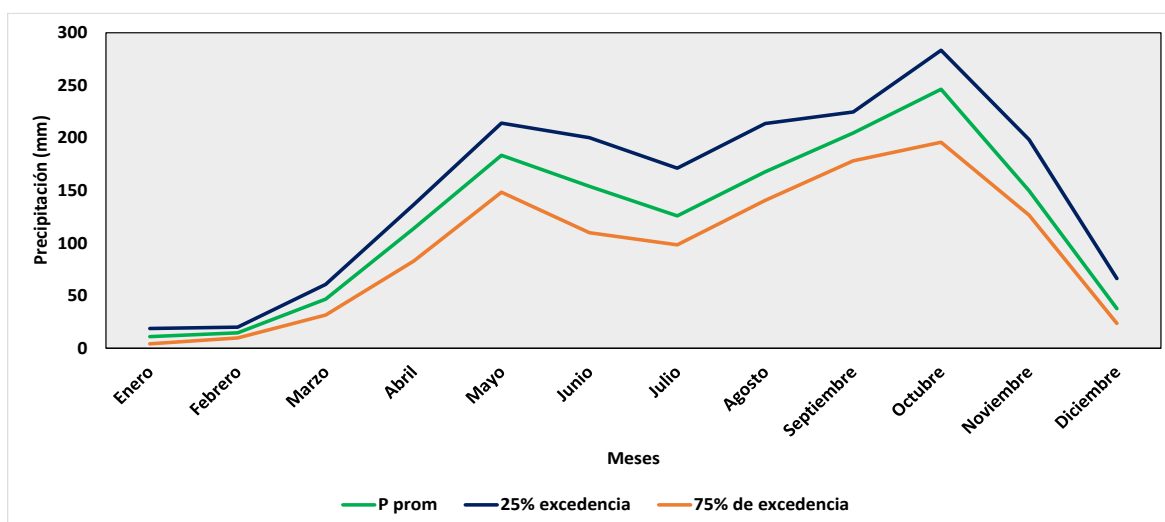


Figura 9. Precipitaciones probables para el departamento del Magdalena (1991-2021).

Tabla 1. Relación precipitación del departamento del Magdalena con los fenómenos El Niño y La Niña.

Año	Valor pico ONI	Intensidad	Precipitación (mm)
1991	1.652	El Niño fuerte	1050.2
1994	1.177	EL Niño moderado	1266.9
1997	2.668	El super Niño	1010.0
2002	1.498	EL Niño moderado	1176.2
2009	1.53	El Niño fuerte	1113.1
2015	2.603	El super Niño	917.9
1995	-0.875	La Niña débil	1718.2
1998	-1.42	La Niña moderado	1626.0
1999	-1.51	La Niña fuerte	1952.7
2007	-1.708	La Niña fuerte	1778.2
2008	-0.842	La Niña débil	1640.3
2010	-1.672	La Niña fuerte	2326.8
2011	-1.048	La Niña moderado	2028.9

*Fuente: NOA (ENOS).

3.1.2. Temperatura, humedad relativa, Radiación solar y Velocidad del viento

De acuerdo con la FAO, 2006, los principales factores climáticos que intervienen en el comportamiento de la Evapotranspiración potencial en una región son la temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento y es por ello, que es de vital importancia su entendimiento. Como resultado de este análisis, se tiene que, para el departamento del Magdalena, en la normal climatológica seleccionada (1991-2021) se registran los siguientes valores promedio multianuales para las variables climatológicas: Temperatura media: 27,3°C, Temperatura máxima: 31.1°C, Temperatura mínima: 23.1°C, Humedad relativa promedio: 78.9%, Radiación solar: 4.14 kW/h*m², y Velocidad del viento: 0.84 m/s.

Temperatura: Al analizar la temperatura mensual multianual, se puede observar que, de manera general para el departamento, no hay una variación significativa entre los meses, pero tienden a registrarse valores mayores en los meses secos de enero, febrero y marzo y los más bajos en el mes de octubre (Figura 10a).

Por otro lado, al realizar un análisis de regresión lineal a la serie de datos históricos anuales de temperatura media, se puede detallar una tendencia creciente en la pendiente a lo largo del tiempo (Figura 10b). El crecimiento promedio estimado es de 0.25°C cada 10 años, lo que indicaría que para el año 2100 se puede esperar un cambio de temperatura media de 2.7°C, siendo ligeramente mayor al proyectado por el IDEAM de 2.4°C para el mismo periodo en el departamento (IDEAM, 2022).

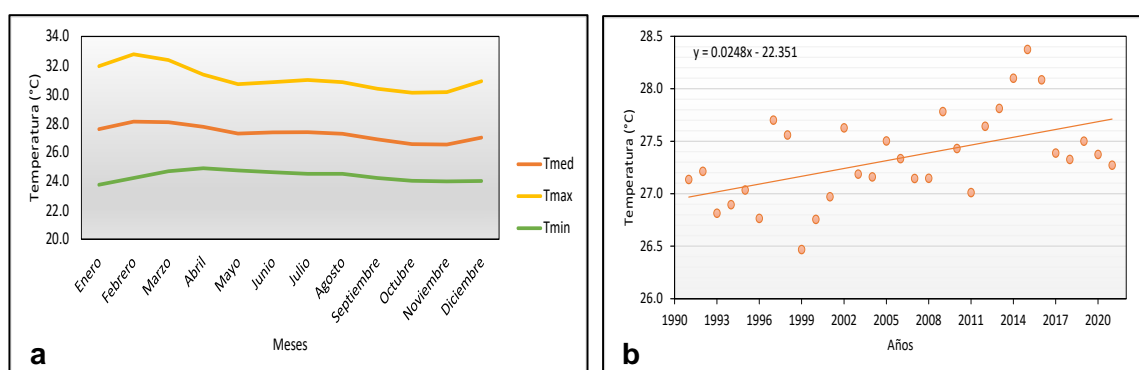


Figura 10. Temperatura mensual multianual en el departamento del Magdalena (a) y regresión lineal (b) para la serie de datos del 1991-2021.

Al observar su distribución espacial (Figura 11), se puede mencionar que en la mayor parte de la superficie del departamento (zona plana) la temperatura está variando entre los 28°C a 24°C. Por su parte, en la Sierra Nevada de Santa Marta

la temperatura disminuye por efectos de la altitud, hasta alcanzar los 4°C del promedio multianual y se corrobora con lo reportado por el estudio realizado por el IGAC en el año 2009.

Teniendo en cuenta que, para la serie histórica seleccionada en este estudio, no se contó con datos suficientes de las estaciones climáticas del IDEAM, para el análisis de esta variable, se tomó los datos de imágenes satelitales, las cuales, dentro de su proceso de validación, principalmente en la zona de la Sierra Nevada de Santa Marta, hubo la necesidad de utilizar el método propuesto por Dualiby y colaboradores (2018), para corregir a través de una regresión lineal simple entre altura y temperatura.

$$T = 29.097 + (-0.0063 \cdot h) \quad \text{ec. 7}$$

$$R^2 = 0.99$$

$$\text{Gradiente térmico (}^\circ\text{C/100m)} = -0.57$$

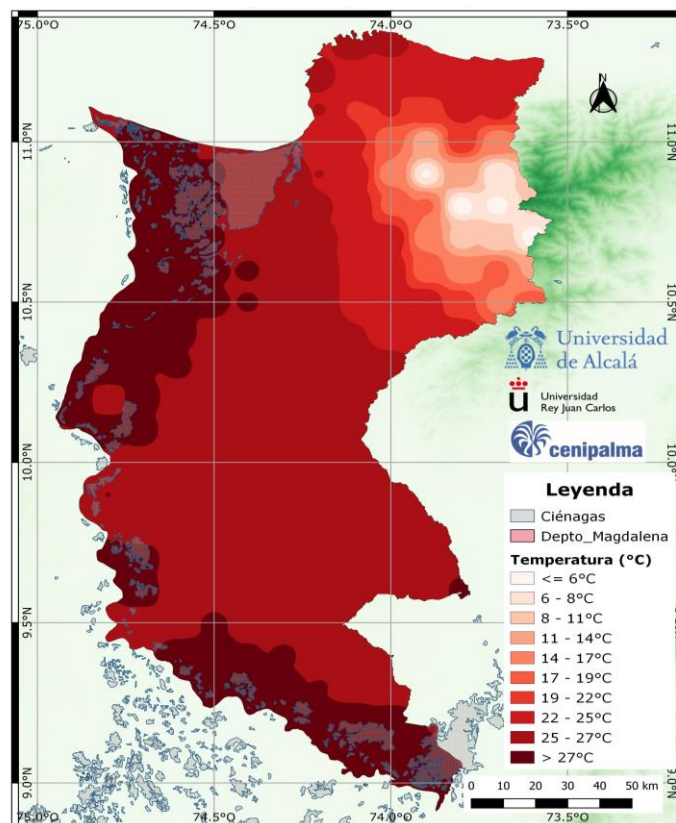


Figura 11. Distribución espacial de la temperatura media multianual en el departamento del Magdalena (1991-2021).

Radiación solar (Wh/m²): Al analizar la radiación solar mensual multianual en el departamento, se tiene que los valores más bajos se registran en los meses de

mayo y octubre, cercanos a 321.6 (Wh/m^2) y los más altos en los meses entre enero y marzo con valores alrededor de 383.4 (Wh/m^2) (Figura 12 a). En los otros meses se puede señalar que permanecen constantes con valores cercanos. Por otro lado, al realizar la regresión lineal de los datos multianuales (Figura 12 b), se observa una tendencia creciente en el periodo evaluado. El crecimiento promedio estimado es de 0.25 Wh/m^2 cada 10 años

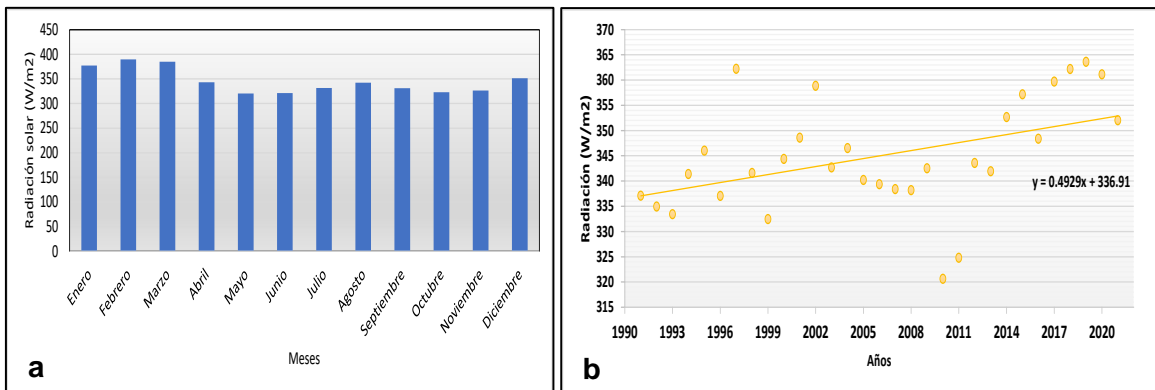


Figura 12. (a) Radiación solar mensual multianual y (b) regresión lineal para los datos multianuales en el departamento del Magdalena (1991-2021).

Humedad relativa (%) y Velocidad del viento (m/s): Con relación a la humedad relativa, esta presenta los valores mínimos entre enero y abril, cerca al 71%, principalmente en la parte plana del departamento, mientras que en el resto del año se mantiene constante con valores cercanos al 82% (Figura 13a), se puede decir que esta variable sigue la tendencia de la precipitación. Por su parte, al analizar los datos de velocidad del viento, sus mayores valores se registran en los meses de época seca, y los valores más bajos en los meses lluviosos, con el mínimo en octubre cercano a 0.55 m/s (Figura 13b).

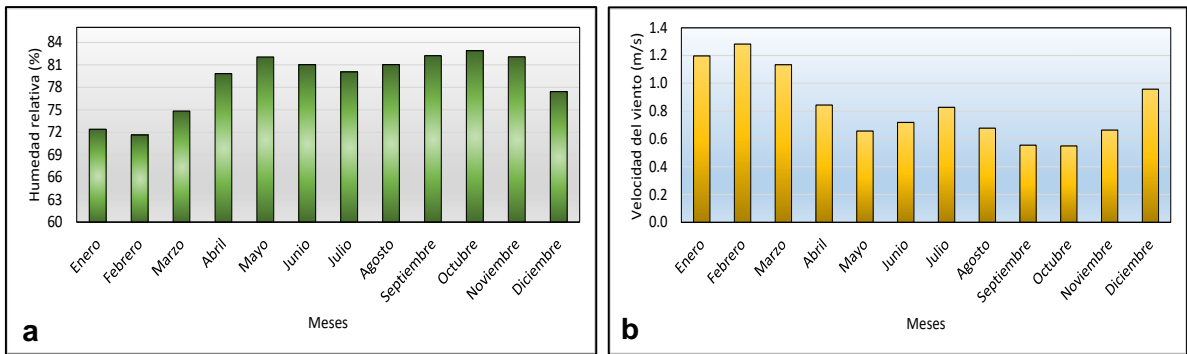


Figura 13. (a) Humedad relativa mensual multianual y (b) Velocidad del viento mensual multianual para el periodo 1991-2021.

Al observar la distribución espacial de estos parámetros (Figura 14 a y b) se puede mencionar que en la parte central del departamento se encuentran los valores de humedad relativa más bajos y por su parte, la radiación solar, sus valores máximos se registran en la zona más cercana a la costa (noroeste), en los límites con el mar caribe.

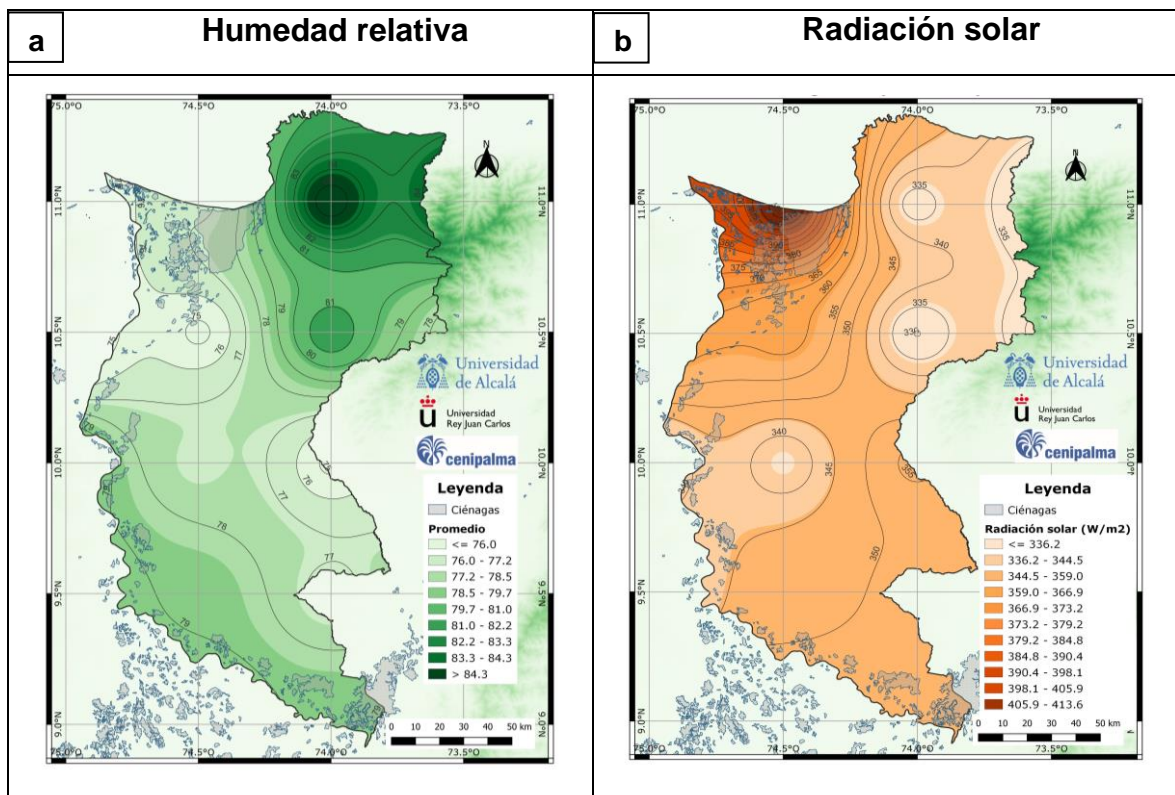


Figura 14. Distribución espacial de la HR (a) y la VV (b) media multianual en el departamento del Magdalena

3.1.3. Evapotranspiración de referencia (ET₀):

Como resultado de este análisis, se tiene que la ET₀ acumulada multianual para el departamento del Magdalena en el periodo de estudio tiene un valor promedio de 2291 mm/año, con un mínimo de 2085 mm/año registrado en el año 2010 y un

máximo reportado en el año 2015 de 2517 mm/año, años en los que ocurrieron los fenómenos de El Niño y La Niña extremos, respectivamente (Figura 15). Expresando en términos diarios, se tiene un valor medio de ETo igual 6.3 mm día^{-1} , con un rango entre 3.4 y 11.9 mm día^{-1} . Así mismo se destaca una tendencia a un aumento leve de este parámetro, lo que puede estar muy relacionado con los aumentos de temperatura y radiación solar observados durante este periodo (Figura 16). Es importante resaltar, que, dentro del departamento, y específicamente en la zona plana, hay regiones con valores de ETo medios superiores a 8 mm día^{-1} , lo cual se observará más adelante en los mapas de distribución.

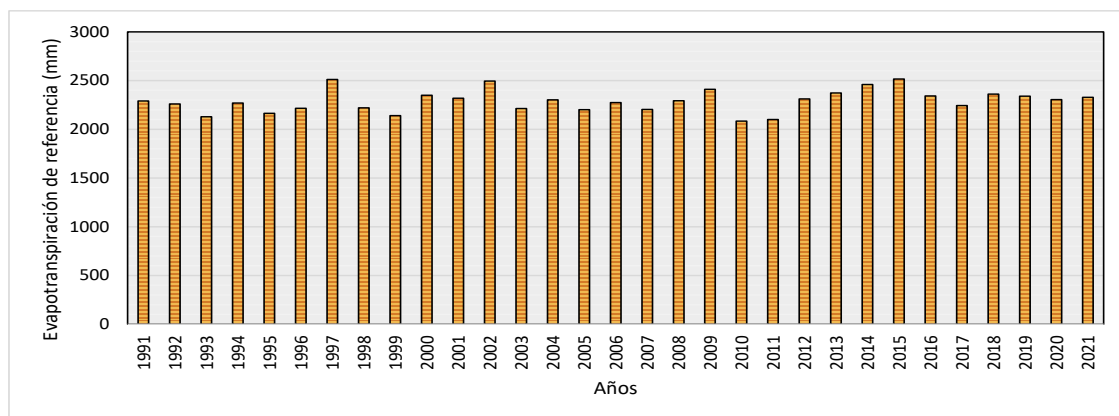


Figura 15. Evapotranspiración de referencia acumulada anual del departamento del Magdalena (1991-2021).

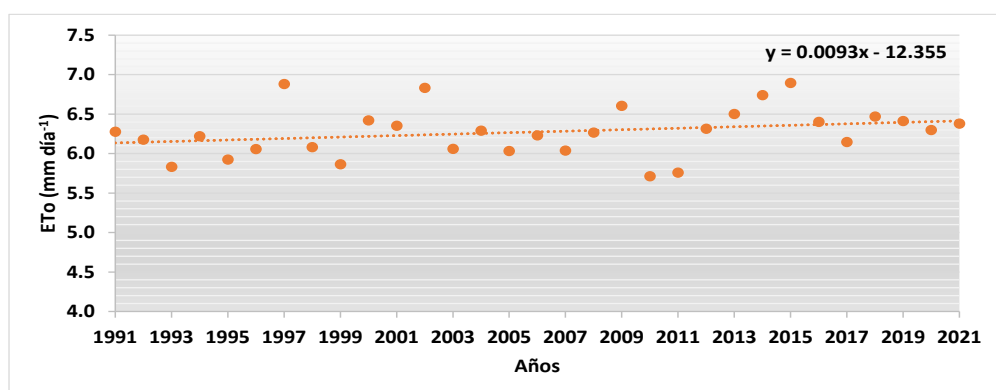


Figura 16. Tendencia de la ETo diaria en el periodo de evaluación 1991-2021.

Por otro lado, con relación al análisis de la ETo acumulada mensual multianual (Figura 17), se obtuvo un valor medio de 196 mm mes^{-1} , y se evidencia una

tendencia bimodal inversa a la analizada en la precipitación a lo largo del año, siendo mayor en los meses de época seca (valor medio igual a 239 mm mes^{-1}) que en los meses de lluvia (valor medio igual a $174.2 \text{ mm mes}^{-1}$), de los cuales, en septiembre y octubre son los más bajos iguales a 152.6 y $151.6 \text{ mm mes}^{-1}$ respectivamente. Así mismo, se nota una clara influencia de los parámetros como temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento en el comportamiento de esta variable en el departamento.

En la Figura 17, también se indica los valores mensuales multianuales con probabilidades de excedencia del 25% y 75%, los cuales al validar corresponden al comportamiento de años secos y húmedos respectivamente. En este caso, no se observa una disminución o aumento marcado, como lo observado en la precipitación.

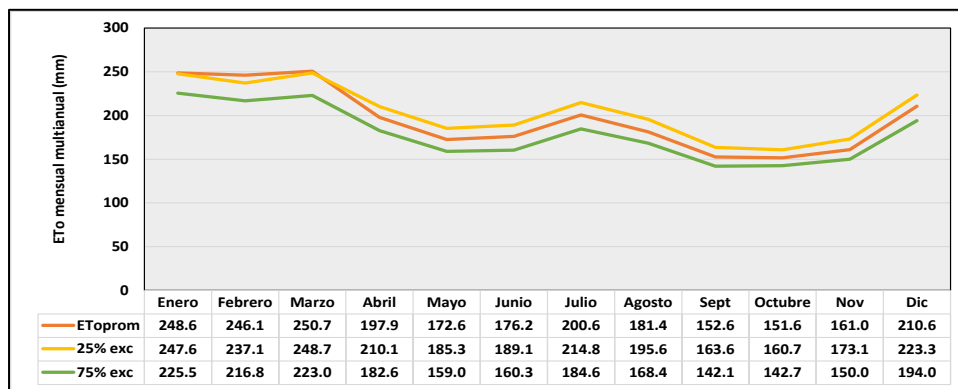


Figura 17. ETo mensual multianual para el departamento del Magdalena (1991-2021).

En términos diarios, la ETo varía desde 4.8 mm día^{-1} a 12 mm día^{-1} en los meses secos y varía entre 3.4 mm día^{-1} a 9.4 mm día^{-1} en los meses de lluvia (Figura 18) con los valores más altos en la parte plana del departamento (Figuras 19 y 20).

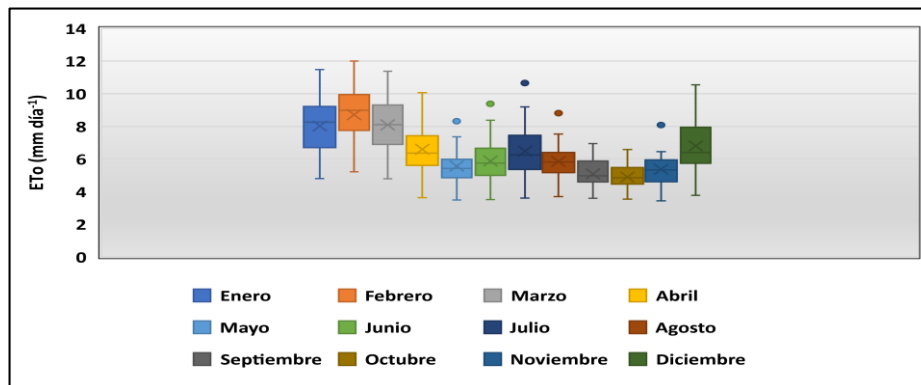


Figura 18. ETo diaria para el departamento del Magdalena (1991-2021).

Con relación a su distribución, cobra mayor relevancia el análisis de estos parámetros en las zonas donde se encuentra establecido el cultivo de la palma de aceite (zona plana) y es por ello, que se discutirá sobre los resultados encontrados en estas áreas. Por un lado, se puede mencionar que la evapotranspiración en los años secos ha sido mayor (2499 mm) que en los años húmedos (2149 mm) en el periodo evaluado y de manera detallada, se identifica sectores en el norte y sur del departamento con los valores más altos de ETo acumulada anual superiores a los 2000 mm. En la parte central, donde se localiza el mayor número de hectáreas del cultivo, esta ETo fluctúa entre 2300 mm y 2700 mm. Por su parte en las áreas de la Sierra Nevada de Santa Marta se encuentran los valores más bajos aproximadamente valores medios de 1200 mm (Figura 19).

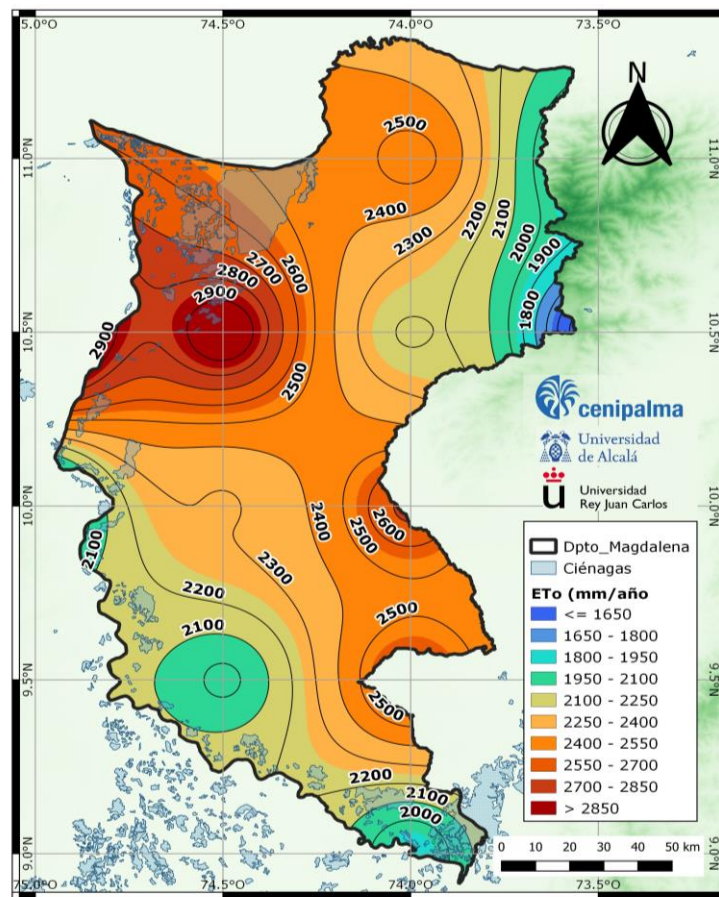


Figura 19. Distribución de la ETo acumulada multianual en el departamento del Magdalena (1991-2021).

Al analizar esta variable en los años húmedos y secos (Figura 20), se observa una variación menos significativa que la precipitación, pero de importancia a la hora de manejar el agua en la agricultura, principalmente en los años secos, pues mientras las lluvias se reducen en un 23% aproximadamente, la ETo aumenta en un 7% aproximadamente.

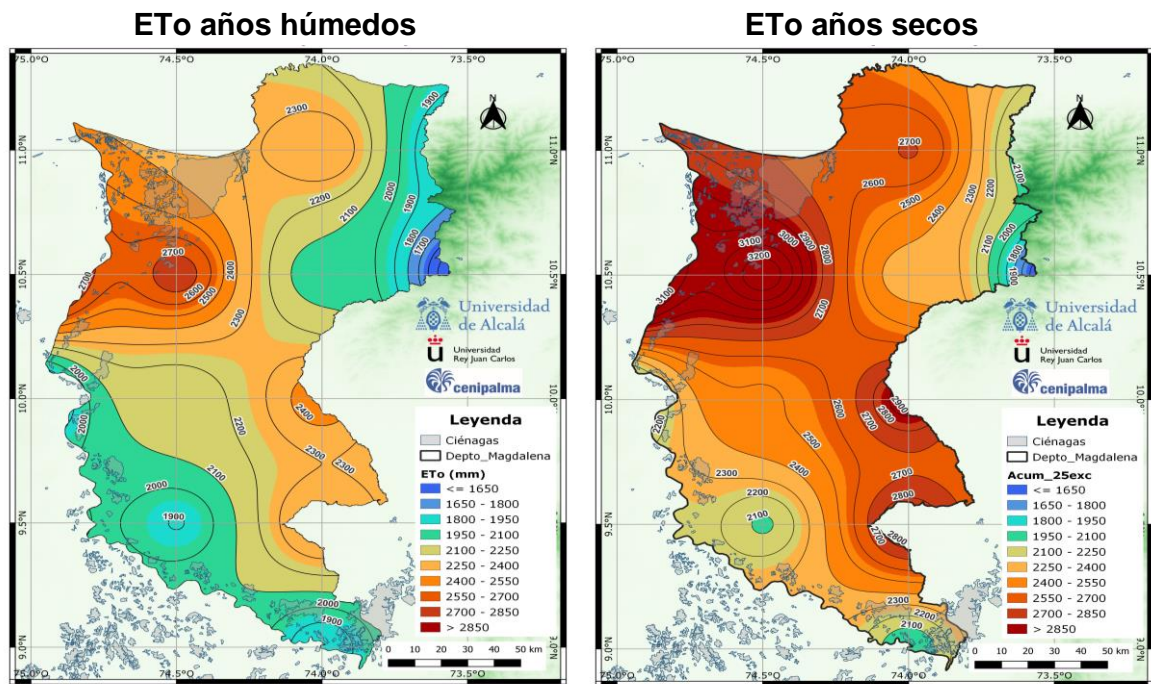


Figura 20. Distribución de la ETo acumulada multianual en el departamento del Magdalena (1991-2021).

3.1.4. Balance hídrico climático

Entendiendo que el balance hídrico a escala regional es una herramienta fundamental para la clasificación agroclimática del departamento del Magdalena, se procedió con su cálculo teniendo en cuenta los valores mensuales multianuales de precipitación y la evapotranspiración de referencia (Balance hídrico climático) en el periodo de estudio de 1991-2021. En la Figura 21, se muestra su valor medio para la región, en donde se tiene que en general se genera un déficit hídrico medio de 1052 mm/año, variando entre -5 mm/año y -1900 mm/año. Por su parte, sólo se observa excesos de humedad entre los meses de mayo, octubre, septiembre y noviembre con un valor entre 53 y 150 mm/año.

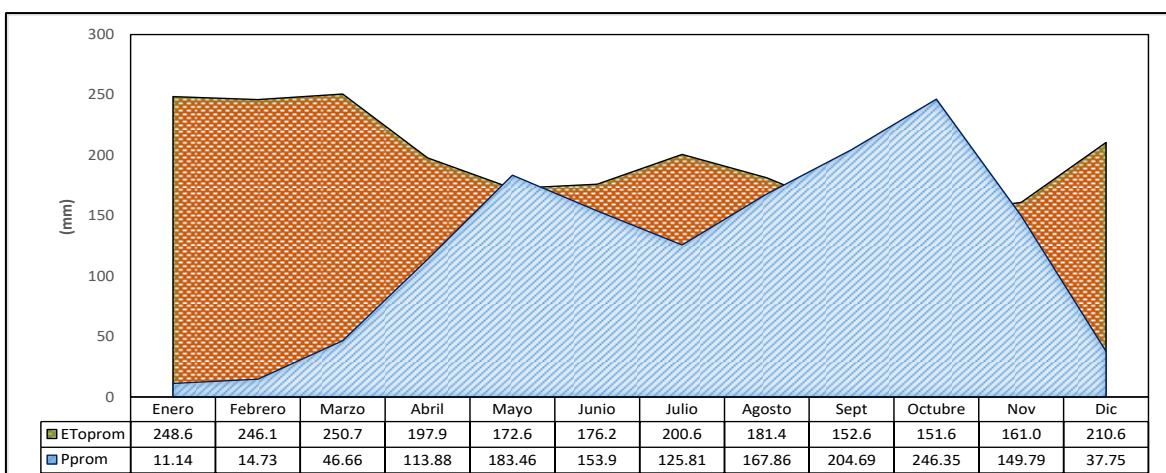


Figura 21. Balance hídrico climático del departamento del Magdalena para el periodo de 1991-2021.

Al analizar los mapas de balance hídrico climático (Figura 22), se puede inferir que en la región existen zonas críticas con balances hídricos significativos, donde la precipitación no compensa las pérdidas provocadas por la ETo en la mayor parte del año, agravándose en los años secos, pues la precipitación se reduce mientras que la evapotranspiración de referencia aumenta. Las zonas más críticas, localizadas en el sector norte del departamento, presentan déficit alrededor de los 1400 mm/año. En la parte central, el déficit hídrico fluctúa entre los 800 y 1200 mm/año, y sólo en la Sierra Nevada de Santa Marta empieza a reducir los déficits hídricos hasta alcanzar los 0 mm/año. Por su parte, con relación, a los excesos de humedad en la zona plana del departamento fluctúa entre 0 y 150 mm/año, mientras que, en la Sierra Nevada de Santa Marta, se pueden presentar excesos por encima de los 400 mm/año. Es por ello, que esta zona es de gran importancia, pues la fuente de aguas superficiales para el departamento.

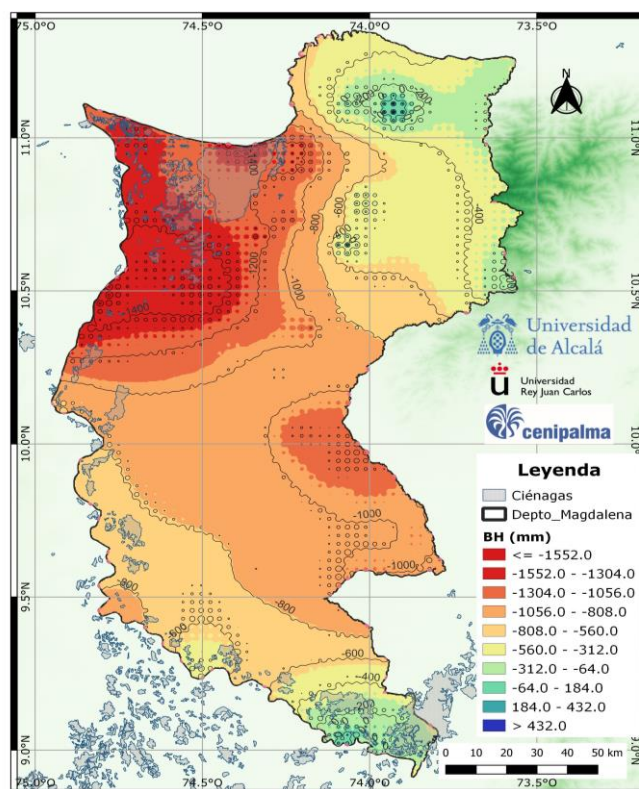


Figura 22. Balance hídrico climático del departamento del Magdalena

Es importante aclarar que los resultados de este balance hídrico, fue un insumo para la zonificación agroclimática, en donde cada una de ellas se le estimó también su balance hídrico agrícola, que incluye todos los parámetros, entre ellos, la lámina aprovechable de los suelos y los requerimientos hídricos del cultivo bajo

condiciones de la zona. Esto permitirá establecer las necesidades de riego o drenaje.

3.1.5. Evapotranspiración del cultivo de la palma de aceite en el departamento del Magdalena

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) es un parámetro fundamental que mediante el balance hídrico puede determinarse las pérdidas de agua desde la superficie del suelo dadas por los cultivos. Hay una relación directa de la ET_c con los crecimiento y rendimientos de las plantas, por lo tanto, se usa para estimar el agua disponible en el suelo y de acuerdo con la oferta de la lluvia, establecer las necesidades de riego o drenaje según el requerimiento de cada cultivo (FAO, 2006).

En este estudio se determinó con la relación de la ETo y el Kc del cultivo estimado por CENIPALMA para diferentes etapas fenológicas y cultivare (tdelgado et al, 2022). Para el análisis, se utilizó un Kc de 0.7, para palma joven entre 2 y 4 años y un Kc igual a 0.9, para palma de aceite adulta mayores a 5 años. Como se observa en la Figura 23, para palma adulta se obtuvo un valor medio de 176.3 mm mes⁻¹, y para palma de aceite joven de 137.1 mm mes⁻¹. Siguiendo la tendencia de la ETo, se presentan los mayores valores en los meses de época seca (valor medio para palma adulta y joven igual a 215 y 167 mm mes⁻¹ respectivamente) que en los meses de lluvia (valor medio igual a 153.4 y 118 mm mes⁻¹ para palma adulta y joven respectivamente). Teniendo en cuenta la precipitación mensual multianual de la Zona, se podría decir que el cultivo requiere riego en los meses de diciembre a abril y el mes de julio, sin embargo, este análisis se realiza más adelante para cada zona agroclimática determinada.

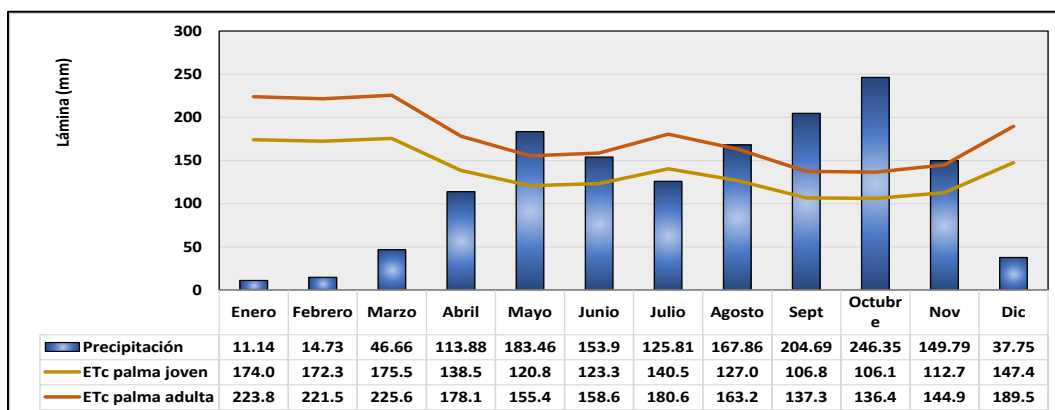


Figura 23. Evapotranspiración media de la palma de aceite joven y adulta en del departamento del Magdalena.

Analizando su distribución (Figura 24), se puede mencionar que, en la parte central, donde se localiza el mayor número de hectáreas del cultivo, los requerimientos hídricos tanto para palma adulta y joven son los más altos y están fluctuando entre 2000 mm y 2500 mm para palma adulta y entre 1600 y 1900 mm para palma joven. Actualmente, los palmicultores todavía desconocen los requerimientos hídricos del cultivo según las características de cada región, y, por lo tanto, estos resultados son un insumo para su planificación en el manejo del agua del cultivo, sin embargo, se recomienda siempre realizar los balances hídricos diarios para ajustar las necesidades de riego a las condiciones actuales de cada plantación.

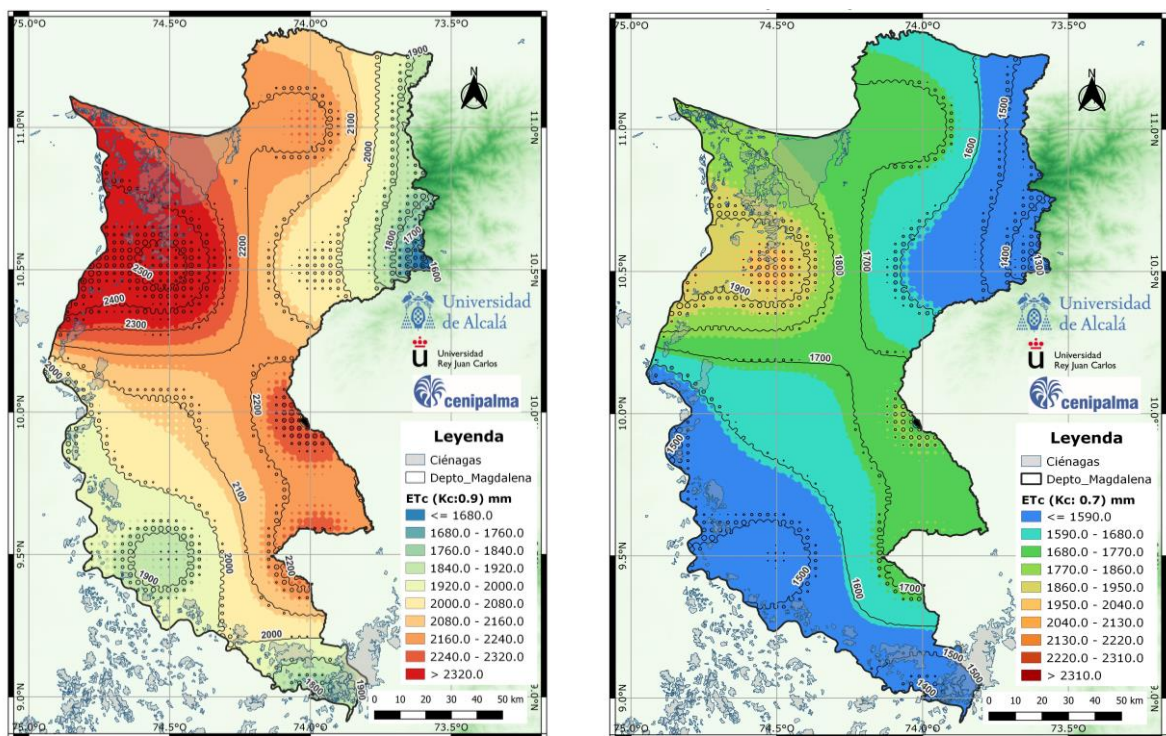


Figura 24. Evapotranspiración del cultivo acumulada anual para palma de aceite joven (b) y adulta (a).

3.1.6. Caracterización suelos en el departamento del Magdalena

Después de efectuar una revisión al estudio de suelos realizado al departamento por el IGAC (IGAC, 2009), se puede mencionar que el área donde se establece el cultivo de la palma de aceite pertenece a un clima cálido y los relieves en general son planos (pendientes de 0 a 3%). Dentro de estos paisajes, los suelos usualmente presentan texturas medias a finas, son bien drenados, moderadamente profundos y presentan una fertilidad natural moderadamente alta, pero se evidencia problemas de desbalance de bases. Para la determinación de la Capacidad de

retención de humedad de estos suelos, se tomó para cada uno de los perfiles estudiados, las propiedades hidrodinámicas como textura, estructura, Da, CC y PMP. Después de su procesamiento, se estimó la lámina de agua aprovechable hasta los 60 cm de profundidad, ya que esta se considera la profundidad efectiva para el cultivo de la palma, en su etapa adulta. En total se obtuvieron un total de 110 puntos, los cuales fueron interpolados para obtener su distribución espacial. Como se mencionó anteriormente, predominan los suelos de textura franca, franco arenoso y arenoso, los cuales se relacionan con una capacidad de retención de moderada a baja. Predomina la estructura de bloques subangulares, las cuales pueden generar una resistencia a la penetración y el movimiento del agua (infiltración moderada). El valor medio de la densidad aparente es de 1.6 g cm^{-3} , encontrándose valores mínimos de 1.1 g cm^{-3} y máximos de 1.8 g cm^{-3} , indicando problemas de compactación, lo que puede limitar la infiltración del agua. Finalmente, se tiene una lámina media de agua aprovechable igual a 66.8 mm, con valores mínimos cercanos a los 18 mm (suelos de muy baja retención de humedad) y valores máximos de 152.9 mm (alta capacidad de retención) (Figura 25).

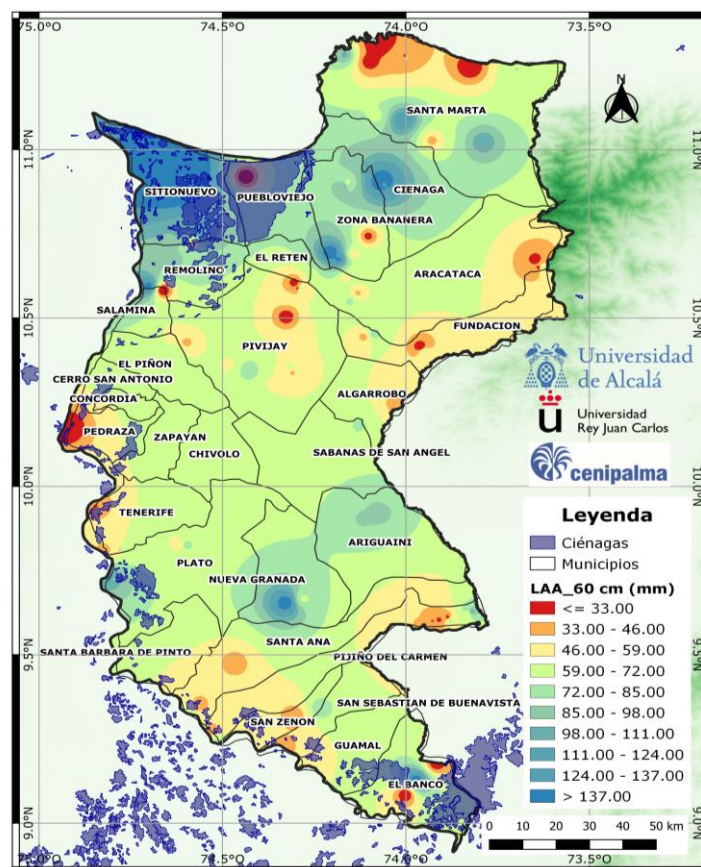


Figura 25. Distribución espacial de la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo a 60 cm de profundidad

3.1.7. Topografía del departamento del Magdalena

Conocer la topografía del terreno de una zona es importante para la determinación de la zonificación agroclimática, ya que como se ha mostrado anteriormente, tiene influencia en el comportamiento de los diferentes parámetros climáticos, como la precipitación y temperatura principalmente, e incluso en las características de los suelos. Como se observa en la Figura 26, en el departamento del Magdalena se puede tener altitudes desde 0 msnm hasta más de 4000 msnm (sierra nevada de Santa Marta) (Figura 26). De acuerdo con el IGAC (IGAC, 2009), en esta región se identifican 5 paisajes y los define así:

Paisaje de montaña: son gran elevaciones del terreno con más de 300 metros de desnivel, sus laderas complejas presentan declives superiores al 30%.

Mega cuenca de sedimentación: El IGAC explica que esta Mega cuenca está asociada a procesos depositación continental, marina y de las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta. Dentro de esta se presentan los paisajes de lomerío (alturas menores de 300 m), planicie (pendientes menores al 3%) y valles (terrenos planos comprendidos entre dos áreas de relieves superiores).

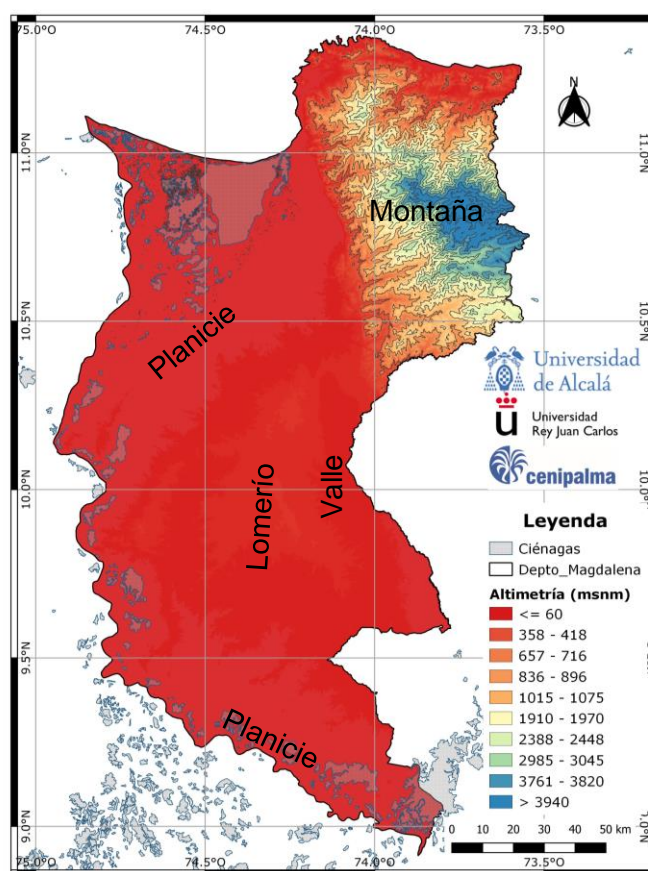


Figura 26. Mapa altimétrico del departamento del Magdalena.

3.2. Zonificación agroclimática del departamento del Magdalena

A partir de un análisis clúster jerárquico, realizado mediante dendograma de los datos mensuales del balance hídrico climático, la capacidad de almacenamiento de agua del suelo y la altitud del terreno extraída de la capa del mapa altimétrico se obtuvo la zonificación, donde se determinan zonas con igual condición climática y de suelo en el departamento del Magdalena. Como se mencionó en la metodología, la zonificación se realizó utilizando el lenguaje de programación Python.

Al observar el dendograma (Figura 27) se identifica la cohesión de los conglomerados que se han formado. Partiendo de la muestra inicial de 2585 datos de los pixeles se generaron los diferentes conjuntos que corresponden a los datos que tienen mayor similitud entre sí. A medida que la distancia euclidiana aumenta, los conjuntos van disminuyendo, hasta generarse un único conjunto de datos. Para los datos analizados se definió una distancia euclidiana de 5, lo que permitió identificar 12 conjuntos diferentes de conglomerados (12 zonas agroclimáticas).

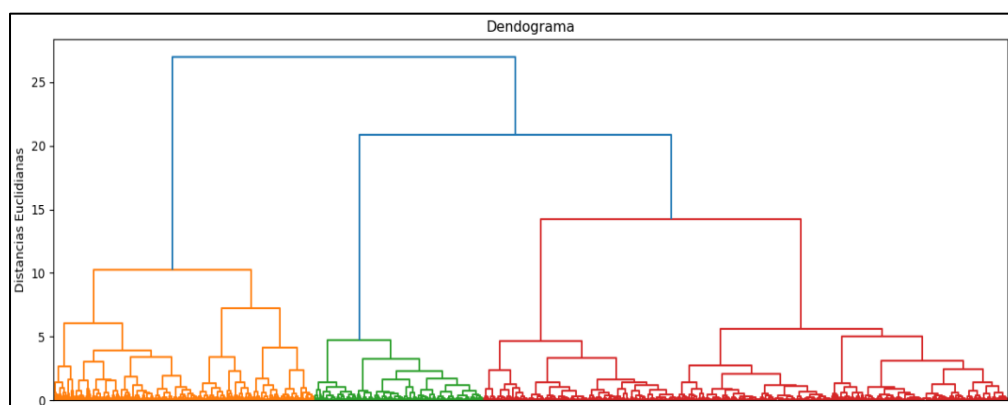


Figura 27. Dendrograma para el departamento del Magdalena generado mediante lenguaje Python.

En la Figura 28, se indica el resultado de la determinación de los clústeres o zonas agroclimáticas homogéneas para el departamento del Magdalena. Dentro de estas 12 zonas, 4 corresponden a la Sierra Nevada de Santa Marta (zonas: 1, 2, 3, 4), las cuales van desde una altitud de 300 msnm hasta > 2000 msnm. Por lo tanto, presenta una limitante para el establecimiento de cultivos industriales, además esta zona es un área de alto valor de conservación y no puede ser intervenida. Actualmente, en las altitudes de 900-1000 msnm siembran café de alta calidad y alimentos de pan coger.

Por lo anterior, nuestro análisis se enfocará en las zonas agroclimáticas localizadas en la mega cuenca de sedimentación, las cuales corresponden a las zonas 5,6,7,8,9,10,11 y 12. En esta área es en donde el cultivo actualmente se encuentra ampliamente establecido.

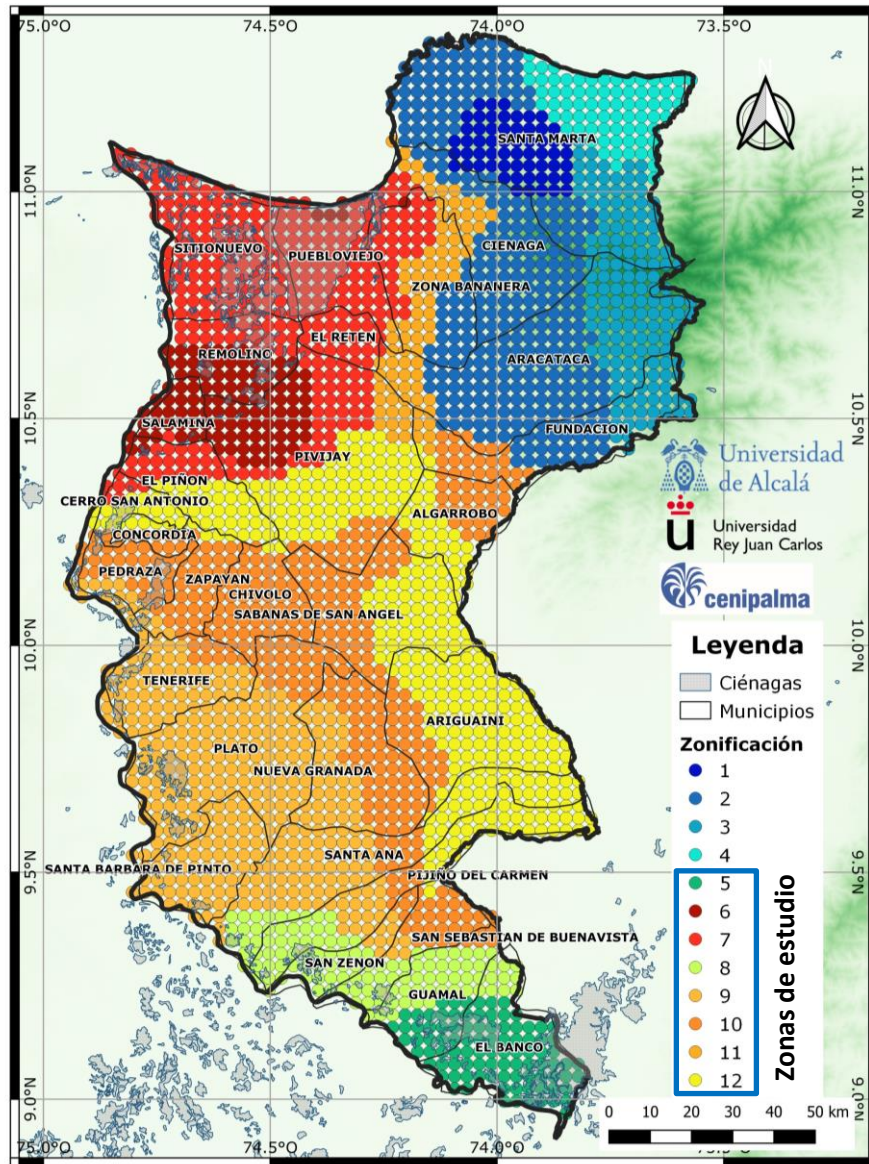


Figura 28. Zonificación agroclimática del departamento de Magdalena para la palma de aceite.

3.2.1 Análisis de cada una de las zonas agroclimáticas

Como se mencionó anteriormente, los análisis correspondientes se realizarán a las zonas localizadas en la parte plana del departamento, entre estos análisis el balance hídrico de cada una de ellas. Otro aspecto importante para destacar es que si bien, la zona 8, que abarca los municipios de San Zenón y Guamal, localizados

al sur del departamento presenta un menor déficit hídrico (-620 mm/año), actualmente no se encuentra reportado siembras del cultivo en esa zona. Una de sus limitantes puede ser la presencia de suelos de muy baja retención de humedad que representa mayor frecuencia de riegos para mantener un desarrollo adecuado de las plantas. En la Tabla 2 se resume las principales características de estas 8 zonas para un año normal. Las zonas se organizaron teniendo en cuenta el área del cultivo de la palma establecido, y también se identificó los municipios que se incluyen dentro de cada zona agroclimática.

En el departamento, el cultivo de la palma se encuentra sembrado en mayor proporción en las zonas agroclimáticas 7 y 11, que corresponden a los municipios de Zona Bananera, Aracataca, Fundación, El Retén y parte de Pivijay. En estas zonas, se puede presentar en promedio un déficit anual de 1152.2 y 904.5 mm respectivamente. La zona más crítica que se localizan en los municipios de Salamina, Pivijay y Remolino, ocupa el cuarto lugar en área sembrada en palma de aceite (1778 hectáreas), el cual puede presentarse un déficit anual promedio de 1368 mm, lo que indica que prácticamente se debe regar todo el año, sólo en los meses de septiembre y octubre la precipitación suple los requerimientos del cultivo en edad adulta y se pueden generar excesos.

Por otro lado, las zonas agroclimáticas 10, 9 y 5 presentan los menores déficit con valores anuales medios igual a 810, 643 y 624 mm respectivamente. No obstante, es un déficit hídrico considerable y debe regarse el cultivo en los meses de época seca. Estas zonas se localizan al sur del departamento y tienen una representación baja del cultivo baja.

Tabla 2. Principales características de las zonas agroclimáticas para manejo del agua en el cultivo de la palma de aceite en el Magdalena.

Zona agroclimática	Área (ha)	Área en palma de aceite (ha)	Área en palma de aceite (%)	T med (°C)	Radiación solar (w/m ²)	P med (mm)	ETo (mm)	ETc (mm)	LAA (mm)	Déficit hídrico (mm/año)	Principales municipios
11	102539	26079	25.4	25.2	347.4	1517.4	2430.1	2187.1	86.4	-904.5	Zona Bananera, Aracataca Fundación
7	333519	21038	6.3	26.5	376.0	1258.1	2617.1	2355.4	95.8	-1153.2	El Retén, Pivijay, Pueblo viejo
12	340727	5326	1.6	26.8	350.3	1416.9	2524.5	2272.1	64.3	-976.8	Ariguaní, Algarrobo, Pivijay
6	108966	1778	1.6	27.3	363.2	1210.2	2852.6	2567.3	68.5	-1368.0	Salamina, Remolino, Pivijay
10	377766	2483	0.66	26.9	345.3	1442.7	2366.1	2129.5	63.6	-810.1	Chivolo, Zapayán, Ariguaní (20%)
9	358992	449	0.13	27.4	344.9	1398.7	2165.5	1949.0	66.2	-642.8	Santa Bárbara, El Plato, Tenérfie
5	84099	409	0.49	27.4	352.6	1949.5	2084.4	1875.9	64.8	-623.9	El Banco, Salamina
8	105578	0	0	27.5	350.6	1679	2209.4	1988.5	54.7	-620	Guamal, San Zenón, San Sebastián

Teniendo en cuenta sólo las áreas actualmente sembradas con palma de aceite en el departamento del Magdalena, se identificaron 7 zonas con parámetros agroclimáticos contrastantes que influyen en la demanda hídrica del cultivo. A continuación, se presenta una descripción de cada una de estas zonas.

Zona agroclimática 5:

La Zona 5 abarca principalmente los municipios de El Banco y Salamina, al sur del departamento. Es la zona con menor superficie cultivada en este departamento (409 has). Se caracteriza por presentar un déficit hídrico en los meses de época seca (diciembre -abril) y julio. Sólo mayo, septiembre y octubre puede ser suplidos los requerimientos del cultivo por la oferta de la precipitación y la capacidad de retención de humedad de los suelos de esa área, sin embargo, no se generan excesos de humedad. Los meses de enero, febrero y marzo registran el mayor déficit mensual acumulado, con un promedio de -149 mm/mes (Tabla 3 y 4).

Tabla 3. Características de la zona agroclimática 5

Zona agroclimática 5	
Kc cultivo de palma adulto	0.9
Profundidad efectiva (cm)	60
LAA_60 cm (mm)	64.81
LARA (mm)	32.4
Altitud (msnm)	26.83

Tabla 4. Balance hídrico de la zona agroclimática 5, para un año normal.

Parámetros	ene	feb	mar	abr	mayo	jun	jul	ago.	sep.	oct	nov	dic
Pe (mm)	12.4	23.9	63.7	120.1	146.0	124.0	118.4	143.8	151.1	155.9	143.6	75.2
ETo (mm)	207.8	194.7	205.2	176.0	157.3	160.1	181.5	172.3	150.0	144.0	146.6	188.9
ETc (mm)	187.0	175.2	184.7	158.4	141.6	144.1	163.3	155.0	135.0	129.6	132.0	170.0
Reserva	0.0	-151.3	-121	-38.4	4.4	-20.2	-44.9	-11.2	16.1	32.4	32.4	-62.4
Di (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Exceso (mm)	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Déficit (mm)	-175	-151	-121	-38	0	-20	-45	-11	0	0	0	-62

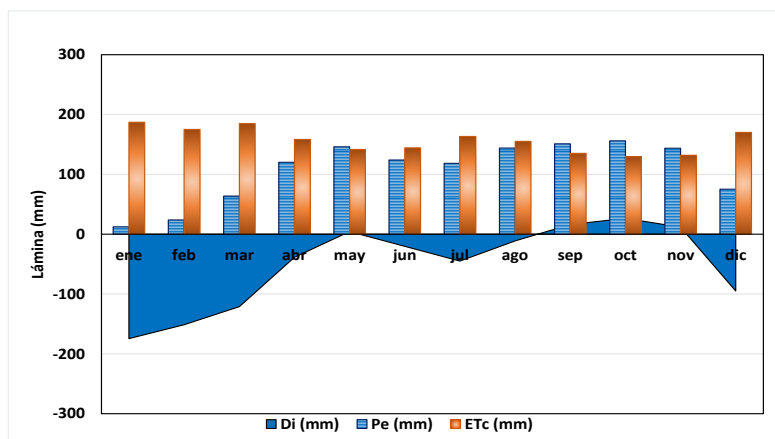


Figura 29. Balance hídrico de la zona agroclimática 5.

Zona agroclimática 6:

La Zona 6 abarca principalmente los municipios de Salamina, Remolino y parte de Pivijay. Ocupa el cuarto lugar en superficie cultivada en el departamento (1778 has). Es la zona con los valores más altos de déficit hídrico y se caracteriza por presentar déficits en casi todos los meses, con excepción de septiembre y octubre que pueden ser suplidos los requerimientos del cultivo por la oferta de la precipitación y la capacidad de retención de humedad de los suelos de esa área. Los meses de enero, febrero y marzo registran el mayor déficit mensual acumulado, con un promedio de -246 mm/mes (Tabla 5 y 6).

Tabla 5. Características de la zona agroclimática 6

Zona agroclimática 6	
Kc cultivo de palma adulto	0.9
Profundidad efectiva (cm)	60
LAA_60 cm (mm)	68.50
LARA (mm)	34.2
Altitud (msnm)	10.62

Tabla 6. Balance hídrico de la zona agroclimática 6, para un año normal.

Parámetros	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Pe (mm)	22.7	6.1	27.0	86.1	148.3	132.7	113.9	163.2	172.3	192.5	125.8	34.6
ETo (mm)	295.9	286.9	297.5	249.3	215.4	232.6	264.5	222.1	171.6	167.0	189.1	260.5
ETc (mm)	266.3	258.2	267.8	224.3	193.9	209.4	238.1	199.9	154.5	150.3	170.2	234.5
Reserva	0.0	-252.2	-240.8	-138.2	-45.6	-76.6	-124.2	-36.7	17.8	34.2	-10.2	-200
Di (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	34.2	0.0	0.0
Exceso (mm)	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	0.0	0.0
Déficit (mm)	-244	-252	-241	-138	-46	-77	-124	-37	0	0	-10	-200

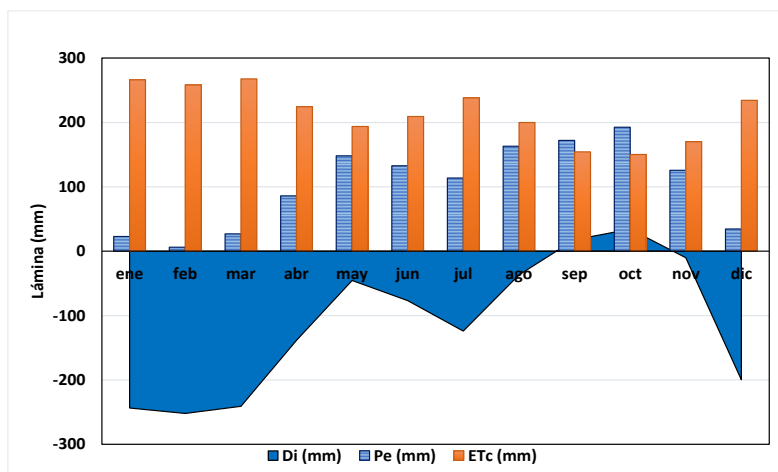


Figura 30. Balance hídrico de la zona agroclimática 6.

Zona agroclimática 7:

La Zona 7 abarca principalmente los municipios de El Retén, Pueblo viejo y parte de Pivijay, representando el segundo lugar en superficie cultivada con palma de aceite en este departamento (21028 has). Se caracteriza por presentar un déficit hídrico en casi todos los meses del año, con excepción de los meses de septiembre, octubre y noviembre. Los meses de enero, febrero y marzo registran el mayor déficit mensual acumulado, con un promedio de -227 mm/mes (Tabla 7 y 8).

Tabla 7. Características de la zona agroclimática 7

Zona agroclimática 7	
Kc cultivo de palma adulto	0.9
Profundidad efectiva (cm)	60
LAA_60 cm (mm)	95.79
LARA (mm)	47.9
Altitud (msnm)	12.75

Tabla 8. Balance hídrico de la zona agroclimática 7, para un año normal.

Parámetros	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Pe (mm)	21.6	6.8	23.7	76.5	155.1	140.2	113.2	158.2	186.5	220.2	136.0	34.2
ETo (mm)	274.9	265.4	275.7	229.5	196.1	203.6	231.7	201.1	161.1	159.8	177.8	240.5
ETc (mm)	247.4	238.8	248.2	206.6	176.5	183.2	208.5	181.0	145.0	143.8	160.0	216.5
Reserva	0.0	-232	-224	-130.0	-21.4	-43.0	-95.3	-22.8	41.6	47.9	23.9	-158.4
Di (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	47.9	0.0	0.0
Exceso (mm)	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28.4	0.0	0.0
Déficit (mm)	-226	-232	-224	-130	-21	-43	-95	-23	0	0	0	-158

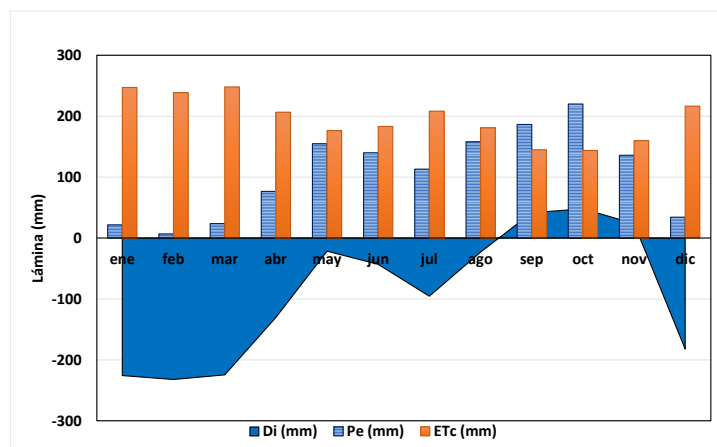


Figura 31. Balance hídrico de la zona agroclimática 7.

Zona agroclimática 9:

En la Zona 9 se incluyen principalmente los municipios de Santa Barbara, El Plato y Tenerife, y ocupa el sexto lugar en superficie cultivada con palma de aceite en este departamento (444 has). Se caracteriza por presentar un déficit hídrico en los meses de época seca, incluyendo el mes de julio. Los meses de enero, febrero y marzo registran el mayor déficit mensual acumulado, con un promedio de -152 mm/mes. Por el contrario, en los meses de septiembre y octubre se alcanzan a generar excesos de humedad con valores promedio de 5 y 56 mm/mes respectivamente (Tabla 9 y 10).

Tabla 9. Características de la zona agroclimática 9

Zona agroclimática 9	
Kc cultivo de palma adulto	0.9
Profundidad efectiva (cm)	60
LAA_60 cm (mm)	66.18
LARA (mm)	33.1
Altitud (msnm)	58.94

Tabla 10. Balance hídrico de la zona agroclimática 9, para un año normal.

Parámetros	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Pe (mm)	23.2	25.5	67.5	122.6	169.8	141.9	134.4	168.9	171.2	187.7	135.9	52.6
ETo (mm)	218.4	204.8	213.9	183.4	164.2	167.8	192.7	174.9	147.6	146.0	154.3	197.5
ETc (mm)	196.5	184.4	192.5	165.1	147.7	151.0	173.5	157.4	132.8	131.4	138.9	177.7
Reserva	0.0	-159	-125	-42.4	22.0	-9.1	-39.0	11.5	33.1	33.1	30.0	-95.1
Di (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33.1	33.1	0.0	0.0
Exceso (mm)	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.3	56.3	0.0	0.0
Déficit (mm)	-173	-159	-125	-42	0	-9	-39	0	0	0	0	-95

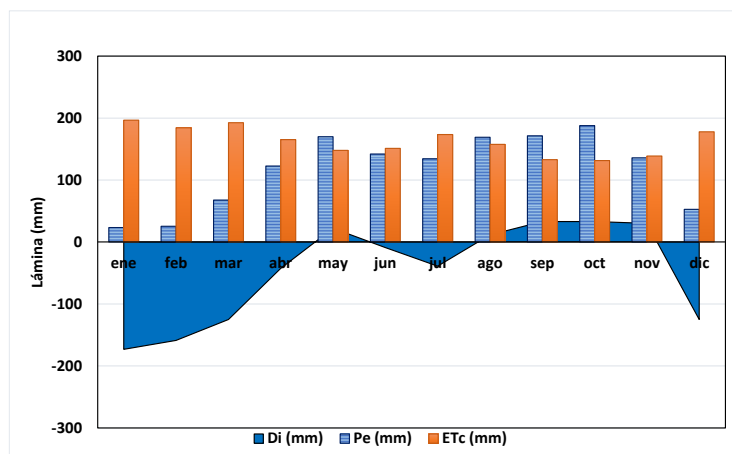


Figura 32. Balance hídrico de la zona agroclimática 9.

Zona agroclimática 10:

En la Zona 10 se incluyen principalmente los municipios de Chivolo, Zapayán y parte de Ariguaní y ocupa el quinto lugar en superficie cultivada con palma de aceite en este departamento (2483 has). Se caracteriza por presentar un déficit hídrico en los meses de época seca, incluyendo el mes de julio. Los meses de enero, febrero y marzo registran el mayor déficit mensual acumulado, con un promedio de -187 mm/mes. Se generan excesos de humedad en los meses de septiembre, octubre y noviembre con un valor medio de 33.9 mm/mes (Tabla 11 y 12).

Tabla 11. Características de la zona agroclimática 10

Zona agroclimática 10	
Kc cultivo de palma adulto	0.9
Profundidad efectiva (cm)	60
LAA_60 cm (mm)	63.60
LARA (mm)	31.8
Altitud (msnm)	60.00

Tabla 12. Balance hídrico de la zona agroclimática 10, para un año normal.

Parámetros	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Pe (mm)	19.9	23.2	64.4	123.8	170.4	141.3	132.9	170.6	185.5	210.2	150.2	50.7
ETo (mm)	254.7	241.8	246.6	201.1	171.6	179.2	207.7	182.9	147.3	147.9	163.0	222.4
ETc (mm)	229.2	217.6	221.9	181.0	154.4	161.2	186.9	164.6	132.6	133.1	146.7	200.1
Reserva	0.0	-194	-157	-57.2	16.0	-4.0	-54.0	6.0	31.8	31.8	31.8	-117.7
Di (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	31.8	31.8	31.8	0.0
Exceso (mm)	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21.1	77.1	3.5	0.0
Déficit (mm)	-209	-194	-158	-57	0	-4	-54	0	0	0	0	-118

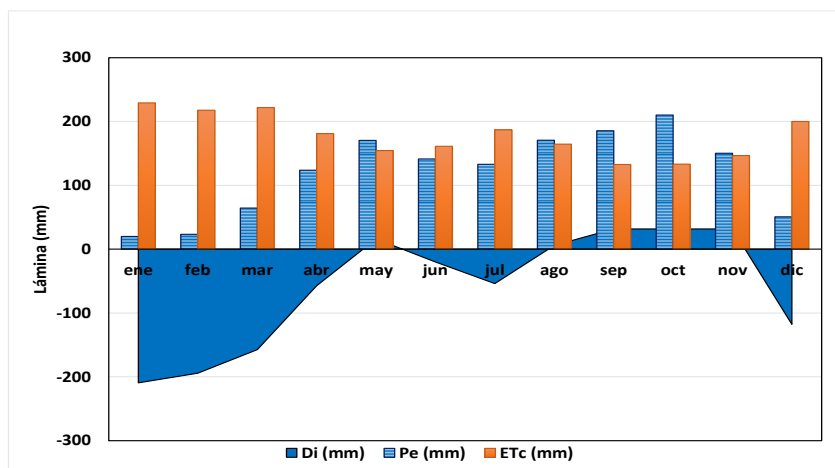


Figura 33. Balance hídrico de la zona agroclimática 10.

Zona agroclimática 11:

La Zona 11 abarca los municipios de Zona Bananera, Aracataca y Fundación. Ocupa el primer lugar en superficie cultivada en este departamento (26079 has). Se caracteriza por presentar un déficit hídrico en los meses de época seca, lográndose cubrir los requerimientos del cultivo en 6 meses del año (mayo, junio y desde agosto a septiembre). Los meses de enero, febrero y marzo registran el mayor déficit mensual acumulado, con un promedio de -216 mm/mes (Tabla 13 y 14).

Tabla 13. Características de la zona agroclimática 11

Zona agroclimática 11	
Kc cultivo de palma adulto	0.9
Profundidad efectiva (cm)	60
LAA_60 cm (mm)	86.37
LARA (mm)	43.2
Altitud (msnm)	70.00

Tabla 14. Balance hídrico zona de la agroclimática 11, para un año normal.

Parámetros	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Pe (mm)	16.4	9.8	31.8	95.4	190.6	164.8	136.8	185.9	219.5	261.0	164.9	46.1
ETo (mm)	263.9	255.8	266.2	216.7	179.6	175.7	199.0	179.5	149.9	152.7	165.9	225.2
ETc (mm)	237.5	230.3	239.6	195.0	161.7	158.1	179.1	161.6	134.9	137.4	149.3	202.7
Reserva	0.0	-220	-208	-99.6	28.9	6.7	-42.2	24.3	43.2	43.2	43.2	-113
Di (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	43.2	43.2	43.2	0.0
Exceso (mm)	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	41.4	123.6	15.5	0.0
Déficit (mm)	-221	-220	-208	-100	0	0	-42	0	0	0	0	-113

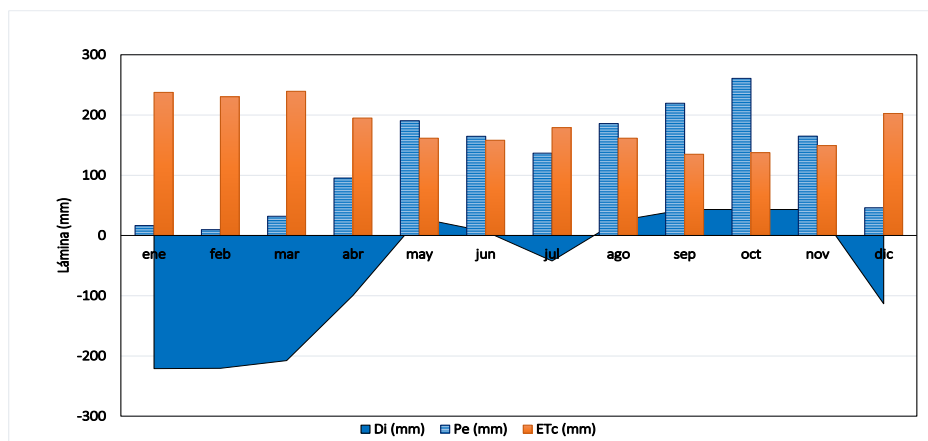


Figura 34. Balance hídrico de la zona agroclimática 11.

Zona agroclimática 12:

En la Zona 12 se incluyen principalmente los municipios de Ariguaní, Algarrobo y parte de Pivijay. Ocupa el tercer lugar en superficie cultivada con palma de aceite en este departamento (5326 has). Se presentan déficits hídricos en los meses de época seca, incluyendo los meses de junio, julio y agosto, logrando cubrir sus requerimientos en los meses de mayo, septiembre y octubre, generándose excesos con valores promedios de 0, 13 y 70 mm/mes respectivamente. Los meses de enero, febrero y marzo se registran el mayor déficit mensual acumulado, con un promedio de -205 mm/mes (Tabla 15 y 16).

Tabla 15. Características de la zona agroclimática 12

Zona agroclimática 12	
Kc cultivo de palma adulto	0.9
Profundidad efectiva (cm)	60
LAA_60 cm (mm)	64.30
LARA (mm)	32.2
Altitud (msnm)	84.87

Tabla 16. Balance hídrico de la zona agroclimática 12, para un año normal.

Parámetros	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Pe (mm)	16.7	21.8	66.1	125.8	167.3	131.9	124.4	165.6	182.6	207.7	153.2	44.4
ETo (mm)	273.3	261.3	266.6	216.0	182.4	191.8	221.7	193.0	152.7	152.7	170.8	235.8
ETc (mm)	246.0	235.2	240.0	194.4	164.2	172.6	199.5	173.7	137.4	137.4	153.7	212.2
Reserva	0.0	-213	-174	-68.5	3.2	-37.6	-75.2	-8.1	32.2	32.2	31.6	-136.2
Di (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32.2	32.2	0.0	0.0
Exceso (mm)	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.1	70.3	0.0	0.0
Déficit (mm)	-229	-213	-174	-69	0	-41	-75	-8	0	0	0	-168

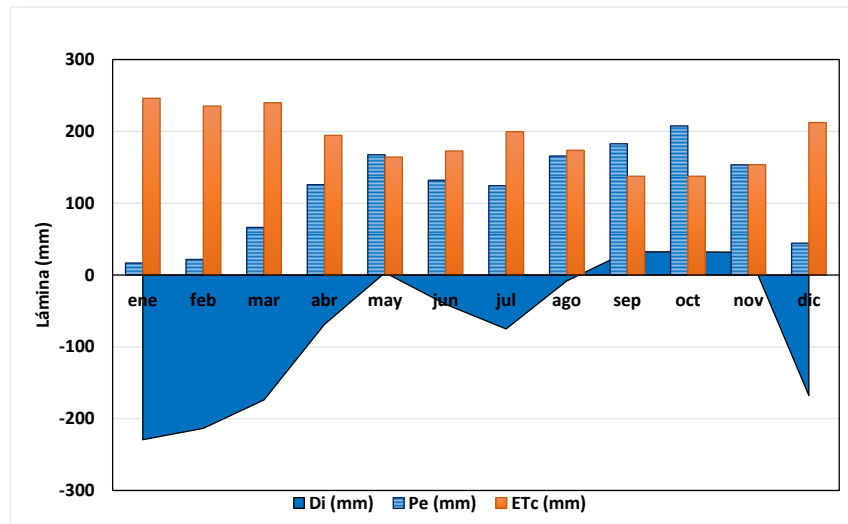


Figura 35. Balance hídrico de la zona agroclimática 12.

Teniendo en cuenta lo anterior, es fundamental establecer unas recomendaciones de manejo del agua en el cultivo en cada zona agroclimática para que este sea eficiente y sostenible bajo estas condiciones y escenarios futuros.

Entre estas recomendaciones, la fundamental es el uso de sistemas de riegos eficientes como el de aspersión o goteo de alto caudal, que permitan cubrir las necesidades de agua del cultivo bajo esta escasez de agua, principalmente en las zonas agroclimáticas 6, 7 y 11, las cuales están generando una presión importante a la cuenca de la Ciénaga grande de Santa Marta. Así mismo, es importante que estas tecnologías vayan acompañadas por prácticas de conservación de humedad, como son el mantener el suelo cubierto con coberturas vegetales nativas o leguminosas para reducir la escorrentía y las pérdidas de agua por evaporación. También se ha evaluado las bondades del uso de mulching en la conservación de humedad, este puede ser de tusas provenientes del proceso de las plantas extractoras, o el uso de las mismas hojas que se cortan en cada cosecha de racimos o en los ciclos de poda. Por otro lado, también se recomienda los estudios técnicos de los acuíferos de estas zonas, para evaluar la posibilidad del uso de estas aguas como fuente alternativa para el riego de los cultivos. Así mismo, en aquellas áreas que se generan excesos de humedad considerables en los meses de lluvia sería estratégico la construcción de reservorios, que contribuya con el abastecimiento de agua en los meses secos.

En todas las subzonas identificadas es esencial que las plantaciones lleven el balance hídrico, para que les permitirá controlar cada una de las entradas y salidas de agua del cultivo y puedan hacer un uso más eficiente y eficaz del riego. Así mismo, a nivel mundial se ha visto la importancia del uso de sensores de humedad del suelo, ya que son herramientas de medición directa de esta humedad que permite ajustar los tiempos y frecuencias de riegos para evitar que los cultivo sufran de déficit o exceso de humedad.

En contraste, tenemos la zona 5, localizada al sur del departamento, el cual al analizar sus condiciones climáticas y de suelos puede requerir de un manejo adecuado del drenaje del suelo. Por ello, se recomienda el establecimiento de pozos de observación, para evaluar la afectación de los niveles freáticos y así mismo, hacer estudios de necesidades de drenaje superficial. El balance hídrico es una herramienta clave para que determinen los excesos de humedad que se les presentan cada año y de esta manera puedan diseñar de manera adecuada sus drenajes. Esta zona, también tiene un periodo seco y, por lo tanto, para evitar que el cultivo sufra de déficit de humedad se establezcan sistemas de riego y prácticas de conservación de humedad como las que se mencionó anteriormente.

4. DISCUSIÓN

En este estudio se logró determinar el comportamiento de los diferentes parámetros climáticos en el departamento del Magdalena, los cuales al compararse con los mapas desarrollados por el IDEAM (2022), muestran un comportamiento similar, sin embargo, en este trabajo se obtuvo un mayor nivel de detalle, pues se utilizaron escalas que permiten una visualización más precisa de la región. Así mismo, se pudo corroborar, las tendencias de las variables como temperatura y radiación solar, las cuales en los 30 años evaluados demuestran un crecimiento positivo que concuerda con lo reportando por esta misma institución.

El análisis de la precipitación y evapotranspiración de referencia en el departamento, muestran una clara diferencia en sus valores medios, pues mientras que para la precipitación es de 1456 mm/año, la ETo media es de 2349 mm/año, indicando que para la zona hay un balance hídrico negativo importante, que se

concentra principalmente en los meses secos (diciembre – abril) y en algunos casos hasta en los meses de junio-julio. Esto quiere decir, que para la zona se tiene entre 5 y 6 meses de época seca, en donde las lluvias no pueden suplir las demandas hídricas de los cultivos y es por ello, que debe efectuarse riego. Esta condición empeora, cuando se presentan los años secos, pues en este estudio arroja, que la precipitación disminuye drásticamente (valor medio de 926 mm/año), y la evapotranspiración aumenta con un valor medio de 2521 mm/año. Evidenciando así, un balance hídrico negativo significativo, aumentando las demandas de agua en estos periodos de baja oferta, lo que supone claramente un riesgo para la sostenibilidad no sólo de la palma de aceite, sino de todos los cultivos que se establezcan en esta región. Con esto podemos corroborar, lo reportado por algunos estudios como Kaune et al., 2020, WWF & CORPAMAG., 2020, ENA, 2022, entre otros, que concuerdan sobre la vulnerabilidad de esta región por existir una mayor demanda de agua que oferta en gran parte de año y que esto supone un riesgo de abastecimiento para todos los sectores y los ecosistemas.

Por otro lado, en los meses más lluviosos (mayo-junio y septiembre-noviembre), las precipitaciones logran ser suficientes para suplir las demandas de agua en la región y se observa que pueden generarse excesos, principalmente en los meses de mayo, septiembre y octubre. Por lo tanto, para los cultivos es necesario, también implementar sistemas de drenajes, superficiales principalmente. Avendaño (2018), propone, aprovechar estas épocas para la cosecha de agua y para ello, dentro de las principales cuencas hidrográficas del departamento seleccionó puntos estratégicos para la construcción de embalses de regulación, para ser almacenados durante esta época y ser aprovechados en los meses secos. En total estudiaron 7 alternativas localizados en la Sierra Nevada de Santa Marta, entre los municipios de Ciénaga y la parte alta de Aracataca y Fundación. Para las condiciones críticas de la región, esta puede ser una de las estrategias claves de gestión de agua y que deber ser dirigida desde los entes administrativos regionales y nacionales.

En esta investigación también se incluyó el estudio de los suelos de la región, ya que esto es fundamental para lograr un mejor entendimiento del manejo adecuado del agua para el cultivo y, por lo tanto, deben ser incluidos en una zonificación agroclimática. De acuerdo con Waller & Yitayew (2016), el conocimiento del suelo

es el primer paso para una gestión de riego y drenaje exitosos. De acuerdo con este análisis tomado como fuente del IGAC (2009), se pueden clasificar en suelos de montaña, de lomerío, piedemonte y planicie. Los suelos de montaña son de formación geológica variada, por la variedad de climas que presenta esta área, en total encontraron 29 asociaciones. Son suelos con riesgo de erosión, por las grandes pendientes, así mismo presentan afloramientos rocosos. Estos son adecuados para usos de protección y forestales. En los lomeríos (9 asociaciones), predominan suelos de texturas arcillosas, son moderadamente profundos, bien drenados y fertilidad alta. Por su parte, en las planicies (20 unidades cartográficas), los suelos se componen como material parental sedimentos aluviales medios, que los caracteriza por el predominio de texturas moderadamente finas a gruesas, son profundos, bien drenados. Ya que por lo general poseen características intermedias entre arcillosos y arenosos tienen una capacidad de retención de humedad moderada y en algunos sectores se encuentran suelos con fragmentos rocosos que reducen esta capacidad de almacenamiento y disponibilidad de agua para los cultivos.

Incluir todos estos parámetros (clima, suelo, topografía) permite lograr una zonificación más acertada que se alinee a las necesidades de la región y de esta manera se identifiquen las estrategias de manejo sostenible de estos recursos. Con esto concuerdan los estudios realizados por Gomez, L., et al. 1991, Terán, C., et al. 1998 y Carbonell, J., et al. 2001, quienes realizaron una zonificación agroclimática para las zonas cafeteras, La Mojana y Valle del Cauca respectivamente. Gomez y su equipo construyeron los ecotopos cafeteros, en donde lo fundamental fue el entendimiento de la relación suelo-clima y como este impacta en los rendimientos y calidad de las diferentes variedades de café. Por su parte, Carbonell y su equipo definieron una zonificación agroecológica para la caña de azúcar, en la cual involucra, clima, y condición y aptitud de suelos, esto principalmente relacionados problemas de drenaje que puedan impactar el adecuado desarrollo de la caña. Por Otro lado, en La Mojana, la zonificación fue efectuada teniendo en cuenta los excesos derivados de la precipitación y de esta manera poder identificar las áreas con mayor riesgo a inundaciones.

Como estos estudios y muchos otros ejemplos, se entiende la importancia de

estudiar y entender nuestro medio, y que desde una zonificación se logre identificar zonas con características contrastantes para realizar el manejo del agua. En este caso, para el cultivo de la palma de aceite se identificaron 7 zonas agroclimáticas que tienen unos déficits hídricos importantes y que es importante hacer un uso eficiente del agua, ya que es la principal limitante para el adecuado sostenimiento del cultivo. Como principal estrategia es el uso de sistemas de riegos eficientes, la cual debe acompañarse de una adecuada operación y del uso de tecnologías de conservación de humedad del suelo, como mantener el suelo siempre cubierto con coberturas vegetales nativas o leguminosas, el uso de residuos del mismo cultivo como las hojas producto de la cosecha y podas, el raquis o compost, entre otros. Finalmente, este trabajo es un primer paso de una zonificación agroecológica para el cultivo de la palma de aceite y que es un insumo para que los palmicultores conozcan las características en donde está sus plantaciones y puedan tener mejores herramientas para el manejo del agua en el sector en el departamento.

5. CONCLUSIONES

- Se generó un código de manejo y análisis de datos climáticos en el lenguaje de programación Python, en este caso, para los de datos obtenidos de la red de estaciones meteorológicas del IDEAM y de imágenes satelitales del Copernicus ERA5, proporcionando una herramienta para la modelación agroclimática en el departamento y que puede replicarse a otras zonas palmeras.
- Se encontró una estrecha relación entre las variables climáticas temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento en el comportamiento de la evapotranspiración de referencia en el departamento, puesto que en aquellas áreas donde los valores de estos son altos, los valores de ETo se incrementan
- Los balances hídricos en el departamento indican la necesidad de riegos suplementarios para el adecuado desarrollo del cultivo de la palma de aceite. Sólo los meses de septiembre y octubre cubren las necesidades del cultivo por oferta de la precipitación y condición de los suelos, los cuales mayoritariamente tienen de moderada a baja retención de humedad del suelo.
- Teniendo en cuenta, los balances hídricos climáticos, capacidad de almacenamiento de agua de los suelos, requerimientos hídricos del cultivo y altimetría, se identificaron 12 zonas con características bien diferenciadas en el departamento del Magdalena, de las cuales en 7 se encuentra establecido el cultivo de palma de aceite y representan las áreas con déficit hídricos importantes.
- Todas las zonas agroclimáticas en donde se encuentra establecido el cultivo de palma de aceite presentan déficits hídricos considerables, sin embargo, dentro de estas se destacan las zonas 6 y 7, que tiene déficits hídricos aproximados de 1368 y 1153 mm/año respectivamente. Pueden considerarse las más restrictivas para el buen desarrollo del cultivo, ya que se registran las menores precipitaciones, la demanda hídrica del cultivo es más alta y por lo general los suelos presentan una baja capacidad de retención de humedad.

- Dentro de las principales estrategias de manejo del agua para el cultivo de la palma de aceite bajo condiciones del departamento están el uso de riegos eficientes, tecnologías de conservación de humedad, como coberturas vegetales y mulching. Así mismo es fundamental el cálculo de balance hídrico diario para una mejor programación de los riegos.

6. BIBLIOGRAFÍA

Avendaño A. (2018). *Producto 1: Caracterización hídrica de la Zona de la región centro y norte del departamento del Magdalena*- Consultoría para realizar el diagnóstico para el aprovechamiento hídrico sostenible y el abastecimiento de agua potable. Findeter.

Carbonell, J., Amaya, A., Ortiz, B., Torres, J., Quintero, R., Isaacs, C.H. (2001). Zonificación agroecológica para el cultivo de caña de azúcar en el Valle del río Cauca. Tercera aproximación. Cali, Centro de Investigación de la Caña de Azúcar. Colombia.

FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. : Food & Agriculture Org

FEDEPALMA. (2021). *Anuario Estadístico 2021*. Bogotá. Colombia: FEDEPALMA.

FEDEPALMA. (2022). SISPA. *Sistema de información estadística del sector palmero colombiano*: <http://sispa.fedepalma.org/sispaweb/default.aspx>.

Geoportal IDEAM. (2022). *geoportal IDEAM*. [geoportal IDEAM: http://www.ideam.gov.co/geoportal](http://www.ideam.gov.co/geoportal).

Gobernación del Magdalena. (2022). *El Magdalena: Geografía y Regiones*. <https://www.gobernaciondelmagdalena.gov.co/geografia-y-regiones/>

Gómez Blanco, J. A., & Cadena, M. C. (2018). *Validación de las fórmulas de Evapotranspiración de Referencia (ET_o) para Colombia*. Bogotá D.C. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM .

Hernández Vargas , L. A. (2015). *Selección de la Metodología para Determinar Atípicos en las Bases de Cálculo de un Índice de Costos*. Bogotá. Colombia: Fundación Universitaria los Livertadores Especialización en Estadística Aplicada .

IDEAM. (2022). *Estudio Nacional del agua 2018*. Bogotá, Colombia: IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales).

IDEAM-UNAL. (2018). *La Variabilidad Climática y el Cambio Climático en Colombia*. Bogotá. Colombia.

IGAC. (2009). *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras: departamento del Magdalena, escala 1:100.000*. IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Grupo interno de trabajo de levantamientos agrológicos.

J. Bazin, A. van der Heijden, B. de la Loma Gonzalez, M. Waterloo, S. van Meijeren (2022). *Evaluación del estado actual de las cuencas del Río Frío y Sevilla*. Embajada de los países Bajos.

Kaune, A., Hunink, J., Goretti, M., Pérez, C., Arias N., Lugtemburg C., Demmink, L. (2020). *Baseline assessment for efficient irrigation of oil palm in the Sevilla basin, Colombia*. Embajada de los países Bajos-CENIPALMA.

Matovelle, C., Andreo, B., & Mudarra, M. (2021). *Análisis de la influencia de la altitud en los eventos de máxima precipitación en una cuenca del Pacífico: tendencias y variabilidad*. *Información tecnológica*, 32(6), 3-12.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2016). *Plan Integral de Gestión de Cambio Climático Territorial del Magdalena 2040*.

OMM. (2018). *Guía de prácticas climatológicas*. Genève. Suiza: Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Pereira, L., Valero, J., & Picornell, R. (2010). *El Riego Y Sus Tecnologías*. Universidad de Castilla-La Mancha. España.

Pineda Ríos, W., & Sánchez Quiroga, L. (2020). *Estimación e imputación de datos faltantes mediante métodos de interpolación espacial para precipitación mensual acumulada en el departamento de Antioquia durante el periodo 2014-2018*. Facultad de Estadística, Universidad Santo Tomás.

Terán, C., Jiménez, C., González, C., & Villaneda, E. (1998). *Metodología para la zonificación agroclimática de la región de La Mojana mediante el sistema de información geográfica*. *Revista Corpoica*, 2(2), 19-26.

UNESCO. (1971). *Scientific framework of world water balance*. UNESCO. Technical papers in hydrology, No 7. París. 27p.

UPRA. (2017). *Metdología para la zonificación de los requerimientos hídricos de cultivos como insumo para para la zonificación de aptitud de uso de la tierra*. Bogotá D.C. Colombia: Unidad de Planeacion Rural Agropecuaria.

Waller, P., & Yitayew, M. (2016). *Irrigation and drainage engineering*. In Springer International Publishing, Switzerland. <https://doi.org/10.1259/0007-1285-67-803-1052>

Watson, D.F., and Philip, G.M. (1985). A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation. *Geo-Processing*, 2, 315-327.

Weibull, W. (1951). *A Statistical Distribution Function of Wide Applicability*. *Journal of Applied Mechanics*, 18, 293-297.

World Meteorological Organization (2017). *WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals*.

WWF Colombia & Corpamag. (2020). *Estimación del Caudal Ambiental Cuencas de los Ríos Frío y Sevilla (Reporte Técnico)*. WWF Colombia & Corporación Autónoma Regional del Magdalena - Corpamag, Colombia.

7. ANEXOS

ANEXO 1

Déficit hídrico para palma de aceite joven (kc:0.7) en cada zona agroclimática

Subzona agroclimática	Área (ha)	Área en palma de aceite (ha)	Área en palma de aceite (%)	P med (mm)	ETo (mm)	ETc (mm)	LAA (mm)	Déficit hídrico (mm/año)	Principales municipios
11	102539	26079	25.4	1517.4	2430.1	1701.1	86.4	-619.1	Zona Bananera, Aracataca Fundación
7	333519	21038	6.3	1258.1	2617.1	1832.0	95.8	-740.7	El Retén, Pivijay, Pueblo viejo
12	340727	5326	1.6	1416.9	2524.5	1767.2	64.3	-600.9	Ariguani, Algarrobo, Pivijay
6	108966	1778	1.6	1210.2	2852.6	1996.8	68.5	-900.5	Salamina, Remolino, Pivijay
10	377766	2483	0.66	1442.7	2366.1	1656.2	63.6	-515.3	Chivolo, Zapayán, Ariguani (20%)
9	358992	449	0.13	1398.7	2165.5	1515.9	66.2	-388.6	Santa Bárbara, El Plato, Tenerife
5	84099	409	0.49	1949.5	2084.4	1459.1	64.8	-361.7	El Banco, Salamina

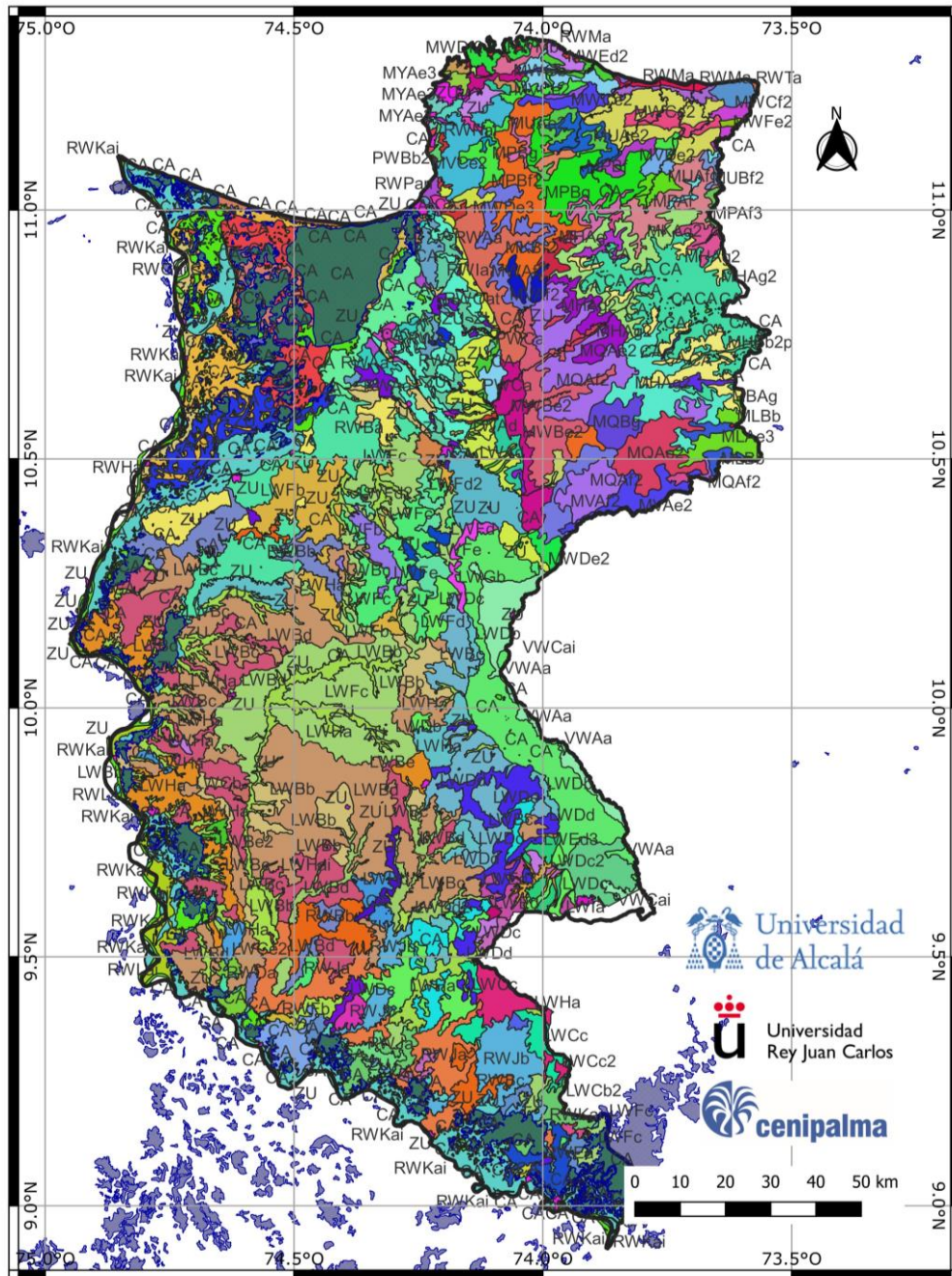
ANEXO 2

Estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis climático en el Magdalena

CODIGO	Nombre	CATEGORIA	altitud	latitud	longitud
29060290	SAN JUAN	Pluviómetrica	25	10.7666667	-74.166667
29060220	POLY LA	Pluviómetrica	24	10.8166667	-74.183333
29060330	PLAYA LA	Pluviómetrica	20	10.7619722	-74.120472
29065030	PRADO SEVILLA	Climática Ordinaria	18	10.7641667	-74.154722
15015110	ALTO DE MIRA	Climática Ordinaria	180	11.0915	-73.932389
29060230	SARA LA	Pluviómetrica	25	10.8362222	-74.161028
29060550	RUBY EL	Pluviómetrica	20	10.8451389	-74.188222
15015020	LA YE	Climática Ordinaria	20	10.9924167	-74.211139
15030020	PALOMINO	Pluviómetrica	30	11.2441667	-73.573889
29060190	FLORIDA LA	Pluviómetrica	26	10.6106389	-74.255389
29065100	PATIVILCA	Climática Ordinaria	55	10.5833333	-74.216667
29065110	ESMERALDA LA	Agrometeorológica	30	10.6398333	-74.2625
29060240	UNION LA	Pluviómetrica	20	10.7065556	-74.223556
29065130	LA GRAN VIA - AUT	Agrometeorológica	30	10.85	-74.133333
25025360	AEROPUERTO LAS FLORES - AUT	Climática Principal	34	9.04633333	-73.970833
25025002	LOS ALAMOS - AUT	Climática Principal	25	9.30405556	-74.273639
15015120	UNIVERSIDAD TECNOLOGICA - AUT	Climática Principal	7	11.2230556	-74.185917
29065120	BATALLON NO. 6 - AUT	Climática Principal	1280	10.4653611	-73.927778
29065000	MEDIA LUNA - AUT	Climática Principal	20	10.5100278	-74.506667
29060340	PALMOR EL	Pluviómetrica	1200	10.7734444	-74.025639
29060070	SAN PABLO	Pluviómetrica	800	10.8081944	-74.026806
25021200	NEGRITOS LOS	Pluviómetrica	26	9.02666667	-74.079444
29060280	SAN ISIDRO	Pluviómetrica	25	10.9008333	-74.220611
29060160	ENANO EL	Pluviómetrica	25	10.9021944	-74.189472
29060310	SEVILLANO	Pluviómetrica	5	10.9330556	-74.252444
29060210	PALMA LA	Pluviómetrica	23	10.9668333	-74.204694
29060120	TASAJERA	Pluviómetrica	2	10.9762222	-74.36175
25021380	SAN ROQUE ALERTAS	Pluviómetrica	24	9.07	-74.15
29060080	COCOS LOS	Pluviómetrica	4	11.0059722	-74.683639
15010310	FILO CARTAGENA	Pluviómetrica	750	11.1002778	-73.843222
15015060	SAN LORENZO - AUT	Climática Principal	2200	11.1110833	-74.054694
25021040	MENCHIQUEJO [25021040]	Pluviómetrica	25	9.18805556	-74.044222
25020900	SAN SEBASTIAN [25020900]	Pluviómetrica	65	9.23388889	-74.355833
25021030	SAN ZENON [25021030]	Pluviómetrica	25	9.2475	-74.501944
15010010	MINCA [15010010]	Pluviómetrica	640	11.1408333	-74.12
15010501	IDEAM SANTA MARTA	Pluviómetrica	20	11.2222222	-74.179917
15010020	BURITACA [15010020]	Pluviómetrica	30	11.2501306	-73.76475
15010300	GUACHACA [15010300]	Pluviográfica	45	11.2563889	-73.836667
25021020	TIERRA GRATA [25021020]	Pluviómetrica	25	9.43666667	-74.739167
25021500	PUEBLITO EL [25021500]	Pluviómetrica	35	9.58116667	-74.35225
25021190	MECHA LA [25021190]	Pluviómetrica	100	9.62294444	-74.595639
25025300	SEIS EL [25025300]	Climática Ordinaria	50	9.68366667	-74.322278
25021620	IRAN [25021620]	Pluviómetrica	80	9.68377778	-74.322167
25021610	AGRADO EL [25021610]	Pluviómetrica	100	9.68566667	-74.504861
28040320	BRILLANTE EL [28040320]	Pluviómetrica	135	9.70275	-73.959139
28040300	VILLA CONCEPCION [28040300]	Pluviómetrica	120	9.70630556	-73.859444
25021630	NUEVA GRANADA [25021630]	Pluviómetrica	110	9.80175	-74.388556
28040360	CABANA LA HACIENDA	Pluviómetrica	100	9.861	-74.076722
25021600	APURE [25021600]	Pluviómetrica	85	9.8725	-74.580389
29050020	SALAMINA [29050020]	Pluviómetrica	15	10.4875278	-74.79
15010040	VISTA NIEVES [15010040]	Pluviómetrica	20	11.0853611	-74.079861
28040100	MONTERRUBIO [28040100]	Pluviómetrica	100	10.2336944	-74.27325
29060040	FUNDACION [29060040]	Pluviómetrica	40	10.5243611	-74.182222
29060200	MARIA LA [29060200]	Pluviómetrica	30	10.5406667	-74.186972
29060150	DESTINO EL [29060150]	Pluviómetrica	20	10.5736667	-74.224111
29065020	PADELMA [29065020]	Climática Ordinaria	20	10.7211111	-74.199722
29060270	PALO ALTO [29060270]	Pluviómetrica	25	10.7225	-74.271917
28040150	BELLAVISTA [28040150]	Pluviómetrica	140	10.3080556	-74.039222
29020020	GARRAPATA [29020020]	Pluviómetrica	60	10.3215556	-74.423972
29050010	TIOGOLLO [29050010]	Pluviómetrica	41	10.3444167	-74.732111
29060540	SAN RAFAEL [29060540]	Pluviómetrica	10	10.5906111	-74.647
29060350	BAYANO [29060350]	Pluviómetrica	30	10.6311667	-74.298583
29060030	BONGO EL [29060030]	Pluviómetrica	20	10.6487778	-74.3755
29060060	CENIZO EL [29060060]	Pluviómetrica	450	10.6516111	-74.073222
29060140	CARMEN EL [29060140]	Pluviómetrica	25	10.6755	-74.206444
29060170	GAVILAN [29060170]	Pluviómetrica	20	10.6804444	-74.330694
28040140	SAN ANGEL [28040140]	Pluviómetrica	140	10.0330556	-74.212611
29060560	DONA MARIA [29060560]	Pluviómetrica	50	10.3844444	-74.177944
29060100	SANTA ROSA DE LIMA	Pluviómetrica	75	10.40275	-74.108
29060250	PROYECTOS LOS [29060250]	Pluviómetrica	20	10.7367222	-74.237083
29060180	ESPERANZA LA [29060180]	Pluviómetrica	25	10.7425278	-74.306278
2906500077	PALMOR - SIERRA NEVADA - AUT	Climática Principal	1050	10.77175	-74.019139
25025090	AEROPUERTO LAS FLORES	Climática Principal	34	9.04633333	-73.970833
1501500054	SAN ISIDRO BONDA - AUT	Climática Principal	581	11.2305222	-74.059786
1509500118	GUACHACA - AUT	Climática Principal	246	11.21015	-73.84445
15015100	PARQUE TAYRONA	Climática Ordinaria	30	11.31	-73.93
1501500196	LA TAGUA	Pluviómetrica	1550	11.0786889	-74.040611
25025000	EL DIFICIL - AUT	Climática Principal	120	9.91197222	-74.085806

ANEXO 3

Estudio de suelos del departamento del Magdalena (IGAC, 2009)



ANEXO 4

Características de los suelos estudiados

Perfil	Longitud	Latitud	Profundidad (cm)	Taxonomía	Textura	Da (g/cm ³)	HA (%)	LAA (mm)
MG-01	-74.121667	9.059444	12	Typic Ustifluvents.	FA	1.7	5.7	6.84
MG-01	-74.121667	9.059444	27	Typic Ustifluvents.	Arcilloso	1.5	11.15	30.11
MG-01	-74.121667	9.059444	21	Typic Ustifluvents.	FAr	1.6	10.8	22.68
MG-02	-74.395556	9.238056	12	Typic Plinthustults.	FAr	1.7	5.7	6.84
MG-02	-74.395556	9.238056	27	Typic Plinthustults.	Arcilloso	1.5	11.5	31.05
MG-02	-74.395556	9.238056	21	Typic Plinthustults.	Arcilloso	1.6	10.8	22.68
MG-03	-74.335556	9.229167	30	Typic Ustifluvents.	FAr	1.5	7.9	23.70
MG-03	-74.335556	9.229167	30	Typic Ustifluvents.	FAr	1.7	4.8	14.40
MG-04	-74.385278	9.241389	32	Typic Plinthustults.	FAr	1.7	3.5	11.20
MG-04	-74.385278	9.241389	28	Typic Plinthustults.	Arcilloso	1.6	12.2	34.16
MG-06	-73.972778	9.127222	25	Chromic Haplusterts	FA	1.5	22.7	56.75
MG-06	-73.972778	9.127222	30	Chromic Haplusterts.	AL	1.4	28.5	85.50
MG-06	-73.972778	9.127222	5	Chromic Haplusterts.	Arcilloso	1.7	21.4	10.70
MG-07	-74.512500	9.238333	16	Chromic Endoaquerts.	Arcilloso	0.99	12.6	20.16
MG-07	-74.512500	9.238333	33	Chromic Endoaquerts.	Arcilloso	1.3	13.2	43.56
MG-07	-74.512500	9.238333	11	Chromic Endoaquerts.	Arcilloso	1.4	11.6	12.76
MG-08	-74.516944	9.054722	25	Chromic Haplusterts.	FA	1.1	11.1	27.75
MG-08	-74.516944	9.054722	29	Chromic Haplusterts.	AL	1.5	14.2	41.18
MG-08	-74.516944	9.054722	6	Chromic Haplusterts.	Arcilloso	1.6	12.1	7.26
MG-09	-74.528889	9.275833	35	Typic Ustifluvents.	FAAr	1.4	6.9	24.15
MG-09	-74.528889	9.275833	25	Typic Ustifluvents.	ArF	1.5	5.7	14.25
MG-11	-74.059722	9.921111	12	Chromic Haplusterts	Arcilloso	1.3	15.1	18.12
MG-11	-74.059722	9.921111	22	Chromic Haplusterts	Arcilloso	1.3	15	33.00
MG-11	-74.059722	9.921111	26	Chromic Haplusterts	Arcilloso	1.5	13.3	34.58
MG-12	-74.076389	9.920278	23	Chromic Haplusterts.	Arcilloso	1.5	14.1	32.43
MG-12	-74.076389	9.920278	37	Chromic Haplusterts.	Arcilloso	1.4	15.9	58.83
MG-14	-74.089722	10.453889	19	Typic Ustorthents	FAAr	1.4	9.7	18.43
MG-14	-74.089722	10.453889	18	Typic Ustorthents	Arcilloso	1.2	19.2	34.56
MG-14	-74.089722	10.453889	23	Typic Ustorthents	Arcilloso	1.6	14.6	33.58
MG-16	-74.139444	10.640556	16	Typic Haplustepts.	FAr	1.5	7.2	11.52
MG-16	-74.139444	10.640556	18	Typic Haplustepts.	FA	1.5	11.5	20.70
MG-16	-74.139444	10.640556	26	Typic Haplustepts.	Arcilloso	1.4	11.7	30.42
MG-17	-74.167222	10.895556	16	Typic Ustipsamments	FAr	1	18.1	28.96
MG-17	-74.167222	10.895556	26	Typic Ustipsamments	FAr	1.2	18.5	48.10
MG-17	-74.167222	10.895556	18	Typic Ustipsamments	Arenosa	NR	12.3	22.14
MG-19	-74.289722	10.588056	24	Fluentic Haplustepts	Arenosa	NR	11.2	26.88
MG-19	-74.289722	10.588056	36	Fluentic Haplustepts	FAr	24-60	12.2	43.92
MG-20	-74.000000	9.086389	20	Lithic Ustorthents.	FA	1.6	9.6	19.20
MG-21	74.303333	93.175000	28	Typic Haplustults	FAr	1.7	4.7	13.16
MG-21	74.303333	93.175000	27	Typic Haplustults	FAr	1.6	6.9	18.63
MG-21	74.303333	93.175000	5	Typic Haplustults	Arcilloso	1.7	5.1	2.55
MG-22	74.233889	9.340556	23	Typic Haplusterts	Arcilloso	1.8	13.4	30.82
MG-22	74.233889	9.340556	37	Typic Haplusterts	Arcilloso	1.6	13.5	49.95
MG-23	-73.818889	9.629444	52	Aeric Endoaquerts.	Arcilloso	1.6	17.6	91.52
MG-23	-73.818889	9.629444	8	Aeric Endoaquerts.	FA	1.9	14	11.20
MG-24	-73.880000	9.604444	13	Typic Haplustepts.	FAr	1.8	12.2	15.86
MG-24	-73.880000	9.604444	43	Typic Haplustepts.	Franca	1.7	13.7	58.91
MG-25	-73.838056	9.635833	39	Typic Haplusterts.	Arcilloso	1.8	13.2	51.48
MG-25	-73.838056	9.635833	21	Typic Haplusterts.	Arcilloso	1.8	11.7	24.57
MG-26	-73.833056	9.621944	51	Chromic Endoaquerts.	Arcilloso	1.6	10.8	55.08
MG-28	-74.483333	10.361111	25	Vertic Haplustepts.	Arcilloso	1.6	7.7	19.25
MG-28	-74.483333	10.361111	15	Vertic Haplustepts.	Arcilloso	1.8	10.4	15.60
MG-28	-74.483333	10.361111	20	Vertic Haplustepts.	Arcilloso	1.9	10.7	21.40
MG-29	-74.479444	10.530000	20	Fluentic Haplustepts.	Franca	1.5	11.9	23.80
MG-29	-74.479444	10.530000	30	Fluentic Haplustepts.	Arcilloso	1.7	9.9	29.70
MG-29	-74.479444	10.530000	10	Fluentic Haplustepts.	Arcilloso	1.7	9.5	9.50
MG-30	-73.158611	9.212222	24	Vertic Haplustepts.	Arcilloso	1.4	22.6	54.24
MG-30	-73.158611	9.212222	21	Vertic Haplustepts.	Arcilloso	1.3	26.3	55.23
MG-30	-73.158611	9.212222	15	Vertic Haplustepts.	Arcilloso	1.4	24.1	36.15
MG-31	-74.627222	10.396667	10	Typic Haplustepts.	Franca	1.6	8.6	8.60
MG-31	-74.627222	10.396667	35	Typic Haplustepts.	Franca	1.5	11.3	39.55
MG-31	-74.627222	10.396667	15	Typic Haplustepts.	Arcilloso	1.7	13.3	19.95
MG-32	-74.598056	10.428056	25	Typic Ustifluvents.	ArF	1.7	6.6	16.50
MG-32	-74.598056	10.428056	35	Typic Ustifluvents.	ArF	1.7	7.2	25.20
MG-33	-74.426944	10.345278	20	Aeric Endoaquerts.	Arcilloso	1.6	8.6	17.20
MG-33	-74.426944	10.345278	18	Aeric Endoaquerts.	FA	1.3	16.7	30.06
MG-33	-74.426944	10.345278	22	Aeric Endoaquerts.	Arcilloso	1.3	16.5	36.30
MG-34	-74.325833	10.505000	25	Typic Ustipsamments.	Arenosa	NR	3.6	9.00
MG-34	-74.325833	10.505000	32	Typic Ustipsamments.	Arenosa	NR	2.5	8.00
MG-34	-74.325833	10.505000	3	Typic Ustipsamments.	Arenosa	NR	3.3	0.99

MG-35	-74.307778	10.339722	20	Typic Haplustepts.	FA	1.6	6	12.00
MG-35	-74.307778	10.339722	15	Typic Haplustepts.	Arenosa	1.5	6.2	9.30
MG-35	-74.307778	10.339722	21	Typic Haplustepts.	FAR	1.4	7.8	16.38
MG-36	-74.325833	10.561111	20	Fluentic Haplustepts	FAR	1.8	8.1	16.20
MG-36	-74.325833	10.561111	32	Fluentic Haplustepts	Arcilloso	1.8	8.1	25.92
MG-36	-74.325833	10.561111	8	Fluentic Haplustepts	Arcilloso	1.7	9.6	7.68
MG-37	-74.303333	10.604444	10	Typic Haplustepts.	ARF	1.6	9.1	9.10
MG-37	-74.303333	10.604444	18	Typic Haplustepts.	ARF	1.8	5.7	10.26
MG-38	-74.294444	10.588611	45	Typic Ustifluents.	Arenosa	NR	4	18.00
MG-38	-74.294444	10.588611	15	Typic Ustifluents.	Arenosa	NR	3.7	5.55
MG-39	-74.164167	10.619722	10	Typic Haplustepts.	FAR	1.7	6.9	6.90
MG-39	-74.164167	10.619722	20	Typic Haplustepts.	FA	1.6	9.1	18.20
MG-39	-74.164167	10.619722	30	Typic Haplustepts.	FAAR	1.7	9.4	28.20
MG-40	-73.917222	9.177778	15	Typic Ustifluents.	ARF	1.7	2.6	3.90
MG-40	-73.917222	9.177778	20	Typic Ustifluents.	FAR	1.8	4.6	9.20
MG-40	-73.917222	9.177778	25	Typic Ustifluents.	FAR	1.8	4.1	10.25
MG-41	-73.885556	9.611944	29	Aquic Haplustepts.	FAR	1.7	8.3	24.07
MG-42	-73.908611	9.604444	28	Fluentic Haplustepts.	FAR	1.6	10.7	29.96
MG-43	-73.927500	9.601389	35	Fluentic Haplustepts.	FAR	1.7	9.3	32.55
MG-44	-74.585000	9.328611	16	Chromic Endoaquerts.	Arcilloso	1.1	12.2	19.52
MG-44	-74.585000	9.328611	22	Chromic Endoaquerts.	Arcilloso	1.4	11.8	25.96
MG-44	-74.585000	9.328611	22	Chromic Endoaquerts.	Arcilloso	1.4	13.6	29.92
MG-45	-74.465833	9.475556	20	Typic Ustorthents.	FAR	1.6	6	12.00
MG-45	-74.465833	9.475556	25	Typic Ustorthents.	FAR	NR	6.3	15.75
MG-45	-74.465833	9.475556	15	Typic Ustorthents.	FAR	1.9	6.8	10.20
MG-46	-74.572500	9.338611	35	Typic Ustorthents.	ARF	1.9	7.3	25.55
MG-46	-74.572500	9.338611	25	Typic Ustorthents.	FAR	NR	6.9	17.25
MG-47	-74.564444	9.352222	17	Typic Haplustults.	FAR	1.9	5.9	10.03
MG-47	-74.564444	9.352222	15	Typic Haplustults.	FAR	1.7	5.1	7.65
MG-47	-74.564444	9.352222	18	Typic Haplustults.	FAR	1.9	6.4	11.52
MG-47	-74.564444	9.352222	10	Typic Haplustults.	FA	2.3	8.4	8.40
MG-48	-74.024444	10.246667	17	Chromic Endoaquerts.	Arcilloso	1.9	5.9	10.03
MG-48	-74.024444	10.246667	15	Chromic Endoaquerts.	Arcilloso	1.7	5.1	7.65
MG-48	-74.024444	10.246667	18	Chromic Endoaquerts.	Arcilloso	1.9	6.4	11.52
MG-48	-74.024444	10.246667	10	Chromic Endoaquerts.	Arcilloso	2.3	8.4	8.40
MG-49	-74.117222	9.902500	14	Typic Haplusterts.	Arcilloso	1.7	14.2	19.88
MG-49	-74.117222	9.902500	31	Typic Haplusterts.	Arcilloso	1.8	14.6	45.26
MG-49	-74.117222	9.902500	15	Typic Haplusterts.	Arcilloso	2.1	14.5	21.75
MG-50	-74.113056	10.445556	35	Dystric Haplustepts.	ARF	1.5	4.6	16.10
MG-50	-74.113056	10.445556	25	Dystric Haplustepts.	FAAR	1.9	7.2	18.00
MG-51	-74.035556	9.600833	22	Vertic Haplustolls.	Arcilloso	1.8	12.3	27.06
MG-51	-74.035556	9.600833	28	Vertic Haplustolls.	Arcilloso	1.7	11.7	32.76
MG-52	-74.036389	9.590833	15	Typic Ustorthents.	FAR	1.8	11	16.50
MG-52	-74.036389	9.590833	19	Typic Ustorthents.	ARF	2	5.9	11.21
MG-53	-74.025833	9.596667	20	Typic Haplustepts.	Arcilloso	1.8	12.5	25.00
MG-53	-74.025833	9.596667	20	Typic Haplustepts.	FA	1.7	18.3	36.60
MG-54	-74.030556	9.590278	17	Typic Haplusterts.	Arcilloso	1.8	17.1	29.07
MG-54	-74.030556	9.590278	18	Typic Haplusterts.	Arcilloso	1.7	18.6	33.48
MG-56	-73.969444	9.592222	13	Typic Haplusterts.	Arcilloso	1.6	12.8	16.64
MG-56	-73.969444	9.592222	20	Typic Haplusterts.	Arcilloso	1.7	13.9	27.80
MG-58	-74.101389	10.452778	16	Typic Haplustepts.	Franca	1.8	11.9	19.04
MG-58	-74.101389	10.452778	19	Typic Haplustepts.	Arcilloso	1.8	7.7	14.63
MG-58	-74.101389	10.452778	25	Typic Haplustepts.	Franca	2	10.5	26.25
MG-59	-74.131111	10.574167	25	Typic Ustorthent	ARF	1.9	5.5	13.75
MG-59	-74.131111	10.574167	21	Typic Ustorthent	ARF	2	5.3	11.13
MG-59	-74.131111	10.574167	14	Typic Ustorthent	FAAR	1.8	12.7	17.78
MG-60	-74.143056	10.688889	35	Typic Haplustepts.	FAR	2	8.3	29.05
MG-60	-74.143056	10.688889	21	Typic Haplustepts.	Arcilloso	2	9	18.90
MG-61	-74.256944	10.629444	25	Fluentic Haplustepts.	Franca	1.8	11.8	29.50
MG-61	-74.256944	10.629444	15	Fluentic Haplustepts.	FAAR	1.8	15.7	23.55
MG-61	-74.256944	10.629444	20	Fluentic Haplustepts.	ARF	1.7	8.3	16.60
MG-62	-74.206111	10.693611	26	Typic Haplustolls.	FA	1.7	30.1	78.26
MG-62	-74.206111	10.693611	25	Typic Haplustolls.	AL	1.9	27.6	69.00
MG-62	-74.206111	10.693611	9	Typic Haplustolls.	AL	1.7	34.9	31.41
MG-63	-74.182778	10.673889	30	Typic Haplustolls.	FAR	1.7	25.3	75.90
MG-63	-74.182778	10.673889	30	Typic Haplustolls.	FA	1.9	22.2	66.60
MG-67	-74.065278	10.905556	22	Typic Udorthents	FL	1.1	30.4	66.88
MG-67	-74.065278	10.905556	33	Typic Udorthents	Limosa	0.98	32.9	108.57
MG-67	-74.065278	10.905556	5	Typic Udorthents	FL	NR	29.4	14.70
MG-68	-74.166667	11.281389	22	Typic Ustifluents	ARF	1.5	5.7	12.54
MG-68	-74.166667	11.281389	18	Typic Ustifluents	ARF	1.4	22.1	39.78
MG-68	-74.166667	11.281389	15	Typic Ustifluents	Franca	1.2	25.9	38.85
MG-68	-74.166667	11.281389	5	Typic Ustifluents	FAR	NR	18.9	9.45
MG-69	-73.689444	11.234722	20	Typic Haplustepts	Franca	1.5	8.8	17.60
MG-69	-73.689444	11.234722	40	Typic Haplustepts	Franca	1.5	11	44.00
MG-70	-73.584722	11.211944	24	Typic Ustorthents	FAR gravillosa	NR	9.1	21.84
MG-70	-73.584722	11.211944	35	Typic Ustorthents	FAR gravillosa	NR	8.8	30.80

MG-70	-73.584722	11.211944	1	Typic Ustorthents	FAr	NR	10.2	1.02
MG-72	-74.362778	10.305833	30	Typic Haplustepts	FA	1.4	10.1	30.30
MG-72	-74.362778	10.305833	30	Typic Haplustepts	FAAr	1.7	9	27.00
MG-73	-74.311944	10.354722	28	Typic Haplustepts	FA	1.4	10.8	30.24
MG-73	-74.311944	10.354722	32	Typic Haplustepts	Arcillosa	1.4	10.5	33.60
MG-73	-74.311944	10.354722	0	Typic Haplustepts	FA	1.6	10.7	0.00
MG-74	-74.302778	10.353611	15	Vertic Haplustepts	FA	1.3	9.4	14.10
MG-74	-74.302778	10.353611	35	Vertic Haplustepts	Arcillosa	1.4	8.8	30.80
MG-74	-74.302778	10.353611	10	Vertic Haplustepts	FA	1.5	11.2	11.20
MG-75	-74.298056	10.346944	21	Fluentic Haplustepts	FAr	1.5	11.8	24.78
MG-75	-74.298056	10.346944	36	Fluentic Haplustepts	Franca	1.4	9.4	33.84
MG-75	-74.298056	10.346944	3	Fluentic Haplustepts	FAAr	1.4	13	3.90
MG-77	-74.229722	10.534722	21	Chromic Endoaquerts	Arcillosa	1.7	8.1	17.01
MG-77	-74.229722	10.534722	29	Chromic Endoaquerts	Arcillosa	1.5	11.7	33.93
MG-77	-74.229722	10.534722	10	Chromic Endoaquerts	Arcillosa	1.5	18.7	18.70
MG-78	-74.151389	10.550278	20	Typic Ustifluents.	ArF	1.4	12	24.00
MG-78	-74.151389	10.550278	40	Typic Ustifluents.	FAr	1.4	12.9	51.60
MG-78	-74.151389	10.550278	0	Typic Ustifluents.	FAr	1.4	12.8	0.00
MG-79	-74.102778	10.743333	25	Typic Ustorthents	FAr	1	11	27.50
MG-80	-73.953056	10.403056	25	Typic Eutrudepts	FAr	1.5	12	30.00
MG-80	-73.953056	10.403056	35	Typic Eutrudepts	FAAr	1.5	10.6	37.10
MG-80	-73.953056	10.403056	0	Typic Eutrudepts	FAAr	NR	8.5	0.00
MG-81	-73.958889	10.412500	20	Lithic Udorthents	FAr	NR	5.5	11.00
MG-82	-74.060556	10.898889	40	Typic Dystrudepts	Franca	1.1	20.2	80.80
MG-82	-74.060556	10.898889	20	Typic Dystrudepts	Franca	1.5	21.6	43.20
MG-83	-73.695278	11.237222	25	Typic Ustorthents	Franca	1	14.9	37.25
MG-83	-73.695278	11.237222	30	Typic Ustorthents	Franca	NR	10.4	31.20
MG-83	-73.695278	11.237222	5	Typic Ustorthents	Franca	NR	13.9	6.95
MG-84	-73.586667	11.204444	50	Typic Dystrudepts	FAAr	1.5	11.8	59.00
MG-84	-73.586667	11.204444	10	Typic Dystrudepts	FAAr	1.7	12.4	12.40
MG-85	-74.008056	11.086944	23	Humic Dystrudepts	FAr	0.9	22.3	51.29
MG-85	-74.008056	11.086944	34	Humic Dystrudepts	FAr	0.88	21.7	73.78
MG-85	-74.008056	11.086944	3	Humic Dystrudepts	Franca	NR	36.3	10.89
MG-86	-73.789167	11.021944	25	Lithic Udorthents	FAr	NR	26.7	66.75
MG-86	-73.789167	11.021944	15	Lithic Udorthents	FAr	NR	28	42.00
MG-87	-74.005278	11.274167	50	Typic Haplustepts	FAr gravillosa	1.3	8.2	41.00
MG-87	-74.005278	11.274167	10	Typic Haplustepts	FAr	1.7	5.8	5.80
MG-88	-74.000000	11.271944	22	Typic Haplustepts	FAr gravillosa	1.5	6.4	14.08
MG-88	-74.000000	11.271944	38	Typic Haplustepts	FAr gravillosa	1.5	10.1	38.38
MG-89	-74.003333	11.276944	17	Lithic Ustorthents	ArF	NR	3.4	5.78
MG-89	-74.003333	11.276944	21	Lithic Ustorthents	ArF gravillosa	NR	7	14.70
MG-90	-73.824167	11.246389	20	Lithic Ustorthents	FAr gravillosa	1.1	8	16.00
MG-91	-74.099444	11.261667	15	Lithic Haplustolls	FAr gravillosa	1.5	15.1	22.65
P-23	-74.160556	10.901389	37	Fluentic Haplustepts.	Franca	1.42	11.2	41.44
P-23	-74.160556	10.901389	17	Fluentic Haplustepts.	FAr gravillosa	1.44	7.2	12.24
P-23	-74.160556	10.901389	6	Fluentic Haplustepts.	FAAr	1.4	13	7.80
P-25	-74.082222	11.314167	10	Lithic Haplustolls	FAr	NR	9.5	9.50
P-25	-74.082222	11.314167	20	Lithic Haplustolls	Roca consolidada	NR	5.3	10.60
P-26	-74.068889	11.326667	16	Typic Haplustolls	Franca gravillosa	NR	3.2	5.12
P-26	-74.068889	11.326667	29	Typic Haplustolls	FA con gravilla	NR	1.8	5.22
P-53	-74.436944	10.919444	24	Fluentic Haplustepts.	Arenosa	NR	8.2	19.68
PERFIL 12	-74.721667	10.916667	105	Thapto Histic Fluvaquents	M.O. Lig. Descompuesto	NR	19.5	204.75
PERFIL 14	-74.558056	10.759722	8	Hydric Haplofibrists	M.O. Lig. Descompuesto	NR	24.1	19.28
PERFIL 14	-74.558056	10.759722	52	Hydric Haplofibrists	M.O. Lig. Descompuesto	NR	20.8	108.16
PERFIL 15	-74.624722	10.924444	100	Typic Psammaquents	Arenosa	NR	41.5	415.00
PERFIL 16	-74.611667	10.925556	20	Typic Psammaquents	ArF	NR	36.8	73.60
PERFIL 16	-74.611667	10.925556	25	Typic Psammaquents	ArF	NR	8.9	22.25
PERFIL 16	-74.611667	10.925556	15	Typic Psammaquents	ArF	NR	19.4	29.10
PERFIL 17	-74.608889	10.748333	15	Chromic Haplusterts	Arcillosa	NR	13.4	20.10
PERFIL 17	-74.608889	10.748333	33	Chromic Haplusterts	Arcillosa	NR	19.2	63.36
PERFIL 17	-74.608889	10.748333	12	Chromic Haplusterts	Arcillosa	NR	16.9	20.28
PERFIL 18	-74.633333	10.452778	15	Typic Endoaquerts	Arcillosa	1.2	6.3	9.45
PERFIL 18	-74.633333	10.452778	25	Typic Endoaquerts	Arcillosa	1.3	9	22.50
PERFIL 18	-74.633333	10.452778	20	Typic Endoaquerts	Arcillosa	1.2	11.6	23.20
PERFIL 20	-74.584444	10.725556	70	Hydric Haplofibrist	M.O. lig. Descompuesto	NR	7.2	50.40
PERFIL 24	-74.636111	10.670833	25	Aquic Haplustepts	Arcillosa	1.6	25.3	63.25
PERFIL 24	-74.636111	10.670833	17	Aquic Haplustepts	Franca	1.6	15.5	26.35
PERFIL 25	-74.700000	10.594444	17	Fluentic Haplustepts	FL	1.4	31.9	54.23
PERFIL 25	-74.700000	10.594444	33	Fluentic Haplustepts	FA	NR	23	75.90
PERFIL 25	-74.700000	10.594444	10	Fluentic Haplustepts	FAL	NR	18.1	18.10
PERFIL 26	-74.662500	10.583333	7	Saladic Natrustalfs	FA	1.6	20.7	14.49
PM-05	-74.845278	9.941667	25	Vertic Endoaqupts	Arcillosa	NR	7.4	18.50
PM-05	-74.845278	9.941667	10	Vertic Endoaqupts	FAr	NR	14.2	14.20
PM-6	-74.821389	9.810000	29	Vertic Endoaqupts	Arcillosa	NR	12.3	35.67
PM-15	-74.599722	9.826667	13	Typic Ustorthents	FAr	NR	13.7	17.81
PM-15	-74.599722	9.826667	47	Typic Ustorthents	Gravilla calcárea	NR	13.1	61.57
PM-16	-74.615000	9.828611	32	Typic Haplustepts	FA	NR	14.7	47.04

PM-17	-74.326944	9.654722	12	Lithic Ustorthents	FAAr	NR	12.6	15.12
PM-17	-74.326944	9.654722	48	Lithic Ustorthents	Areniscas	NR	29.1	139.68
PM-19	-74.279167	9.666389	15	Typic Haplusterts	Arcillosa	NR	10.3	15.45
PM-19	-74.279167	9.666389	25	Typic Haplusterts	Arcillosa	NR	12.5	31.25
PM-19	-74.279167	9.666389	20	Typic Haplusterts	Arcillosa	NR	11.1	22.20
PM-20	-74.774722	9.813611	32	Typic Haplustepts	Arcillosa	NR	15.8	50.56
PM-20	-74.774722	9.813611	28	Typic Haplustepts	Arcillosa	NR	10.4	29.12
PM-21	-74.778333	9.813056	30	Typic Haplustepts	Arcillosa	1.3	11.9	35.70
PM-34A	-74.923333	10.176111	28	Aquic Haplustepts	FL	NR	5.9	16.52
PM-40	-74.126667	10.182500	30	Typic Ustifluvents	Franca	NR	6.8	20.40
PM-40	-74.126667	10.182500	30	Typic Ustifluvents	FAL	NR	17.8	53.40
PZ40	-74.803333	9.728889	7	Typic Ustifluvents	FAr	NR	11.3	7.91
PZ40	-74.803333	9.728889	18	Typic Ustifluvents	FAr	NR	26.5	47.70
PZ40	-74.803333	9.728889	35	Typic Ustifluvents	Arenosa	NR	20.3	71.05
PZ-41	-74.796944	9.726667	12	Typic Endoaquents	FL	NR	13.1	15.72
PZ-41	-74.796944	9.726667	48	Typic Endoaquents	FL	NR	15.9	76.32
SN-3	-73.636667	10.650000	13	Humic Endoaquents	Franca	0.99	15.1	19.63
SN-4	-73.645278	10.672500	16	Lithic Cryorthents	FAr	1.4	15.4	24.64
SN-5	-73.631111	10.649167	33	Humic Dystrudepts	FAr	0.91	12.5	41.25
SN-5	-73.631111	10.649167	25	Humic Dystrudepts	FAr	NR	13.3	33.25
SN-31	-73.619444	10.570556	12	Humic Eutruudepts	FAAr	1.5	11.9	14.28
SN-31	-73.619444	10.570556	28	Humic Eutruudepts	FA	1.5	12.1	33.88
SN-79	-74.079722	11.100000	38	Humic Dystrudepts	FAr	NR	10.8	41.04
SN-79	-74.079722	11.100000	22	Humic Dystrudepts	FAAr	NR	12.5	27.50
SN-91	-73.928889	11.027222	22	Typic Dystrudepts	Franca	NR	8.4	18.48
SN-91	-73.928889	11.027222	23	Typic Dystrudepts	FAAr	NR	6.4	14.72
SN-91	-73.928889	11.027222	15	Typic Dystrudepts	FAAr	NR	6.1	9.15