



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua

**ZONIFICACIÓN HÍDRICA DE LA ZONA NORTE DEL
EJE BANANERO DEL URABÁ ANTIOQUEÑO ENFOCADA AL
CULTIVO DEL BANANO**

TESIS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL
DEL AGUA**



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

PRESENTA

ANA MARÍA TORO TRUJILLO

Agosto de 2014

Chapingo, Texcoco de Mora, Estado de México



**ZONIFICACIÓN HÍDRICA DE LA ZONA NORTE DEL EJE BANANERO DEL
URABÁ ANTIOQUEÑO ENFOCADA AL CULTIVO DEL BANANO**

Tesis realizada por **Ana María Toro Trujillo** bajo la dirección del comité indicado,
aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA
ORIENTACIÓN USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR:



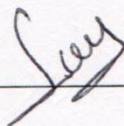
Dr. Ramón Arteaga Ramírez

ASESOR:



Dr. Mario Alberto Vázquez Peña

ASESOR:



Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo

Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo y no el resultado, Un esfuerzo total es una victoria completa (Mahatma Gandhi)

DEDICATORIA

Sobran los motivos para decirle a Dios Gracias por las incontables oportunidades. Pon en manos del Señor todas tus obras, y tus proyectos se cumplirán (Proverbios 16:3)

A mi mamá Fanny Stella Trujillo quien es mi más fiel amiga y mi papa Nicolás Toro Osorio de quien recibí el ejemplo para luchar hasta alcanzar las metas propuestas. Gracias por estar siempre pendientes de mí y entregarme valores y herramientas esenciales para vivir y por sobre todas las cosas me dieron AMOR, elemento fundamental para mi crecimiento.

A Vladimir Pérez Lagares mi compañero porque este trabajo le robó parte de su tiempo y de mi presencia. Gracias por su comprensión, amor, dedicación y paciencia, porque solo tú y yo sabemos lo cuesta forjar un futuro para una familia, porque no tengo como agradecer por no haberme cortado las alas.

A mis hermanas Mariana y Valentina Toro Trujillo quienes con sus locura me mostraron que se debe vivir alegremente sin importar las adversidades.

A mi familia TORO y TRUJILLO que siempre estuvo pendiente de mi especialmente a mi primo YUYO, y mis amigos Juan José Giraldo y José Aldemar Forero con los cuales conté incondicionalmente.

A Fernando González Leiva “el Lango” por su apoyo y compañía.

A mi amiga Nadia y Marlio porque encontré un hogar y familia en el bungalow número 2.

A la memoria de mi de Abuela Aleyda Osorio, quien partió sin verme regresar de México.

A un gran amigo Mexicano Guillermo, por su invaluable colaboración y apoyo.

A todas la personas de Urabá que me ayudaron a realizar y cumplir este Sueño

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado durante mis estudios de Maestría en México.

A la Universidad Autónoma Chapingo por darme la oportunidad de realizar mis estudios.

Al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua por el apoyo brindado durante toda la maestría.

Al Dr. Mauricio Carrillo y Eugenio Romanchick K, por su confianza y apoyo.

Al Dr. Ramón Arteaga Ramírez por su asesoramiento, disposición siempre en atenderme, por permitir mi desarrollo personal y académico, por creer en mi trabajo, por sus siempre acertadas recomendaciones, pero sobre todo por su excelente dirección y paciencia.

Al Dr. Mario Alberto Vázquez Peña y Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo por sus revisiones y recomendaciones, sin duda enriquecieron la presente investigación.

A todos los profesores de la Universidad Autónoma Chapingo que contribuyeron con su conocimiento en mi formación.

A todo el personal administrativo y operativo que contribuyó de alguna forma con este logro.

A México lindo y querido por permitir vivir estas experiencias en tierras ajenas

DATOS BIOGRÁFICOS DEL AUTOR

La autora del presente trabajo de tesis es originaria de Colombia, nacida el 20 de junio de 1987 en el municipio de Apartadó el departamento de Antioquia. En enero de 2005 ingresó a la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional Sede Medellín a realizar estudios de Ingeniería Agrícola, obteniendo el título como Ingeniera Agrícola el 29 de julio de 2011.

En el ámbito profesional trabajó en Bananeras de Urabá S.A desempeñando el cargo de Coordinadora de Drenajes comunal San Jorge y La Suerte, en municipio de Turbo en el departamento de Antioquia entre Agosto de 2011 y julio de 2012.

En agosto de 2012 ingresó al Programa de Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua en la Universidad Autónoma Chapingo, para realizar estudios de Maestría especialmente en la que intervienen la Agroclimatología, el uso eficiente del agua en los sistemas agrícolas y las Relaciones Agua Suelo Planta Atmosfera.

ZONIFICACION HIDRICA DE LA ZONA NORTE DEL EJE BANANERO DEL URABÁ ANTIOQUEÑO ENFOCADA AL CULTIVO DEL BANANO.

Autor: Ana María Toro Trujillo

Maestría en Ingeniería Agrícola y uso integral del agua

Director: Ramón Arteaga Ramírez

RESUMEN

La presente investigación se realizó en cinco partes. La primera parte tuvo como objetivo determinar la confiabilidad siguientes métodos de relleno de datos perdidos: U.S Nacional Weather Service (WS), deductivo racional (DR), regresión múltiple (RM) y simple (RL). La segunda parte tuvo dos objetivos: 1) evaluar la confiabilidad de los métodos de estimación de la radiación Rssamani (Samani, 2000), IDEAM (IDEAM, 2005) y Angstrom-Prescott con los coeficientes de estaciones climatológicas (*ap* y *bp*) y así como los coeficientes de: Allen *et al.* (2006), Frere *et al.* (1978) y Frere y Popov (1974), y 2) evaluar los métodos para estimación de evapotranspiración HS1985 (Hargreaves y Samani, 1985), Hargreaves y FAO(Samani) (Allen *et al.*, 2006) y su ajuste al modelo lineal con PM (AJUST). El objetivo de la tercer parte fue identificar las épocas y regiones donde se producen exceso o deficiencia de humedad y, a partir de estos datos, clasificar el clima de la región, siguiendo la metodología de Thornthwaite-Mather. La cuarta parte se realizó con los objetivos de determinar el inicio de la estación de crecimiento cuando la probabilidad de excedencia es 20, 40, 60 y 80% de la distribución normal, basada en la definición de tres criterios, y de conocer la probabilidad de ocurrencia de periodos secos con duración 5,10 días, días críticos cuando la primera capa y días críticos cuando la primera y segunda capa del suelo alcance de Punto de Marchitez, definiendo un día seco con un umbral < 0.5 de Evapotranspiración (Eto). Finalmente, la quinta parte tuvo el objetivo de calcular los requerimientos de riego y la reducción del rendimiento del cultivo de banano en condiciones de secano. Para tres escenarios fue calculada la lluvia probabilística: 20 (escenario húmedo), 50 (escenario normal) y 80% (escenario seco). Para la primera, segunda, y tercer parte del estudio se emplearon datos diarios de precipitación y temperatura máxima y mínima de tres estaciones climatológicas fuera y ocho dentro de la zona de estudio y así como una estación dentro con radiación solar visible en periodo 2006-2009. Para la cuarta parte, se utilizó los datos de precipitación de 2004-2012, un valor anual de evapotranspiración representativo, y para la última parte, la precipitación de 2004-2012 y las temperaturas mínimas y máximas de 2004-2009 a escala diaria. En las tres últimas partes sólo se emplearon los datos provenientes de siete estaciones dentro de zona de estudio. Para los objetivos de la quinta parte del estudio, se empleó el software INSTAT, y para la última parte, se utilizó el modelo CROPWAT. Los resultados muestran que en el Norte del eje bananero del Urabá Antioqueño se debe utilizar WS para el relleno de datos faltantes porque presentó los menores valores de RCCME, MAE y RE, así como los mayores o similares valores de R^2 y (d). Los coeficientes $a=0.29$ y $b=0.49$ de Frere *et al.* (1978) tuvieron estadísticos similares a los obtenidos con coeficientes *ap* y *bp*, y su utilización permitió disminuir la incertidumbre en el cálculo de Eto. La EtoHS1985 dentro y fuera de la zona de estudio tuvo los mejores estadísticos presentando los valores más bajos de RCCME y RE, y valores de R^2 mayores a 0.777. La implementación del modelo lineal reducen los errores 29.6% y se obtiene una $R^2 > 0.8$, por tanto se recomienda el uso de estos coeficientes obtenidos para ajustar la evapotranspiración a PM y la implementación del modelo EtoHS1985AJUST. Los déficit de humedad ocurren entre enero y marzo con valores entre 10-80 mm, siendo mayores en la parte Norte, mientras que de abril a diciembre se presentan excesos de 1400-1800mm, siendo superiores en la parte Sur. Por tanto, la zona se clasifica como muy húmeda en la parte Norte y como súper húmeda en parte Sur occidental. Las dos partes de la zona tienen deficiencia pequeña o nula (HA), clima cálido (TA) y concentración térmica normal (CA). Según el criterio 3, que no contempla periodos secos, presentó los mayores fechas inicios tardíos de la estación de crecimiento, al brindar el menor riesgo de someter a sequia las plantaciones nuevas y establecidas y se determina esta fecha como la siembra óptima, mientras que los criterios 1 y 2 pueden ser utilizados para definir las épocas de labores de fertilización y preparación del terreno. En el Noroccidente de la zona de estudio hay mayor probabilidad de presentar periodos secos y, por ende, los valores más bajos de duración de la estación de crecimiento están allí. Sin embargo, el Nororiente de la zona presenta los mayores requerimientos de riego (500,300, 150 mm escenario, seco, normal y húmedo, respectivamente) y reducciones de producción 15-30% con siembras en verano y 3-10% de reducción con siembra después del criterio 1 en escenario normal y seco, respectivamente. En el futuro las necesidades de riego serán aumentadas hasta en 50% acorde a los escenarios simulados, siendo mayor para las siembras realizadas el primero de enero para las realizadas partir del seis de abril (Inicio de lluvias).

Palabras clave: Métodos de relleno, Balance hídrico, estación de crecimiento, periodo seco, requerimiento de riego, reducción del rendimiento, modelo CROPWAT.

WATER ZONING FOR BANANA CULTIVATION IN NORTH URABÁ ANTIOQUEÑO BANANA BELT

Author: Ana María Toro Trujillo

Masters in Agricultural Engineering and Integrated Water Use

Director: Ramón Arteaga Ramírez

ABSTRACT

The present investigation was conducted in five parts. The first part had the objective of determining the reliability of the following methods of filling in missing data: U.S. National Weather Service (WS), the rational deductive (DR) method, multiple (RM) and simple (RL) regression. The second part had two objectives: 1) evaluate the reliability of the radiation estimation methods Rssamani (Samani, 2000), IDEAM (IDEAM, 2005) and Angstrom-Prescott, with weather station coefficients (ap and bp) as well as the coefficients of Allen *et al.* (2006), Frere *et al.* (1978) and Frere and Popov (1974), and 2) assess methods for estimating evapotranspiration HS1985 (Hargreaves and Samani, 1985), Hargreaves and FAO Radiation (Samani) (Allen *et al.*, 2006) and its fit to the linear model with PM (AJUST). The objective of the third part was to identify the times and regions where excess or deficiency of moisture occurs and, from these data, classify the climate of the region following the Thornthwaite-Mather methodology. The objectives of the fourth part were to determine the start of the growing season when exceedance probability is 20, 40, 60 and 80% of the normal distribution, based on the definition of three criteria, and to determine the probability of occurrence of 5 to 10 day dry periods, critical days for the first layer and critical days for the first and second layer of the soil when wilting point is reached, defining a dry day with a threshold <0.5 evapotranspiration (Eto). The fifth part had the objective of calculating irrigation requirements and yield reduction of banana crop under rainfed conditions. For three scenarios, probabilistic rainfall was calculated: 20 (wet scenario), 50 (normal scenario) and 80% (scenario dry). The first, second, and third part of the study used daily data on precipitation and maximum and minimum temperature from three weather stations outside and eight inside the study area as well as one station inside with solar radiation visible in 2006-2009. For the fourth part, data of precipitation from 2004-2012 and a representative annual value of evapotranspiration were employed, and for the last part, the daily precipitation of 2004-2012 and the daily minimum and maximum temperatures of 2004-2009. In the last three parts only data from seven stations inside the study area were used. For the objective of the fifth part of the study, INSTAT software was used, and the last part used the model CROPWA. The results show that WS should be used for filling in missing data in the northern Urabá Antioqueño banana belt where the lowest values of RCCME, MAE, and RE, as well as higher or similar values of R^2 and (d), were obtained. The coefficients $a = 0.29$ and $b = 0.49$ Frere *et al.* (1978) had statistics similar to those obtained with coefficients ap and bp , and their use helped to reduce uncertainty in the calculation of Eto. The EtoHS1985 inside and outside the study area had the best statistics with the lowest RCCME and RE values, and R^2 values above 0.777. The implementation of the linear model reduced errors by 29.6% and obtained an $R^2 > 0.8$. Therefore, the use of the obtained coefficients to fit evapotranspiration to PM and implementing the EtoHS1985AJUST model are recommended. Moisture deficit occurs between January and March with values of 10 to 80 mm, being higher in the north, while from April to December excesses of 1400-1800 mm occur, being higher in the south. Therefore, the area is classified as very wet in the northern part and as super humid in south western part. The two parts of the area have little or no deficiency (HA), warm weather (TA) and normal thermal concentration (CA). According to criterion 3, that does not contemplate dry periods, the highest date of late starts of the growing season are presented, providing the lowest risk of subjecting new and established plantations to drought and is determined as optimal planting period, while criteria 1 and 2 can be used to define periods of fertilization and site preparation tasks. In the northwest of the study area there is higher probability of dry periods and, therefore, the growing season is shorter. However, the northeast of the study area has the highest irrigation requirements (500.300, 150 mm dry scenario, normal and wet, respectively) and 15-30% reductions in production with planting in summer and 3-10% reduction when planting after criteria 1 in normal and dry scenarios, respectively. In the future, irrigation needs will increase up to 50% according to the simulated scenarios, being higher for planting on January first than planting on April 6th (Beginning of the rainy season).

Keywords: filling methods, water balance, growing season, dry period, irrigation requirement, reduced performance, CROPWAT model.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DATOS BIOGRÁFICOS DEL AUTOR	V
TABLA DE CONTENIDO	VIII
ÍNDICE DE CUADROS	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
LITERATURA CITADA	7
CAPÍTULO 2. RELLENO DE SERIES DIARIAS DE PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA MÍNIMA, MÁXIMA DE LA REGIÓN NORTE DEL URABÁ ANTIOQUEÑO	13
1. INTRODUCCIÓN	15
2. MATERIALES Y MÉTODOS	17
2.1. Localización de zona de estudio	17
2.2. Estaciones meteorológicas utilizadas.	18
2.3. Método	22

2.4.	Estimación del error	22
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
4.	CONCLUSIONES	31
5.	LITERATURA CITADA	32

CAPÍTULO 3. MODELOS PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA EN LA ZONA NORTE BANANERA DEL URABÁ ANTIOQUEÑO (COLOMBIA)

1.	INTRODUCCIÓN	38
2.	MATERIALES Y MÉTODOS	40
2.1.	Localización del área de estudio	40
2.2.	Información climatológica	40
2.3.	Estimación de los coeficientes a y b de la ecuación de Angstrom–Prescott	43
2.4.	Estimación de la radiación solar	44
2.5.	Determinación de la evapotranspiración de referencia	46
2.6.	Modelo de regresión lineal	48
2.7.	Estadísticos de comparación	48
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
3.1.	Estimación de los coeficientes a y b de la ecuación de Angstrom –Prescott	49
3.2.	Determinación de la radiación solar	49
3.3.	Determinación de la evapotranspiración de referencia	51

4. CONCLUSIONES	62
5. LITERATURA CITADA	62

CAPÍTULO 4. ZONIFICACIÓN AGROCLIMÁTICA Y BALANCE HÍDRICO DE LA ZONA NORTE DEL EJE BANANERO DEL URABÁ ANTIOQUEÑO. 68

1. INTRODUCCIÓN	70
2. MATERIALES Y MÉTODOS	72
2.1. Ubicación de zona de estudio	72
2.2. Datos climatológicos	73
2.3. Datos de suelo	74
2.4. Determinación de la evapotranspiración de referencia(Eto)	74
2.5. Modelo lineal PM	75
2.6. Estimación del error	77
2.7. Balance hídrico climático (BHC)	77
2.8. Índices agroclimáticos	78
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	79
3.1. Evapotranspiración	79
3.2. Balance hídrico climático (BHC)	83
4. CONCLUSIONES	91
5. LITERATURA CITADA	91

CAPÍTULO 5. INICIO DE LA ESTACIÓN DE CRECIMIENTO Y PERIODOS	
SECOS EN EL NORTE DEL EJE BANANERO DEL URABÁ ANTIOQUEÑO	95
1. INTRODUCCIÓN	96
2. METODOLOGÍA	100
2.1. Localización de zona de estudio	100
2.2. Información climatológica	100
2.3. Datos de suelo	101
2.4. Instat (versión 3.37)	101
2.5. Determinación de la fecha de inicio de las lluvias apreciables (IL)	102
2.6. Criterios de inicio de la estación de crecimiento	103
2.7. Tratamiento probabilístico del inicio de la estación de crecimiento y del inicio de lluvias.	104
2.8. Definición de un día seco	104
2.9. Cálculo de la probabilidad de ocurrencia de periodos secos con duración 5, 10 días secos y la duración crítica para el cultivo de banano.	105
2.10. Período de sequía crítico	105
2.11. Definición y clasificación de Sequía	107
2.12. Determinación de la longitud de la estación de crecimiento (EC)	107
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	107
3.1. Determinación de la fecha de inicio de las lluvias	107
3.2. Inicio de estación de crecimiento (IEC)	108

3.3.	Periodos secos e inicio de la estación de crecimiento	116
3.4.	Determinación de la longitud de la estación de crecimiento (EC)	124
4.	CONCLUSIONES	130
5.	LITERATURA CITADA	131
CAPÍTULO 6. REQUERIMIENTOS DE RIEGO Y PREDICCIÓN DE RENDIMIENTO EN EL CULTIVO DE BANANO MEDIANTE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN EL URABÁ ANTIOQUEÑO COLOMBIA		136
1.	INTRODUCCIÓN	138
2.	MATERIALES Y MÉTODOS	141
2.1.	Área de estudio	141
2.2.	Información climática	141
2.3.	Modelo CROPWAT	142
2.4.	Datos de suelo	143
2.5.	Cálculo de ETo	144
2.6.	Precipitación efectiva (P_{ef})	144
2.7.	Coeficientes de cultivo (K_c)	145
2.8.	Evapotranspiración del cultivo de Banano	145
2.9.	Predicción de rendimiento (ecuación de productividad)	146
2.10.	Fecha de siembra	147
2.11.	Escenarios climáticos	147

3.	Resultados y discusión	148
3.1.	Evapotranspiración de referencia (Eto).	148
3.2.	Evapotranspiración del cultivo del banano	148
3.3.	Precipitación efectiva (Pef)	152
3.4.	Requerimiento de Riego	154
3.5.	Reducción del rendimiento	158
4.	CONCLUSIONES	163
5.	REFERENCIAS	163
	CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES GENERALES	170

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO 2	Página
Cuadro 1. Estaciones ubicadas dentro de la zona de estudio	19
Cuadro 2. Estaciones de IDEAM ubicadas fuera de zona de estudio.	21
Cuadro 3. Distancia entre estaciones (km).....	21
Cuadro 4. Coeficiente de determinación (R^2) y coeficientes de regresión en RL y RM.	26
 CAPÍTULO 3	 Página
Cuadro 1.Descripción de las estaciones fuera de la zona Norte del eje bananero.	42
Cuadro 2. Descripción de las estaciones dentro de la zona Norte del eje bananero.	42
Cuadro 3. Estimación de la radiación solar y sus estadísticos de verificación en la comparación de los distintos métodos usados para calcularla en la zona Norte de Urabá, Colombia.	51
Cuadro 4. Comparación estadística de los métodos de evapotranspiración de las estaciones fuera de la zona de estudio.....	54
Cuadro 5. Estadísticos del modelo de regresión lineal con intercepto entre los métodos de evapotranspiración y PM de las estaciones fuera de la zona de estudio.	55

Cuadro 6. Comparación estadística de los métodos de evapotranspiración de las estaciones dentro de la zona de estudio.....	59
--	----

Cuadro 7 . Estadísticos del modelo de regresión lineal con intercepto entre los métodos de evapotranspiración y PM de las estaciones dentro de la zona de estudio.	61
---	----

CAPÍTULO 4	Página
------------	--------

Cuadro 1. Clasificación agroclimática método de Thornthwaite.....	79
---	----

Cuadro 2. Coeficientes aAjust y bAjust.....	80
---	----

Cuadro 3. Índices estadísticos para la comparación de los métodos EtoHS1985, EtoHS1985AJUS (después del ajuste de modelo lineal), EtoHargreaves y EtoHargreaves AJUST (después del ajuste de modelo lineal).....	82
--	----

Cuadro 4. Clasificación climática.	89
---	----

CAPÍTULO 5	Página
------------	--------

Cuadro 1. Características generales de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.	101
---	-----

Cuadro 2. Características empleadas en el balance hídrico, criterios de inicio de temporada de crecimiento y periodo crítico para el cultivo.	106
--	-----

Cuadro 3. Probabilidad de inicio de la estación de crecimiento después de los días Julianos indicados.	111
Cuadros 4. Descripción del inicio y fin (días julianos) de los periodos de sequías para duración de 5 días, días críticos para la primera capa y 10 días.	117
Cuadro 5. Inicio y fin (días julianos) de la estación de crecimiento para duración de: 5 días secos, días secos críticos para la primera capa, 10 días secos y días secos críticos para la primera y segunda capa (criterio 3).	128
Cuadros 6. Inicio y fin(días julianos) de la estación de crecimiento para duración de 5 días secos, días secos críticos para la primera capa, 10 días secos y días secos críticos para la primera y segunda capa (criterio 1).	129

CAPÍTULO 6

Página

Cuadro 1. Valores fisiológicos generales para Banano de la base de datos de CROPWAT y Boletín 56.	145
--	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2	Página
Figura 1. Zona de estudio (Norte del eje Bananero) y ubicación de las estaciones de IDEAM.....	18
Figura 2. Ubicación de las estaciones C.I Banacol e IDEAM dentro de la zona de estudio.	20
Figura 3.a) Relación entre estimado y observado WS Temperatura mínima, b) RM y c) RL.....	27
Figura 4.a) Relación entre estimado y observado WS temperatura máxima, b) RM y c) RL.....	28
Figura 5.a) Temperatura máxima media anual y b) temperatura máxima interanual generada de las estaciones de zona de estudio.	29
Figura 6.a) Temperatura mínima media anual y b) temperatura mínima interanual generada de las estaciones de la zona de estudio.	30
Figura 7.a) Precipitación anual y b) media interanual generada de las estaciones de zona de estudio.	31

CAPÍTULO 3

Página

Figura 1. Ubicación de las estaciones fuera y dentro de la zona Norte del eje Bananero del Urabá Antioqueño, Información facilitada IDEAM y Banacol	41
---	----

CAPÍTULO 4

Página

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio y de las estaciones implementadas.	73
Figura 2. Balance hídrico con el método: a) EToHS1985 b) EToHS1985 AJUST c) EtoHargreaves d) EtoHargreavesAJUST estación Salpicón.....	84
Figura 3. Distribución espacial de los déficits en la zona Norte del Urabá Antioqueño con EtoHS1985ADJUST.	85
Figura 4. Distribución espacial de los excesos en la zona Norte del Urabá Antioqueño con EtoHS1985ADJUST.	86
Figura 5. Relación excesos con respecto al método EtoHS1985AJUST a) EtoHagreaves b) EtoHagreavesAJUST	87
Figura 6. Relación déficits con respecto al método EtoHS1985AJUST a) EtoHagreaves b) EtoHagreavesAJUST.	87
Figura 7. Relación entre los excesos y la precipitación.	88
Figura 8. Distribución espacial los climas de la zona Norte del Urabá Antioqueño.	90

Figura 1.a) criterio 1 (Lluvia) b) criterio 2 (Evapotranspiración) c) criterio 3 (Periodo seco).	109
Figura 2. a) Relación entre inicio medio de la estación de crecimiento con precipitación anual criterio 1 b) evapotranspiración y criterio 2 (c) latitud y criterio 2 d) inicio tardío con evapotranspiración (criterio 2)	110
Figura 3. Distribución espacial del IEC para el criterio 3.....	113
Figura 4. Distribución espacial del IEC para el criterio 1.....	114
Figura 5. Distribución espacial del IEC para el criterio 2.....	115
Figura 6. Duración en semanas de periodos de sequía donde sea posible encontrar al menos 5 días secos consecutivos: a) época de lluvias b) época de verano, c) en el año.	121
Figura 7. Duración en semanas de periodos de sequía donde sea posible encontrar al menos los días críticos para la primera capa consecutivos: a) época de lluvias b) época de verano, c) en el año.....	122
Figura 8. Duración en semanas de periodos de sequía donde sea posible encontrar al menos 10 días secos consecutivos en: a) época de lluvias b) época de verano, c) en el año.	123
Figura 9. Longitud en semanas de la estación de crecimiento para el criterio 1.....	125
Figura 10. Longitud en semanas de la estación de crecimiento para el criterio 3.....	126

Figura 1. Ubicación de estación y delimitación de la zona Norte del eje Bananero del Urabá Antioqueño.	142
Figura 2. Evapotranspiración media mensual (mm d^{-1}) para las estaciones de zona Norte del Urabá.	149
Figura 3. a) EV: Evapotranspiración y PP: precipitación media mensual para las siete estaciones 3b) Evapotranspiración y precipitación media mensual en promedio para la zona de Norte del Urabá.....	150
Figura 4. a) Evapotranspiración del cultivo sembrada para época de verano, b) sembrada en época de lluvias (6 de abril).	151
Figura 5. a) Precipitación efectiva (mm) anual para escenario húmedo, b) escenario normal c) seco.	153
Figura 6. a) Requerimiento de riego para el escenario húmedo con siembra en verano, b) con siembra en época de lluvias.....	155
Figura 7. a) Requerimiento de riego para el escenario normal con siembra en verano, b) con siembra en época de lluvias.....	155
Figura 8. a) Requerimiento de riego para el escenario seco con siembra en verano, b) con siembra en época de lluvias.....	156
Figura 9. Requerimiento de riego escenario húmedo, normal, seco en temporada de lluvias y de verano para estación Salpicón.	156

Figura 10. Requerimiento de Riego para año seco (80%) normal (50%) y húmedo (20%) con siembra en verano.....	158
Figura 11. Reducción del rendimiento para el escenario seco (80%) y normal (50%) en condición de secano.	160
Figura 12. Relación entre el requerimiento de riego en escenario normal y % de reducción de producción (verano).....	162
Figura 13. Relación entre el requerimiento de riego en escenario seco y % de reducción de producción (verano).	162

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El clima a nivel mundial es el principal obstáculo para la agricultura y su planificación al depender de las condiciones atmosféricas, las diversas variables climáticas interactúan con el cultivo de formas complejas siendo la precipitación el factor limitante en la mayor parte de los trópicos (Stern y Coe, 1984), esto se complica aún más cuando se presentan cambios en el régimen de la precipitación y temperatura que provocan alteraciones en la producción que repercuten de manera insostenible en la economía del sector agrícola (Giorgis *et al.*, 2006; Molua y Lambi, 2006).

El cultivo de banano para Colombia representan un 3% de las exportaciones totales, 0.4% del PIB de Colombia (Augura, 2013), para la zona de Urabá es la principal actividad económica ya que agrupa aproximadamente 22 mil trabajadores (Espinal *et al.*, 2005). En el 2012 el cultivo de banano ocupó 34800 Ha del área agrícola sembrada del país y alcanzó 1412812 Tm de la producción agrícola total, y con un rendimiento promedio para banano de exportación de 33.7 t ha^{-1} (Agronet, 2013).

La producción del banano en Urabá en los últimos años se ha afectado por: los fenómenos ENSO como consecuencia de los déficit de precipitación y los incrementos de temperatura (Guarín, 2011), presenta una tendencia lineal decreciente la producción por hectárea en función de la evaporación potencial/precipitación (Quiceno, 2004), y en este mismo sentido IDEAM (2010a), IDEAM (2010b), Téllez y Boshell (2001) pronostican que el cambio climático puede alterar los patrones de distribución de las lluvias y posiblemente se traducirá en períodos de sequía más intensos que puede

aumentar aún más su impacto en la producción de banano ya que en condiciones climáticas normales en el periodo seco (finales de diciembre hasta finales de marzo) ocurre una reducción del ratio (racimos/cajas), aunque, de igual manera, existe un impacto de elevadas precipitaciones (abril -noviembre) en la producción y en el embolse (Belloteo), este parece ser menos grave, incluso positivo, posiblemente por la infraestructura de drenaje que poseen las fincas bananeras (Mira, 2003), de igual forma al tener periodos secos marcados Carr (2009) y IGAC (2007b) dentro de las prácticas de manejo propone riego suplementario y aunque en la zona no haya más de 1%, existe una desigual distribución del recurso en el tiempo y en el espacio, ya que las fincas bananeras para el manejo pos-cosecha representan más de 70 % de la demanda del agua subterránea (Corpouraba, 2008).

La zona de Urabá requiere una caracterización del régimen de precipitación que permita identificar las zonas más sensibles y vulnerables como consecuencias del cambio climático (Lana *et al.*, 2008), determinar la probabilidad de ocurrencia de fenómenos adversos y la estimación del grado de afectación de estos en el rendimiento (Hachigonta *et al.*, 2007; Mugalavai *et al.*, 2008) igualmente conocer la oportuna preparación del suelo, selección del cultivo y variedad, determinar las fechas, métodos de siembra, ocurrencia de períodos de sequía perjudiciales para la agricultura, sobre todo los períodos donde las plantas tienen necesidad de agua que tendrá un grave efecto en el rendimiento final (Assad *et al.*, 1993), sin dejar a un lado la orientación de los programas de ordenamiento de conflictos entre uso de agua, dependencias gubernamentales relacionadas con el agro (Rossetti, 2001) y políticas de promociones y

facilitación de adopción de nuevas prácticas por agricultores de banano (Chopin y Blazy, 2013).

Los aspectos de los estudios agroclimáticos para una región más importantes son: determinación de los periodos, regiones y cantidades con deficiencias o excesos de humedad, ocurrencia de eventos atmosféricos extremos, de las sequias que se presentan incluso dentro de la temporada húmeda, determinación de las variaciones espaciales y temporal de la demanda de riego y los requerimientos de cultivos (precipitación y evapotranspiración) (Freitas *et al.*, 2008; Shen *et al.*, 2013), definición de los periodos con existencia de humedad aprovechable y útil para las plantas, componentes de la estación de crecimiento, clasificación del clima (desde el punto de vista agrícola), así como la estimación de los índices de humedad o aridez según sea el caso y variabilidad de los rendimientos.

Los estudios agroclimáticos requieren la utilización de series cronológicas que permitan conocer de los elementos meteorológicos su variabilidad, frecuencia y probabilidad de valores críticos y relacionarlos con las exigencias ambientales de los cultivos, pero estas series presentan datos faltantes que limitan el uso de las mismas por lo tanto se utilizan los métodos de relleno para disminuir el error y no sesgar los resultados.

La evapotranspiración (ET) es necesaria para el cálculo del requerimiento de agua de los cultivos, caracterización climática, programación y gestión de Riego. Allen *et al.* (2006) recomiendan como el único método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia el método de FAO Penman-Monteith (PM), el cual se

compara con métodos alternativos basados en temperatura y procedimientos y recomendaciones con datos climáticos limitados, ya que la elección del método depende de la disponibilidad de los datos meteorológicos, la exactitud y precisión de modelo para una región dada (Liu *et al.*, 2009; Carvalho *et al.*, 2013)

Para definir los periodos donde se presentan excedentes o déficits hídricos, se emplea el método por Thornthwaite (1948) y Thornthwaite y Mather (1955) que ordena los climas de acuerdo al grado de humedad, al tomar en cuenta las necesidades hídricas de los cultivos (evapotranspiración) y los resultados del balance hídrico climático a partir del principio de conservación de la materia, con los que se pueden calcular los índices de humedad y aridez para una zonificación hídrico climática.

La estación de crecimiento se define como el periodo del año durante el cual, las características de distribución de la precipitación son adecuadas para la siembra y desarrollo pleno del cultivo (Arteaga *et al.*, 2006), su estudio es importante en cultivo de banano para establecimiento de nuevas plantaciones y el reajuste de población, y dirigido a identificar su inicio, duración y fin, que permita obtener los más altos rendimientos (Ruíz *et al.*, 2012), para el inicio de la estación de crecimiento existen diferentes criterios basados en umbrales de precipitación (Lasso, 2003; Aviad *et al.*, 2004) y precipitación acumulada (Raes *et al.*, 2004) y modelos de balance hídrico (Mugalavai *et al.*, 2008) y la elección de uno de ellos depende de la precisión que quiera obtenerse en los resultados y de la aplicación futura que se le dará a los mismos.

Mupangwa *et al.* (2011) presentan un umbral para definición de día seco de 5 mm basados en conceptos de evapotranspiración al igual que Lasso (2003), con un modelo simple que considera el fenómeno de persistencia de los periodos secos con la cadena de Markov estacionaria de primer orden, basado en el supuesto de que hay una dependencia de ocurrencia de las precipitaciones diarias con la ocurrencia de precipitación del día anterior (Stern y Coe, 1984).

Diversos factores influyen en el rendimiento de los cultivos, especialmente el agua y cuando ésta no se suministra en cantidades requeridas se afecta el crecimiento y rendimiento, la simulación permite conocer la respuesta del cultivo en condiciones climáticas y edafológicas que no han sido probadas, bajo diferentes escenarios u ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos minimizando todo tipo de recursos que se requieren en la experimentación agrícola, quienes han encontrado buena concordancia entre los resultados simulados y experimentales son Coelho *et al.* (2006), Van Vosselen *et al.* (2005), Stephen *et al.* (1985) y Goenaga y Irizarry (2000).

La presente tesis se divide en seis capítulos, el segundo con relleno de datos faltantes en series climatológica, tercero evaluar una metodología que permita obtener las necesidades hídricas para el cultivo de banano en la zona de Norte de Urabá Antioqueño, el cuarto tiene que ver con la determinación de épocas y regiones con déficit o excesos hídricos, así también con una clasificación climática; el quinto se refiere a la obtención de fechas de inicio de la estación de crecimiento a diferentes niveles de probabilidad y al análisis de la probabilidad de ocurrencia de periodos secos. El sexto capítulo presenta un estudio sobre requerimientos de riego y reducción del rendimiento de pastos mediante

condiciones de secano y riego deficitario; y finalmente en el último capítulo se realizan las conclusiones generales con base en los objetivos planteados, así como algunos comentarios respecto del trabajo de investigación.

OBJETIVO GENERAL

Determinar la zonificación hídrica de la zona Norte del eje bananero en Urabá Antioqueño enfocada al cultivo del banano.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar la confiabilidad de los métodos de relleno: U.S Nacional Weather Service (ASCE, 1996), deductivo racional (Campos, 1998), regresión múltiple y simple (WMO, 1983) y utilizar el mejor para rellenar los datos faltantes de las series precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima de las estaciones de estudio.

Encontrar una metodología confiable que permita obtener la evapotranspiración de referencia basada en datos de temperatura y radiación a escala diaria para el cultivo de banano en la zona de Norte de Urabá Antioqueño a partir de los método propuesto en (Hargreaves y Samani, 1985) y (Allen *et al.*, 2006) y procedimientos recomendados por este último con datos limitados.

Definir regiones y épocas con excesos o déficits hídricos y clasificar el clima de la zona Norte del Urabá Antioqueño de acuerdo al método de Thornthwaite a una escala que permita el planteamiento y desarrollo de proyectos agrícolas.

Estimar el inicio de la estación de crecimiento a diferentes niveles de probabilidad de excedencia y analizar la probabilidad de ocurrencia de periodos secos ambos con varios criterios en el Norte del Urabá Antioqueño.

Conocer mediante simulaciones los requerimientos de riego y la reducción del rendimiento en el cultivo banano en condiciones de secano, en los escenarios de precipitación normal (50 %), seca (80 %) y húmeda (20 %) mediante el modelo CROPWAT en la zona Norte del Urabá Antioqueño.

LITERATURA CITADA

- Agronet (Red de Información y Comunicación Estratégica del Sector Agropecuario). 2013. Anuario estadístico del sector agropecuario 2012 resultados evaluaciones agropecuarias municipales política sectorial y sistemas de información. Ministerio de agricultura y desarrollo rural. Bogotá, Colombia. 294 p.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. N°56. Italia, Roma. 323 p.
- Arteaga, R. R., P. M. A. Vázquez, M. P. M. Coras y M. V. Ángeles. 2006. Componentes de la estación de crecimiento, variación temporal y espacial en Chapingo, México. Ingeniería hidráulica en México 21 (2): 57-68.

- ASCE .American society of civil Engineers. 1996. Hydrology handbook. 2 ed. American Society of Civil Engineers. New York, EE.UU. 769 p.
- Assad, E. D., E. E. Sano, R. d. C. L. H. Masutomoy F. A. M. DA Silva. 1993. Veranicos na região dos cerrados brasileiros frequência e probabilidade de ocorrência. Pesquisa Agropecuaria Brasileira 28: 993-1003.
- Augura (Asociación de Bananeros de Colombia). 2013. Coyuntura bananera 2012. Primera ed. Asociación de Bananeros de Colombia. Colombia, Medellín. 51 p.
- Aviad, Y., H. Kutiel y H. Lavee. 2004. Analysis of beginning, end, and length of the rainy season along a Mediterranean–arid climate transect for geomorphic purposes. Journal of Arid Environments 59 (1): 189-204.
- Campos, D. F. 1998. Procesos del ciclo hidrológico. Facultad de ingeniería. 3 ed. San Luis Potosí, México.
- Carr, M. K. V. 2009. The water relations and irrigation requirements of banana (*Musa spp.*). Experimental agriculture 45 (3): 333-371.
- Coelho, E. F., É. L. da Costa y C. A. da Silva Ledo. 2006. Produtividade e eficiencia de uso de água das bananeiras prata anã e grand naine sob irrigação no terceiro ciclo no Norte de minas Gerais. Irriga 11 (4): 460-468.
- Corpourabá. 2008. Agua, recurso de vida; recurso hídrico jurisdicción Corpourabá. Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Colombia. 31-34 p.
- Chopin, P. y J.-M. Blazy. 2013. Assessment of regional variability in crop yields with spatial autocorrelation: Banana farms and policy implications in Martinique. Agriculture. Ecosystems & Environment 181: 12-21.

- Carvalho A., M. de, L. de Carvalho, R. Vianello, G. Sedyama, M. de Oliveiray A. de Sá Junior. 2013. Geostatistical improvements of evapotranspiration spatial information using satellite land surface and weather stations data. *Theoretical and Applied Climatology* 113 (1-2): 155-174.
- Espinal, C. F., C. H. J. Martínez y G. X. Acevedo. 2005. La cadena del banano en Colombia: Una mirada global de su estructura y dinamica 1991-2005. Ministerio de Agricultura y desarrollo rural observatorio de agrocadenas Colombia. Bogotá, Colombia. 51 p.
- Freitas, W. d. S., M. M. Ramos y S. L. d. Costa. 2008. Demanda de irrigação da cultura da banana na bacia do rio São Francisco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 12 (4): 343-349.
- Giorgis, K., A. Tadegey T. D. 2006. Estimating crop water use and simulating yield reduction for maize sorghum in adama miesso districts using the cropwat model. *CEEPA Discussion Papers* 31: 14.
- Goenaga, R.y H. Irizarry. 2000. Yield and quality of banana irrigated with fractions of class a pan evaporation on an oxisol. *Agronomy Journal* 92 (5): 1008-1012.
- Guarín, G. W. G. 2011. Impacto de la variabilidad climática en la producción de banano en el Urabá Antioqueño. Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Medellín, Colombia. p. 145.
- Hachigonta, S., C. J. C. Reasony M. Tadross. 2007. An analysis of onset date and rainy season duration over Zambia. *Theoretical and Applied Climatology* 91 (1-4): 229-243.

- Hargreaves, G. H. y Z. A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. American Society of Agricultural Engineers (Microfiche collection) (USA) 1 (2): 96–99.
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia). 2010a. Estudio nacional del agua 2010. Instituto de Hidrología Meteorología y estudios Ambientales. Bogotá DC. 409 p.
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia). 2010b. Segundo comunicado nacional ante el convenio de marco de naciones unidad. Instituto de Hidrología Meteorología y estudios Ambientales. Bogotá D.C. 320 p.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2007. Estudio semidetallado de suelos de las áreas potencialmente agrícolas. Urabá departamento de Antioquia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia. 489 p.
- Lana, X., M. D. Martínez, A. Burguenoy C. Serra. 2008. Return period maps of dry spells for Catalonia (Northeastern Spain) based on the Weibull distribution. Hydrological Sciences Journal 53 (1): 48-64.
- Lasso, E. L. D. 2003. Metodología de la distribución agroclimática de las lluvias Meteorología Colombiana 7: 134-134.
- Liu, X., X. Mei, Y. Li, Q. Wang, Y. Zhangy J. R. Porter. 2009. Variation in reference crop evapotranspiration caused by the Ångström–Prescott coefficient: Locally calibrated versus the FAO recommended. Agricultural water management 96 (7): 1137-1145.
- Mira, J. 2003. La planta de banano y la producción bananera de Urabá. Boletín Técnico N° 2 pp 2-5.

- Molua, E. L. y C. M. Lambi. 2006. Assessing the impact of climate on crop water use and crop water productivity: The cropwat analysis of three districts in Cameroon. CEEPA. Buea, Cameroon. 44 p.
- Mugalavai, E. M., E. C. Kipkorir, D. Raes y M. S. Rao. 2008. Analysis of rainfall onset, cessation and length of growing season for western Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology* 148 (6-7): 1123-1135.
- Mupangwa, W., S. Walkery S. Twomlow. 2011. Start, end and dry spells of the growing season in semi-arid southern Zimbabwe. *Journal of Arid Environments* 75 (11): 1097-1104.
- Quiceno, M. M. 2004. Influencias de la precipitación y evaporación sobre la producción de banano en una hacienda del Urabá Antioqueño: Condiciones normales y el niño. Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia: 19.
- Raes, D., A. Sithole, A. Makaraury J. Milford. 2004. Evaluation of first planting dates recommended by criteria currently used in Zimbabwe. *Agricultural and Forest Meteorology* 125 (3-4): 177-185.
- Rossetti, L. A. 2001. Zoneamento agrícola em aplicações de crédito e seguridade rural no Brasil: Aspectos atuariais de política agrícola. *Zoneamento agrícola em aplicações de crédito e seguridade rural no Brasil: aspectos atuariais de política agrícola* 9 (3): 386-399.
- Ruiz, O. Á., R. R. Arteaga, P. M. A. Vázquez, C. R. E. Ontiveros y L. R. López. 2012. Inicio de la estación de crecimiento y periodos secos en Tabasco, México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 3 (2): 85-102.

- Shen, Y., S. Li, Y. Chen, Y. Qiy S. Zhang. 2013. Estimation of regional irrigation water requirement and water supply risk in the arid region of northwestern China 1989–2010. *Agricultural Water Management* 128: 55-64.
- Stephen, C. H. Y., T. W. Sammis y I. P. Wu. 1985. Banana yield as affected by deficit irrigation and pattern of lateral layouts. *Transactions of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers* 28 (2): 507-510.
- Stern, R. D. y R. Coe. 1984. A model fitting analysis of daily rainfall data. *Journal of the Royal Statistical Society. Series* 147 (1): 1-34.
- Téllez, P. y J. Boshell. 2001. Escenarios actuales y posibles efectos del cambio climático sobre los balances hídricos agrícolas y el rendimiento de algunos cultivos en Colombia. *Meteorología Colombiana* 4: 103-105.
- Thornthwaite, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review* 38 (1): 55-94.
- Thornthwaite, C. W. y R. J. Mather. 1955. The water balance. *climatology, laboratory of climatology Drexel Institute of Technology* 8: 1-104.
- Van Vosselen, A., H. Verplanckey E. Van Ranst. 2005. Assessing water consumption of banana: Traditional versus modelling approach. *Agricultural Water Management* 74 (3): 201-218.
- WMO. 1983. Guide to climatological practices. World Meteorological Organization. Ginebra, suiza. 180 p.

CAPÍTULO 2. RELLENO DE SERIES DIARIAS DE PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA MÍNIMA, MÁXIMA DE LA REGIÓN NORTE DEL URABÁ ANTIOQUEÑO

Ana María Toro Trujillo¹, Ramón Arteaga Ramírez¹, Mario Alberto Vázquez Peña¹,
Laura Alicia Ibáñez Castillo¹.

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua Universidad Autónoma
Chapingo. (UACH). Km 38.5 carretera México-Texcoco, código postal. 56230. Estado
de México. namariatoro@hotmail.com, mvazquezd@correo.chapingo.mx,
libacas@gmail.com. Autor para correspondencia: arteagar@correo.chapingo.mx

RESUMEN

Los estudios agroclimáticos requieren la utilización de series cronológicas de las variables climáticas, generalmente presentan datos faltantes limitando su uso, por lo que los métodos de relleno son utilizados. La finalidad de este trabajo fue determinar la confiabilidad de los métodos de relleno: U.S National Weather Service (WS), deductivo racional (RD), la regresión múltiple (RM) y simple (RL) y utilizar el mejor para rellenar los datos de las series de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima del periodo 2006-2009 de las estaciones ubicadas en la zona Norte del eje bananero del Urabá Antioqueño. La estación base fue la estación Pista Indira, y las estaciones Uniban, Turbo, Aeropuerto y Prado Mar fueron utilizadas como vecinas. La estimación del error se hizo con la: Raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RCCME), Coeficiente determinación (R^2), Error Medio Absoluto (MEA), Error Relativo (RE) e Índice de

concordancia de Willmott (d). Los métodos RM y RL presentaron RCCME y MAE similares a los del WS, pero debido a que el R^2 de los primeros fueron menores de 0.8 y el índice (d) para WS fue mayor o similar lo que con llevaría a presentar errores semejantes, por lo anterior se utilizó este último para el relleno de las series.

PALABRAS CLAVES: Deductivo, Regresión, distancia cuadrado.

ABSTRACT

The agro-climatic studies require the use of time series of climate variables have missing data generally limiting its use, so filling methods are used. The purpose of this study was to determine the driveability of the fill methods: U.S. National Weather Service (WS), simple rational deductive (RD), multiple regression (MR) and (RL) and best used to fill the data series of precipitation, maximum temperature, minimum temperature for the period 2006-2009 of the Stations located in the northern axis of Urabá Antioquia banana. The base station was season track Indira, and Uniban, Turbo, Airport and, Prado Mar jurisdiction used as neighboring stations. The error estimate was made with : Square root of the mean squared error (RCCME) , determination coefficient (R^2) , mean absolute error (MEA) , Relative Error (RE) and Willmott index of agreement (d) . The RM and RL methods presented RCCME and MAE similar to the WS, but because the R^2 of the first were under 0.8y index (d) for WS was higher or the like which would lead to similar errors present, so prior to filling the latter series was used

KEY WORDS: Deductive, Regression, Distance square

1. INTRODUCCIÓN

El clima es un recurso natural que afecta la producción agraria, por lo tanto es importante tener conocimiento de los recursos disponibles del ambiente. Las interacciones que se producen en el área del cultivo, debajo de la superficie del suelo, la interfase suelo-aire y la capa límite de la atmósfera, proporciona una guía esencial para las decisiones estratégicas en planificación a largo plazo de los sistemas agrícolas (WMO, 1981). En las estaciones climatológicas es común que los registros estén incompletos situación que se presenta en la zona de estudio pues la información climatológica es escasa, lo que ha limitado realizar estudios agroclimáticos cuyos resultados permitan aumentar la productividad, optimizar los recursos, reducir el riesgo de pérdidas en cosecha, planificación integral de la infraestructura de riego y drenaje y la posible predicción climática. Para realizar un estudio que permita conocer de los elementos meteorológicos su variabilidad, frecuencia y probabilidad de valores críticos y relacionarlos con la exigencias agroclimáticas del cultivo se requiere que los registro históricos no presenten lagunas y falta de coherencia, de esta manera se minimicen los riesgo de resultados erróneos con el fin de contar con datos precisos para evaluar y pronosticar los rendimientos de los cultivos y de la producción, por tanto para los alcances y nivel de detalle del presente trabajo es importante estimar los valores faltantes con el fin de minimizar los errores y no sesgar los resultados (Masseti,2013).

En la guía de prácticas climatológicas de la Organización Meteorológica Mundial WMO (1983) se proponen los siguientes métodos estadísticos para el relleno de datos faltantes: regresión simple, múltiple (Degaetano *et al.*, 1995), razón q y razón-normal q (RN)

(Paulhus y Kohler, 1952). Young (1992) presenta una modificación al método RN, donde la razón-normal ponderada es cambiada por la correlación entre las estaciones (NRWC) pero Yozgatligil *et al.* (2013) reportan que el promedio aritmético simple (SAA) y NRWC son métodos que son idénticos en algunos casos, si las correlaciones de las estaciones de referencia son casi la misma. McCuen (1998) recomienda el método promedio aritmético simple (SAA) propuesto Paulhus y Kohler (1952, cuando el valor anual en cada uno de los datos a promediar difiere por lo menos del 10%, pero según Yozgatligil (2013) presenta estimaciones fiables si la variable no tiene variabilidad espacial y si las estaciones de referencia están altamente correlacionadas. ASCE(1996) propone el método de ponderación de distancia inversa IDW, también conocido como el método U.S National Weather Servic por su implementación en estudios hidrológicos y geográficos al igual que estudios realizados por Hubbard (1994); Sokol y Stekl (1994);Palomino y Martin(1995) y Teegavarapu y Chandramouli (2005). Aparicio (2001) y Campos (1998) indican que este método se puede emplear cuando se basa en registros simultáneos de tres estaciones que se encuentren lo más cerca posible a la estación en estudio. Una ventaja importante de la IDW es que se puede utilizar en cualquier paso de tiempo (Teegavarapu y Chandramouli, 2005). Existen otros métodos estadísticos entre ellos el análisis de componentes principales y el análisis de grupo (Huth y Nemesova, 1995), el método de Kriging (Saborowski y Stock, 1994) y la interpolación óptima. (Bussieres y Hogg ,1989). Wagner *et al.* (2012) sugieren que estos no presentan mejoras con respecto al Inverso de la Distancia (IDW) y que para su empleo requieren una cantidad suficiente de datos para producir un semivariograma fiable. La Regresión (mínimos cuadrados convencionales) (REG) se presenta como un método alternativo para utilizar en este estudio, implementado en las siguientes

investigaciones para estimar los valores de datos faltante de precipitación y temperatura (Wade ,1987; Eischeid *et al.*, 2000 y Hubbard, 2001). Xia *et al.* (1999); Kemp *et al.* (1983); Young (1992); Degaetano *et al.* (1995); Eischeid *et al.* (1995); You *et al.* (2008); Presti (2010) y Kashani y Dinpashoh (2012) manifiestan que la REG es un método superior entre los tradicionales para las variables temperatura mínima, máxima y precipitación en diferentes condiciones climáticas. Campos (1998) proponen el método empírico racional deductivo cuando no se disponen estaciones cercanas y se tiene más de 10 años de registros de la estación de interés. Puertas *et al.* (2011) lo utilizaron en la cuenca de río Cauca, al igual que Guevara (2003). Jiménez *et al.* (2004) emplearon el método regresión lineal con las siguientes condiciones: distancia menor de 25 km, altitud de $\pm 30\text{m}$ y con el mismo tipo de clima, y cuando no se cumplían utilizó el método Racional Deductivo. La finalidad de este trabajo fue determinar la confiabilidad de los métodos de relleno: U.S National Weather Service, deductivo racional, regresión múltiple y simple y utilizar el mejor para rellenar los datos faltantes de las series: precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima de las estaciones dentro de la zona de Estudio.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Localización de zona de estudio

La zona bananera de Urabá, se localiza al Noroccidente del departamento de Antioquia e inicia al Oriente del municipio de Chigorodó, cubriendo los municipios de Carepa, Apartadó y Turbo, limita al Norte con el Río Guadualito en el corregimiento el Tres, al

Sur con la comunal Santillana, al Oriente con el piedemonte de serranía de Abibe y al Occidente con Rio León y el Golfo de Urabá, está entre los $7.53^{\circ}8'55''$ a los $8^{\circ}0'40.0''$ de latitud Norte y $76^{\circ}37'57.25''$ y $76^{\circ}44'22.13''$ de longitud Oeste (Salazar,2012), la zona de estudio está comprendida entre los Ríos Currulao y Apartado (Figura 1).

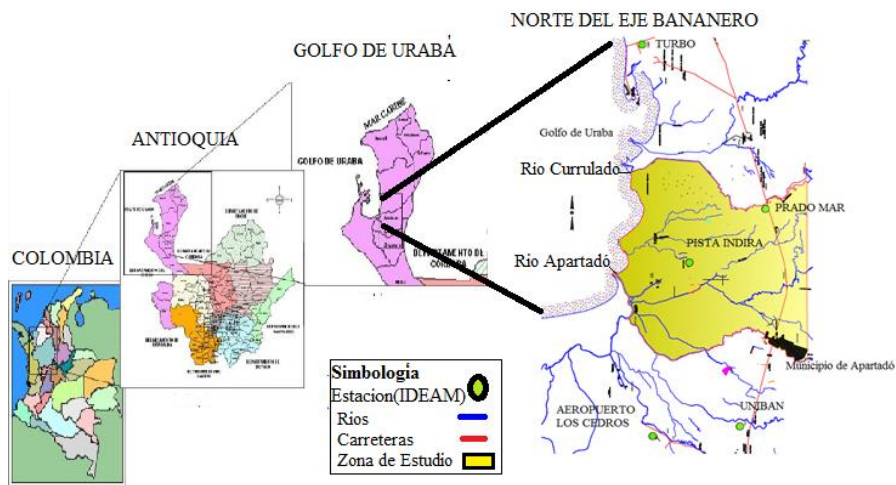


Figura 1. Zona de estudio (Norte del eje Bananero) y ubicación de las estaciones de IDEAM.

2.2. Estaciones meteorológicas utilizadas.

La información contó con datos de las variables temperatura mínima, máxima y precipitación en el Cuadro 1 y en Figura 2 se presentan las estaciones ubicadas dentro de la zona de estudio, la estación Pista Indira presenta un porcentaje de datos perdidos menor a las demás estaciones y su información fue proporcionada por el IDEAM y la pérdida de información de las estaciones cuya información fue proporcionada por Comercializadora Internacional Banacol S.A (C.I Banacol) se debe a los días no laborables de las fincas. En el Cuadro 2 se tiene las características de las estaciones del

IDEAM ubicadas fuera de la zona de estudio (Figura 1) y en comparación con las estaciones de C.I Banacol (Cuadro 1) presentan un porcentaje de perdida menor. Para definir el método que presenta el error más pequeño, a la estación Pista Indira se le eliminó información (31%) según el patrón de perdida de las estaciones de C.I Banacol y para generarla se utilizaron las estaciones que se presenta en el cuadro 2 y que se denominaron vecinas. Una vez que se definió el método que presentó el error más pequeño con este, se rellenaron las series de las estaciones C.I Banacol. En Cuadro 3 se presentan las estaciones vecinas (IDEAM) con una distancia menor a 24 km, localizadas dentro de la misma cuenca , así mismo no presenta un diferencia en altura con respecto al nivel del mar mayor a los 20 m (Cuadro 2).

Cuadro 1. Estaciones ubicadas dentro de la zona de estudio

Estación	Ele (msnm)	Lat. (Grados)	Log (Grados)	Precipitación		Tmin y Tmax	
				Periodo	% Datos perdidos	Periodo	% Datos perdidos
Doña Ángela*	9	7,89	-76,7	2004-2011	22%	2004-2011	23%
Magdalena*	11	7,98	76,69	2004-2012	25%	2004-2012	25%
Manzano*	26	7,96	-76,64	2004-2012	22%	2004-2012	22%
Salpicón*	22	7,98	-76,66	2004-2012	27%	2004-2012	28%
San Jacinto*	19	7,91	-76,66	2004-2012	28%	2004-2012	28%
Tapartó*	11	7,95	-76,68	2004-2012	27%	2004-2012	26%
Tarena*	10	7,93	-76,69	2004-2012	24%	2004-2012	24%
Pista Indira+	23	7,95	-76,7	2006-2009	2%	2004-2009	3%

Latitud=Lat; Longitud=Log, Fuente que proporciona la información C.I Banacol=* e

IDEAM=+; Tmin = temperatura Mínima y Temperatura máxima=Tmax.0

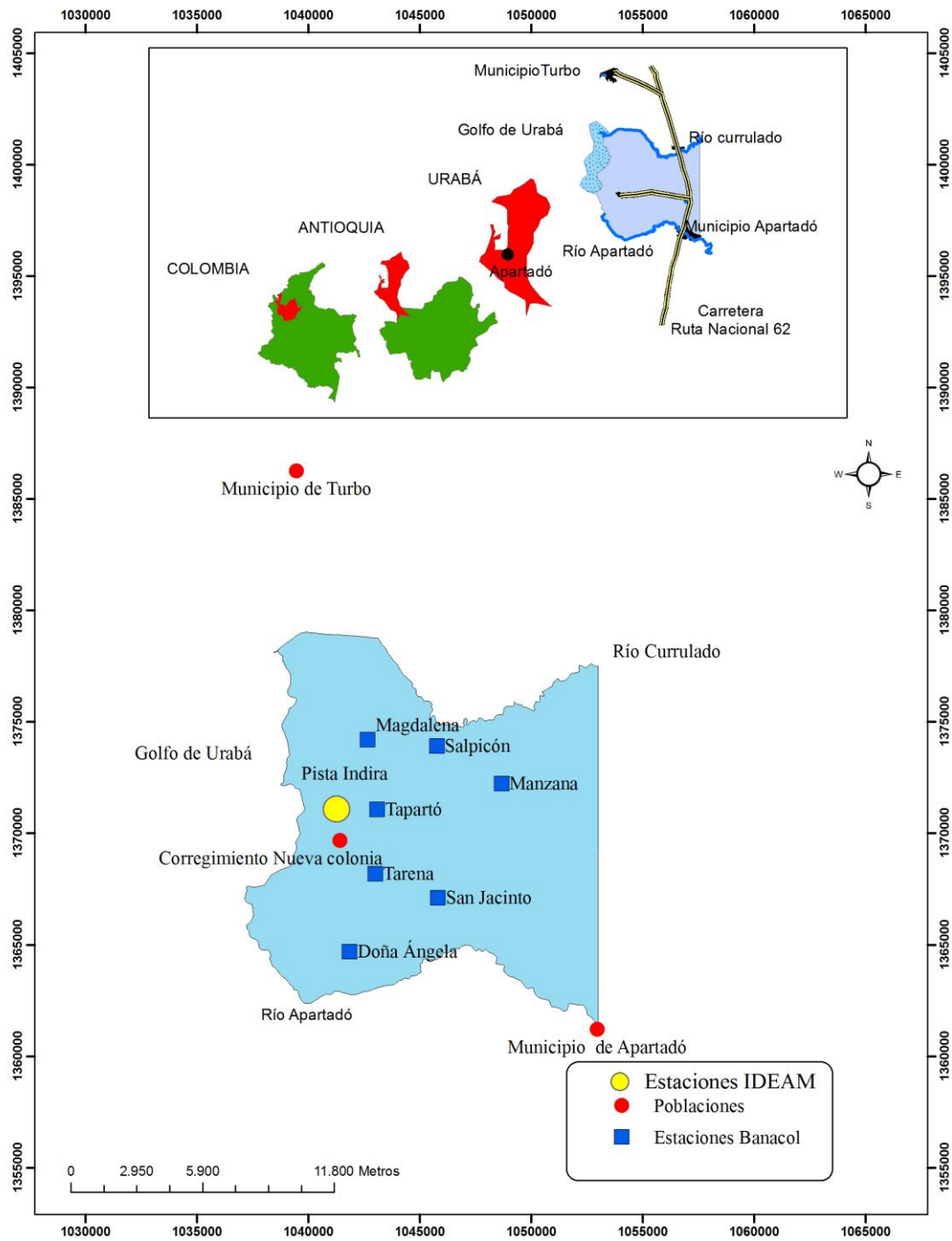


Figura 2. Ubicación de las estaciones C.I Banacol e IDEAM dentro de la zona de estudio.

Cuadro 2. Estaciones de IDEAM ubicadas fuera de zona de estudio.

Estación	Ele (msnm)	Lat (grados)	Log (grados)	Precipitación		Tmin y Tmax	T° Mín	T° máx
				Periodo	% datos perdidos	Periodo	% datos perdidos	% datos perdidos
Uniban	23	7.49	76.39	1985-2012	1.52%	2006-2012	23.63%	2.47%
Aeropuerto Cedros	19	7.49	76.43		0.55%	2006-2012	0.07%	0.00%
Turbo	37	8.05	76.42		13.64%	2006-2012	42.88%	43.08%
Prado mar	38	7.59	76.38		2.08%	-	-	-

Elevación=Ele; Latitud=Lat; Longitud=Log, Tmin = temperatura Mínima y Temperatura máxima=Tmax en °C

Cuadro 3. Distancia entre estaciones (km).

Estación zona Estudio	Uniban	Aeropuerto	Prado mar	Turbo	Pista Indira
Pista Indira	14,079	14,609	7,699	17,375	
Magdalena	17,626	18,360	5,988	13,749	3,773
Tapartó	14,533	154,783	6,617	16,843	1,085
Salpicón	16,917	18,898	2,988	15,041	4,896
Tarena	11,628	12,502	8,804	19,809	2,449
Doña Ángela	8,954	8,898	12,237	23,048	5,793
San Jacinto	10,120	12,756	8,263	21,441	4,863
Manzana	15,334	18,439	2,679	17,701	6,283

2.3. Método

Se utilizaron los métodos: U.S NATIONAL WEATHER SERVICE (WS) acorde a la metodología encontrada en Chow *et al.* (1994), Racional deductivo (RD) propuesto por Campos (1998) y Regresión lineal (RL) y múltiple (RM) sugeridos en (WMO, 1983).

2.4. Estimación del error

Se empleó la Raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RCCME) (Rivas y Carmona ,2010 y Teegavarapu y Chandramouli ,2005), Error Medio Absoluto (MEA) (Teegavarapu y Chandramouli, 2005 y Kashani y Dinpashoh, 2012), el error relativo (RE), Coeficiente determinación (R^2) y índice de concordancia de Willmott (d) (Rivas y Carmona ,2010 y Willmott ,1981). El modelo perfecto es cuando $R^2=1$ y $MAE = RCCME = RE = 0$ y el mejor modelo debe tender a los límites anteriores, siendo excelente cuando $d \geq 0.95$, $RE \leq 0.20$ y $R^2 > 0.8$ (Caí *et al.*, 2007 y Pereira, 2004).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la variable precipitación se obtuvieron valores de RCCME de: 16.57, 19.16, 14.08 ,15.31 mm para los métodos WS, RD, RM y RL respectivamente, con errores similares a los encontrados por Kashani y Dinpashoh (2012) y superiores a los encontrados por Teegavarapu y Chandramouli, (2005) y Di Piazza (2011), el método RD presentó el valor más alto, el RCCME para WS, RM y RL son similar, ya que no tienen una diferencia mayor 2.48 mm. Los valores MAE son de: 8 ,9.8, 8.5 y 9.2 mm para WS, RD,

RM y RL respectivamente, con el menor valor para WS. Los valores de MAE son menores a los reportados en Kashani y Dinpashoh (2012) y superiores a los encontrados por Teegavarapu y Chandramouli (2005), Di Piazza (2011) y Xia *et al.* (1999). El estadístico RE presentan valores 2.4, 2.8, 2.0 y 2.2 para los métodos WS, RD, RM y RL respectivamente, no están por debajo de 0.2 principalmente porque la variable precipitación es una variable discreta con fuerte frecuencias de valores cercanos a ceros, por ende presenta un promedio bajo. El método RD presentó en valor más alto de RE mientras que WS, RM y RL son similares no tienen una diferencia mayor 0.4. El índice (d) tuvo valores de 0.5, 0.4, 0.3 y 0.1 para los métodos WS, RD, RM y RL respectivamente, que no están por encima de 0.95 como lo recomiendan (Caí *et al.*, 2007; Pereira, 2004), sin embargo se distingue el método WS por presentar el mayor valor del índice (d), por lo anterior y por tener los estadísticos RCCME, MAE y RE similares a RL y RM el método WS es que mejor estima el dato observado. Adicional You *et al.* (2008) proponen que el método WS puede proporcionar mejores estimaciones cuando la elevación de la estación de interés está cerca de la elevación de las estaciones utilizadas para rellenar el dato faltante, situación que en este caso se presenta ya que no hay diferencias mayores a 22 m entre ellas. Así mismo los siguientes autores: Teegavarapu y Chandramouli (2005); Wade, 1987; Eischeid *et al.* (1995); Eischeid *et al.* (2000) y Hubbard *et al.* (2005) reportan mejores resultados para WS.

En la variable temperatura mínima se obtuvieron valores de RCCME de: 0.88, 2.04, 0.71 y 0.81°C para los métodos WS, RD, RM y RL respectivamente, presentado el mayor valor el método RD, los demás no tienen una diferencia mayor de 0.17°C siendo similares los valores de RCCME para los métodos WS, RD y RM. El estadístico MAE presentó

valores de 0.7, 1.5, 0.6 y 0.7 ° c para los métodos WS, RD, RM y RL respetivamente, son menores a los reportado por Kemp *et al.* (1983) y el mayor valor de MAE lo tiene el método RD, los demás no tienen diferencia mayor de 0.1°C siendo similares los valores MAE para los métodos WS, RD y RM. El estadístico RE para los métodos WS, RD, RM y RL presentó valores de 0.04, 0.09, 0.03 y 0.04 están todos por debajo 0.2 acorde los recomendado por Caí *et al.* (2007) y Pereira (2004), los valores de RE para el WS, RM y RL son similares presentan diferencias menores 0.01. El Índice (d) con valores de 0.7, 0.4, 0.7 y 0.6 para WS, RD, RM y RL respetivamente, aunque no representa valores mayores a 0.95, los valores (d) son similares para WS y RM y al tener los estadísticos RCCME, RE y MAE similares y los valores más alto de (d) presentan estimaciones con menor grado de error, por lo tanto se pudieran utilizar cualquiera de los dos métodos.

En la variable temperatura máxima los resultados para RCCME fueron de: 1.14, 3.18, 1.27 y 1.12°C para WS, RD, RM y RL. RD presentó el mayor valor mientras los demás no tienen una diferencia mayor de 0.16°C por lo tanto son similares los valores de RCCME para los métodos WS, RD y RM. El estadístico MAE con valores 0.9, 2.4, 0.8 y 0.9 ° c para los métodos WS, RD, RM y RL respetivamente son menores a los reportados por Kemp *et al.* (1983) y el menor valor es para RM siendo similar a WS y RL no tienen una diferencia mayor a 0.1°C. El estadístico RE para WS, RD, RM y RL fueron 0.04, 0.1, 0.04 y 0.04 y están por debajo 0.2 acorde a recomendado por Caí *et al.* (2007) y Pereira (2004), los valores de RE son similares entre los métodos WS, RM y RL. El Índice (d) presentó valores de 0.8, 0.4, 0.8 y 0.8 para WS, RD, RM y RL respetivamente aunque no representa valores mayores a 0.95, los métodos WS, RM, RL

presentaron las estimaciones con el menor grado de error al tener valores más altos, por lo tanto se podría utilizar cualquiera de los tres métodos ya que el índice (d) es similar entre ellos y los demás estadísticos también. Al comparar los métodos RM y RL en todas las variables el método RM presentó mejores estadísticos que RL situación que también fue objeto de algunos estudios y que compararon el rendimiento de estos métodos y en la mayoría de los casos la regresión basada en dos o más estaciones vecinas resultó ser la más eficiente (Eischeid *et al.*, 1995; Xia *et al.*, 1999; You *et al.*, 2008 y Kashani y Dinpashoh, 2012).

En el Cuadro 4 se presentan los valores del coeficiente de determinación que varían desde 0.14-0.56. La RM tiene un coeficiente de determinación para todas las variables mayor que el método RL situación también encontrada por Alfaro *et al.* (2000) quienes reporta que el método RM tiene mejoras significativas con respecto aquellos métodos con base en la información de una sola estación vecina (RL). Sin embargo Campos (2005) recomienda no utilizar los métodos de regresión si los coeficientes de determinación no presentan valores mayores a 0.8, debido a que en este estudio, son bajos se recomienda mejor utilizar WS que presentó estadísticos similares.

Cuadro 4. Coeficiente de determinación (R^2) y coeficientes de regresión en RL y RM.

Variable	Método	R^2
Temperatura Mínima	RM	0.3224
	RL	0.2133
Temperatura Máxima	RM	0.5597
	RL	0.3899
Precipitación	RM	0.1391
	RL	0.1391

Para la temperatura mínima en la Figura 3 se observa que el valor estimado y observado por el método WS presenta un valor de la pendiente más cercano a la unidad y el intercepto a cero por lo que se aproxima a la recta 1:1, de esta manera reafirma que la estimación se acerca más al valor observado, mientras que para la temperatura máxima se obtuvo el mayor acercamiento a la recta 1:1 por los métodos RM y WS ya que el valor de la pendiente se aproxima a la unidad y el intercepto a cero (Figura 4). En la variable temperatura al relacionar los valores estimados con los observados a través de una regresión se encontraron bajos coeficientes de determinación para el método RD por lo tanto no presenta una relación significativa, igualmente para la precipitación en todos los métodos se presentan valores bajos de coeficientes de determinación por ende no muestra una relación significativa. En la regresión entre los valores observado y estimado de los métodos RM y WS presentan un coeficiente de determinación mayor que los métodos RL y DR en las variables evaluadas, aunque los valores de R^2 presentan valores inferiores a los reportados por Caí *et al.* (2007) como para considerar un buen ajuste del modelo, el coeficiente permite distinguir que existe dependencia entre los

parámetros de ponderación o pesos y la distancia de la estaciones (WS), no siendo este un parámetro perfecto que por sí solo pueda predecir el comportamiento de las variables de estudio (Teegavarapu y Chandramouli, 2005), pero si mucho mejor que utilizar un modelo que solo dependa la información climática disponible (RM).

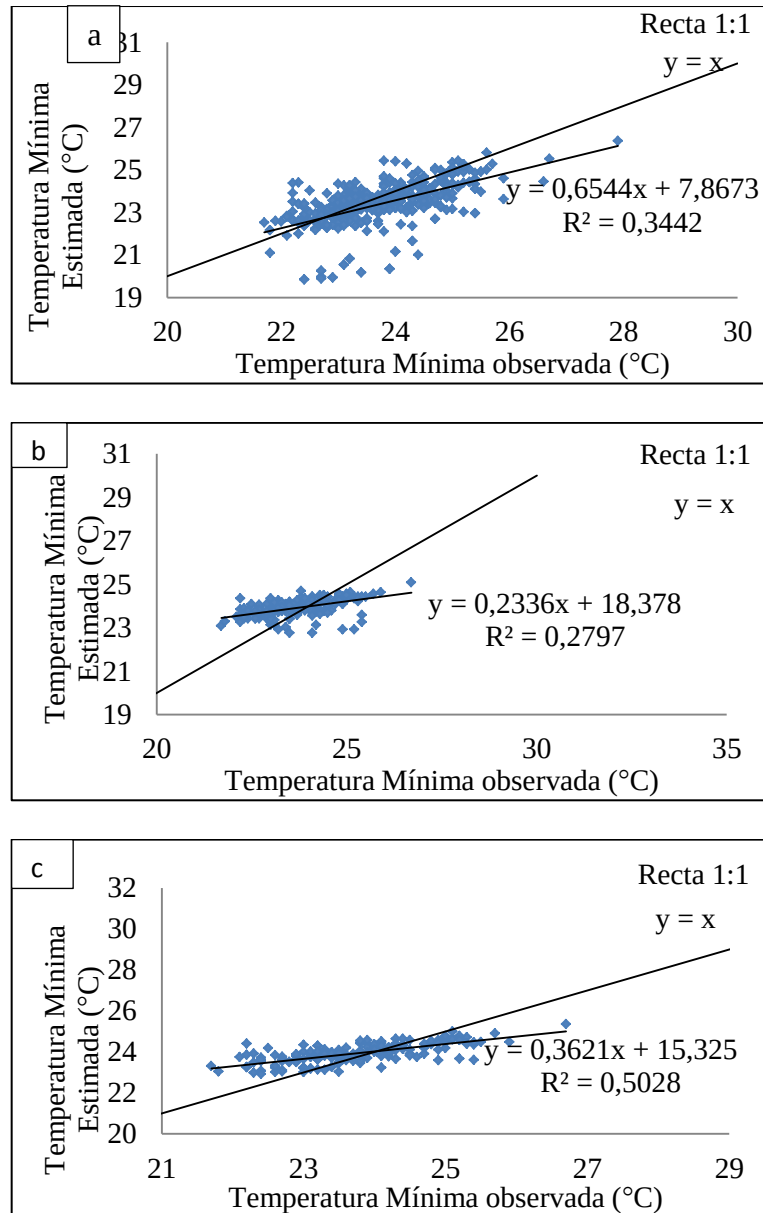


Figura 3.a) Relación entre estimado y observado WS Temperatura mínima, b) RM y c)

RL.

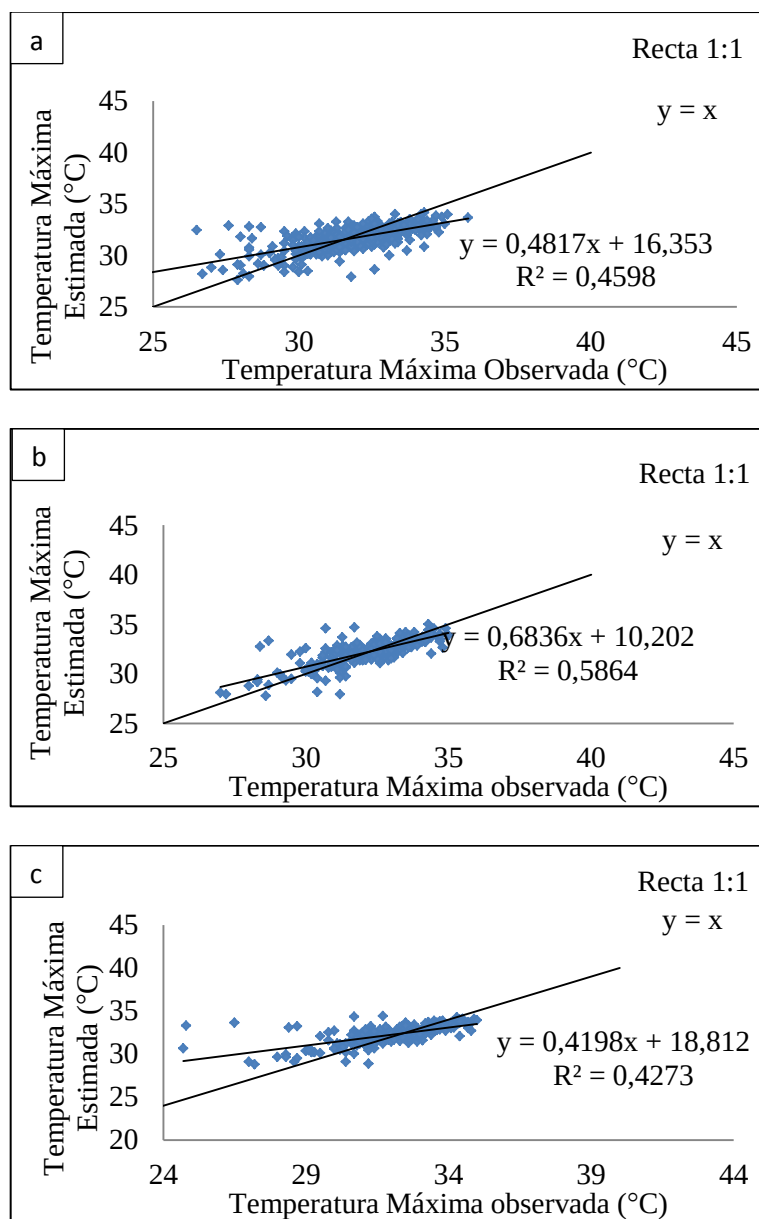


Figura 4.a) Relación entre estimado y observado WS temperatura máxima, b) RM y c) RL.

En el Figura 5a) se presenta la temperatura máxima generada con el WS para las estaciones dentro la zona de estudio, presentan un comportamiento similar entre sí, con excepción de la estación Doña Ángela, quien es la más cercana a la estación Aeropuerto (estación vecina) y que, para el año 2009 presentó valores más bajos de temperatura

máxima lo que hace sesgar el comportamiento de la estación Doña Ángela del comportamiento presentado por las otras estaciones para ese año 2009. En la Figura 5b y 6b se observa que los valores generado por el método WS para temperatura máxima y mínima están por encima a los valores de las estaciones utilizadas como vecinas, situación que no pasa con la variable precipitación (Figura 7b) en donde las estimaciones se encuentra dentro del rango de oscilación de las estaciones vecinas, posiblemente porque la temperatura es una variable más localizadas y expuestas a la cercanía de la serranía Abibe (You *et al.*, 2008).

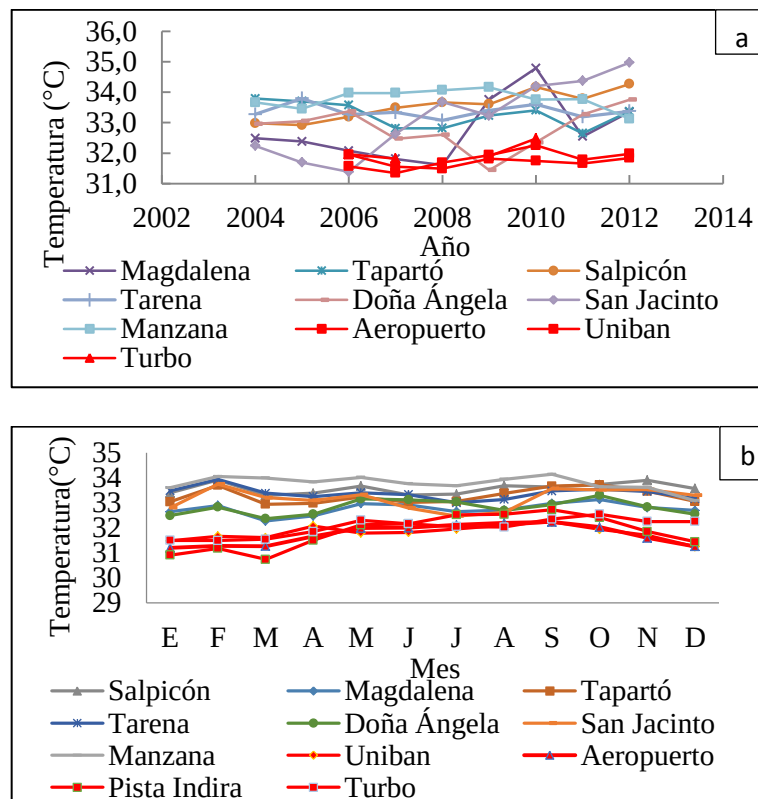


Figura 5.a) Temperatura máxima media anual y b) temperatura máxima interanual generada de las estaciones de zona de estudio.

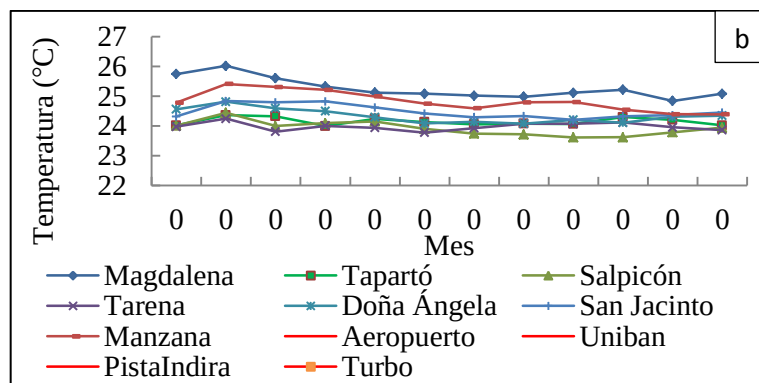
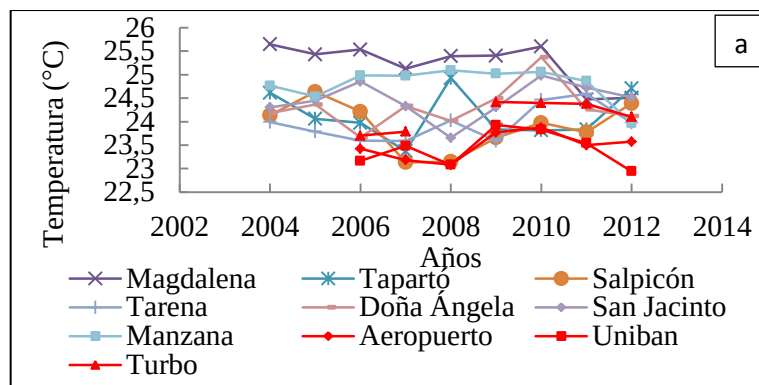
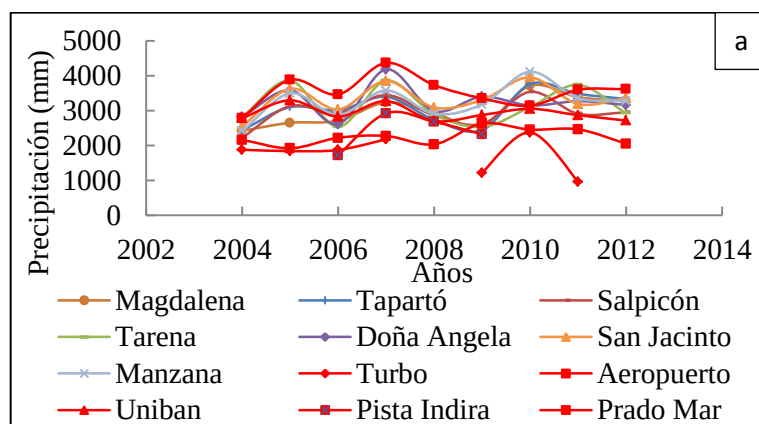


Figura 6.a) Temperatura mínima media anual y b) temperatura mínima interanual generada de las estaciones de la zona de estudio.



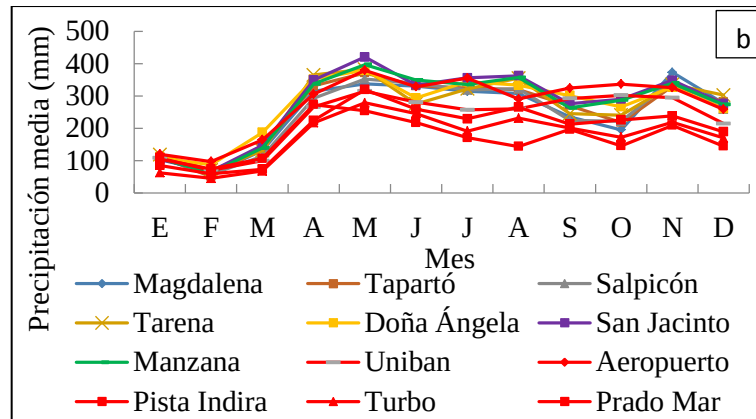


Figura 7.a) Precipitación anual y b) media interanual generada de las estaciones de zona de estudio.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se utilizaron cuatro métodos para calcular datos faltantes, en series diarias de precipitación, temperatura mínima y máxima, para determinar su confiabilidad se evaluaron para la estación Pista Indira para el periodo 2006-2009, donde se contaba con registros continuos, para posteriormente aplicarlo a las siete estaciones de la zona de estudio con valores faltantes. Las variable precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima en los métodos Regresión Múltiple, U.S. National Weather Service y Regresión Lineal presentaron estadísticos de: RE (Erro Relativo), Raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RCCME) y MAE (Error medio Absoluto) similares, pero el valor mayor valor del índice (d) para la precipitación se tuvo con el método U.S. National Weather Service, para la temperatura mínima con los métodos U.S. National Weather Service y Regresión Múltiple fue similar y para la temperatura máxima

Regresión Múltiple, U.S. National Weather Service y Regresión Lineal tuvieron un comportamiento semejante, por ende su utilización con llevaría a determinar errores similares, pero se utilizó el método U.S. National Weather Service, ya que los métodos Regresión Lineal y Múltiple presentaron bajos coeficientes de determinación. Al realizar la regresión lineal entre el valor estimado y observado para todas las variables el método U.S. National Weather Service y Regresión Múltiple presentaron un valor alto en el coeficiente de determinación y se acercaron más a la recta 1:1.

5. LITERATURA CITADA

Alfaro, R y Pacheco, R. 2000. Aplicación de algunos métodos de relleno en series anuales de lluvia de diferentes regiones de Costa Rica. Instituto Meteorológico National, Tópicos meteorológicos oceanográficos. 7(1):1-20.

Aparicio, F.J. 2001. Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa. 10. DF, México. 304p.

ASCE. 1996. Hydrology Handbook. American Society of Civil Engineers. 2ª. New York, EE.UU. 769p.

Bussieres, N y Hogg W.1989.The objective analysis of daily rainfall by distance weighting schemes on a mesoscale grid. Atmosphere Ocean. 27:521–541.

Campos, D.F.1998. Procesos del ciclo hidrológico. Facultad de ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 3ª. San Luis Potosí, México. 500p.

Campos, D.F. 2005. Agroclimatología cuantitativa de cultivos. Trillas .2ª.D.F, México. 320 p

Caí, J; Liu, Y; Lei, T y Santos P .L .2007. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. *Agricultural and Forest Meteorology*. 145(1):22-35.

Chow, V.T; Maidment, D. R. y Mays, L.W. 1996. *Hidrología aplicada*. McGraw Hill.1ª. Bogotá, Colombia. 583 p.

Degaetano, A.T; Eggleston, K.L y Knapp, W.W.1995.A method to estimate missing maximum and minimum temperature observations. *Journal of Applied Meteorology*. 34(2):371–380.

Di Piazza, A.; Conti, F. L.; Noto, L. V.; Viola, F.; y La Loggia, G.2011.Comparative analysis of different techniques for spatial interpolation of rainfall data to create a serially complete monthly time series of precipitation for Sicily, Italy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 13(3): 396-408.

Eischeid, J.K; Pasteris, P.A; Diaz H.F; Plantico M.S y Lott N.J. 2000. Creating a serially complete, national daily time series of temperature and precipitation for the Western United States. *Journal of Applied Meteorology*.3 9(9): 1580–1591.

Eischeid, J.K; Bruse Baker, C; Karl, T.R y Diaz, H.F .1995. The quality control of long-term climatological data using objective data analysis. *Journal of Applied Meteorology*. 34(12):278–279.

Guevara, J.M. 2003. *Métodos de estimación y ajuste de datos climáticos*. Imprenta Universidad Central de Venezuela, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales. Dirección de Hidrología y Meteorología. 2ª. Mérida, Venezuela. 74p.

Hubbard, K.G y You J. 2005. Sensitivity analysis of quality assurance using spatial regression approach—A case Study of the maximum/ minimum air temperature. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 22 (10): 1520–1530.

Hubbard, K.G. 2001. Multiple station quality control procedures. Automated Weather Stations for Applications in Agriculture and Water Resources Management, AGM-3 WMO./TD No. 1074. High Plains Regional Climate Center. Lincoln, EE.UU. 248p.

Hubbard, K.G.1994. Spatial variability of daily weather variables in the high plains of the USA. *Agricultural and Forest Meteorology*. 68(1): 29–41.

Huth, R y Nemesova, I.1995. Estimation of missing daily temperature: can a weather categorization improve its accuracy. *Journal of Applied Meteorology*. 34:1901–1916.

Jiménez, C.A; Vargas, T.V; Salinas, C.W; Aguirre, B.M y Cabrera, D.R. 2004. Aptitud agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el Sur de Tamaulipas. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía. Universidad nacional Autónoma Metropolitana*. (53) 53: 58-74.

Kashani, M. H y Dinpashoh, Y. 2012. Evaluation of efficiency of different estimation methods for missing climatological data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 26(1): 59-71.

Kemp, W.P; Burnell, D.G; Everson, D.O y Thomson, A.J.1983. Estimating missing daily maximum and minimum temperature. *Journal of climate and applied meteorology*. 22(9): 1587-1593.

Massetti, L. 2013. Analysis and estimation of the effects of missing values on the calculation of monthly temperature indices. *Theoretical and Applied Climatology*. 1-9.

McCuen, R.H. 1998. *Hydrologic Analysis and Design*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, EE.UU. 814 p.

- Paulhus, L.H. y Kohler, M.A. 1952. Interpolation of missing precipitation records. *Monthly Weather Review*. 80:129–133.
- Pereira, A.R. 2004. The Priestley-Taylor parameter and the decoupling factor for reference evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*. 125(3): 305-313.
- Presti, R.L.; Barca, E. y Passarella, G. 2010. A methodology for treating missing data applied to daily rainfall data in the Candelaro River Basin (Italy). *Environmental Monitoring and Assessment*. 160(1-4):1–22.
- Puertas, O.O.; Carvajal, E.Y. y Quintero M. 2011. Estudio de tendencias de la precipitación mensual en la cuenca alta-media del río Cauca, Colombia. *Dyna*. 78(169):112-120.
- Rivas, R. y Carmona, F. 2010. La ecuación de Priestley-Taylor aplicada a nivel de píxel: una alternativa para estudios detallados de cuencas. *Boletín Geológico y Minero*. 121 (4): 401-412.
- Saborowski, J. y Stock, R. 1994. Regionalization of precipitation data in the Harz Mountains. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*. 165:117–122.
- Salazar, C.A. 2012. Los sistemas de Riego en cultivo del banano: aplicado a las zonas bananeras de Colombia. Universidad Nacional de Colombia. 1ª. Medellín, Colombia. 591 p.
- Sokol, Z. y Stekl, J. 1994. 3-D mesoscale objective analysis of selected elements from SYNOP and SYRED reports. *Meteorologische Zeitschrift*. 3(4): 242-246.
- Teegavarapu, R. S. y Chandramouli, V. 2005. Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. *Journal Hydrology*. 312 (1–4):191–206.

- Wade, C.G. 1987. A quality control program for surface mesometeorological data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 4(3): 435–453.
- Wagner, D.P; Fiener, P; Wilken, F ;Kumar S y Schneider K. 2012. Comparison and evaluation of spatial interpolation schemes for daily rainfall in data scarce regions. *Journal of Hydrology*. 464–465:388–400.
- Willmott, C.J.1981. On the validation of models. *Physical geography*. 2(2); 184-194.
- Xia, Y; Fabian, P; Stohl, A; Winterhalter, M .1999. Forest climatology: Estimation of missing values for Bavaria, Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*. 96(1): 131–144.
- WMO.1981. Guide to agricultural meteorological practices. World Meteorological Organization No134. Geneva, Switzerland. 799p.
- WMO. 1983. Guide to climatological practices. World Meteorological Organization No100. Ginebra, suiza.180p.
- You, J.S; Hubbard K.G y Goddard S. 2008. Comparison of methods for spatially estimating station temperatures in a quality control system. *International journal of climatology*. 28(6): 777–787.
- Young, K.C .1992. A three-way model for interpolating monthly precipitation values. *Monthly Weather Review*. 120 (11):2561–2569.
- Yozgatligil, C; Aslan, S; Iyigun, C y Batmaz, I .2013. Comparison of missing value imputation methods in time series: the case of Turkish meteorological data. *Theoretical and Applied Climatology*. 112(1-2):143–167.

CAPÍTULO 3. MODELOS PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE
REFERENCIA EN LA ZONA NORTE BANANERA DEL URABÁ
ANTIOQUEÑO (COLOMBIA)
**ESTIMATION MODELS FOR THE REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION
VALUE IN THE NORTHERN BANANA ZONE OF ANTIOQUIAN URABA
(COLOMBIA)**

Ana María Toro Trujillo, Ramón Arteaga-Ramírez, Mario Alberto Vázquez-Peña, Laura
Alicia Ibáñez Castillo

RESUMEN

La estimación adecuada de la evapotranspiración (ET) es necesaria para el cálculo del requerimiento de agua de los cultivos. La función usada por FAO Penman-Monteith (PM) es el método estándar, pero utiliza variables no disponibles en la zona de estudio, por lo tanto se requiere una metodología que permita calcular las necesidades hídricas para el cultivo de banano (*Musa paradisiaca*) en la zona Norte de Urabá Antioqueño, Colombia. El objetivo fue evaluar la confiabilidad para el cálculo de la evapotranspiración, de los métodos, Hargreaves y radiación (Eto-PM-Samani) en Allen *et al.* (2006) y Hargreaves y Samani (1985) con respecto a la estimación del método de PM. También se generaron los coeficientes de Angstrom-Prescott (coeficientes de las estaciones), para estimar la radiación solar y se determinó el error producido por estos, y con los coeficientes de Allen *et al.* (2006), Frere *et al.* (1978) y Frere y Popov (1974). Se evaluó el error que tiene la estimación de la radiación solar por el método Samani (2000) e IDEAM (2005). La estimación de la radiación solar con los coeficientes de las

estaciones *ap* y *bp* presentó los valores de la raíz del error cuadrático medio (RSME) y el error relativo (RE) más bajos, seguido del método Frere1978 y no se recomienda usar el método Samani (2000). La mejor estimación de la evapotranspiración la obtuvo EtoHS1985, ya que exceptuando pista Indira presentó los valores más bajos de RSME y RE y los valores más altos de R^2 , mientras los métodos EtoHargreaves y Eto-PM-Samani presentan RSME y RE similares y son mejores para el primero y al aplicar el modelo lineal entre Eto PM y EtoHS1985 se redujo el error y tiene una $R^2 > 0.8$.

Palabras clave: Angstrom-Prescott, evapotranspiración, Hargreaves, Penman- Monteith

1. INTRODUCCIÓN

La estimación adecuada de la evapotranspiración (ET) es necesaria para el cálculo del requerimiento de agua de los cultivos, la caracterización climática, la programación y la gestión de los recursos del agua (Ramírez *et al.*, 2011). La evapotranspiración puede estimarse con modelos empíricos, semiempíricos y físico - matemáticos, y con variables meteorológicas. La elección de un método depende de la disponibilidad de los datos meteorológicos, así como de la exactitud y la precisión del modelo para una región dada (de Carvalho *et al.*, 2013). Allen *et al.* (2006), recomendaron como el único método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia a FAO Penman-Monteith (PM). Además se han desarrollado procedimientos y recomendaciones para la utilización de PM con datos climáticos limitados, creando una base consistente y transparente para una estandarización universal de los cálculos de los requerimientos de agua de los cultivo. Tabari *et al.* (2012), plantearon que Penman – Monteith presenta dos ventajas sobre otras ecuaciones: 1) es usado en el mundo sin

calibraciones locales debido a sus principios físicos; 2) es una ecuación bien documentada y probada con varios datos de lisímetros (Gocic y Trajkovic, 2010).

Existe una limitación potencial para la estimación de ET con el modelo de PM, ya que en su gran mayoría las estaciones no miden la radiación solar (R_s), por lo cual se usan relaciones empíricas como Angstrom-Prescott como en Yoder *et al.* (2005). En Colombia existen estudios con enfoques diferentes a PM (Chiappe, 1998): la ecuación Cenicafe desarrollada por Jaramillo (2007), y los estudios hidrometeorológico realizados por Poveda *et al.* (2007); en la zona cafetera de Colombia se compararon PM y el Tanque tipo A (Jaramillo (2007); Giraldo *et al.* (2008) compararon el modelo de PM con Turc, Linacre, Hargreaves, Jensen-Haise y García y López modificada por Jaramillo; Barco *et al.* (2000) estimaron a escala macro la evaporación en Colombia, con varios métodos como el Turc, Morton, Penman, Holdridge y Budyko.

En los estudios de estimación de la evapotranspiración para la zona Bananera de Urabá, Salazar (2012) encontró valores con PM de $1242.5 \text{ mm año}^{-1}$ para la estación Tulenapa, Guarín (2011) con los balances hidrológicos y el uso del software Budget (K.U. Leuven University) obtuvo $1136.9 \text{ mm año}^{-1}$ para años secos, y 1345 mm año^{-1} para húmedos y normales, mientras IGAC (2007a) presentó valores anuales de 1110 mm para años secos, y de 1980 mm en años húmedos y normales con Thornthwaite (ET). Los estudios mencionados en la zona de Urabá no permiten determinar la variación espacial y temporal de la evapotranspiración debido a limitaciones en la obtención de las variables meteorológicas para calcular el modelo PM, lo que limita la gestión, el diseño y la planificación de los recursos hídricos. Por lo tanto se requiere una metodología que permita obtener las necesidades hídricas para el cultivo del banano en la zona Norte de Urabá Antioqueño.

Así, en el presente trabajo se evaluó la confiabilidad de la estimación de la evapotranspiración con respecto al método PM de los métodos: Hargreaves-Samani (Hargreaves y Samani, 1985), radiación (Samani) y Hargreaves en Allen *et al.* (2006). También se generaron los coeficientes de la ecuación Angstrom-Prescott para estimar la radiación solar y se determinó el error producido por estos y además por los coeficientes de Allen *et al.* (2006), Frere *et al.* (1978) y Frere y Popov (1974), y se evaluó el error obtenido en la estimación de la radiación solar por los métodos Samani (2000) e IDEAM (2005).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Localización del área de estudio

El estudio se realizó en la zona Norte eje bananero del Urabá Antioqueño, está entre 7° 43.779' a 8° 01.035' N y entre 76° 36.677 y 76° 44.802 O, y entre los ríos Currulao y Apartadó; la precipitación promedio multianual fluctúa entre 1600 -3600 mm, temperatura media multianual 22.8-28.5°C, evapotranspiración potencial (ETP) entre 1100 y 2150 mm (IGAC, 2007b).

2.2. Información climatológica

Se recopiló información de variables climáticas de las estaciones meteorológicas ubicadas dentro y cerca de la zona de estudio, facilitada por las entidades IDEAM, C.I Banacol S.A, se contó con ocho estaciones dentro de la zona de estudio con datos diarios

de temperatura mínima y máxima y una con radiación solar visible, fuera de la zona se tienen tres estaciones con temperatura máxima y mínima y dos de estas con brillo solar (Cuadro 1 y 2). El periodo de estudio comprende de los años 2006-2009. El relleno de los datos faltante de las series de temperatura máxima y mínima se realizó por el método WS (ASCE, 1996). En las Figuras 1 se presenta la distribución espacial y nombre de las estaciones utilizadas.

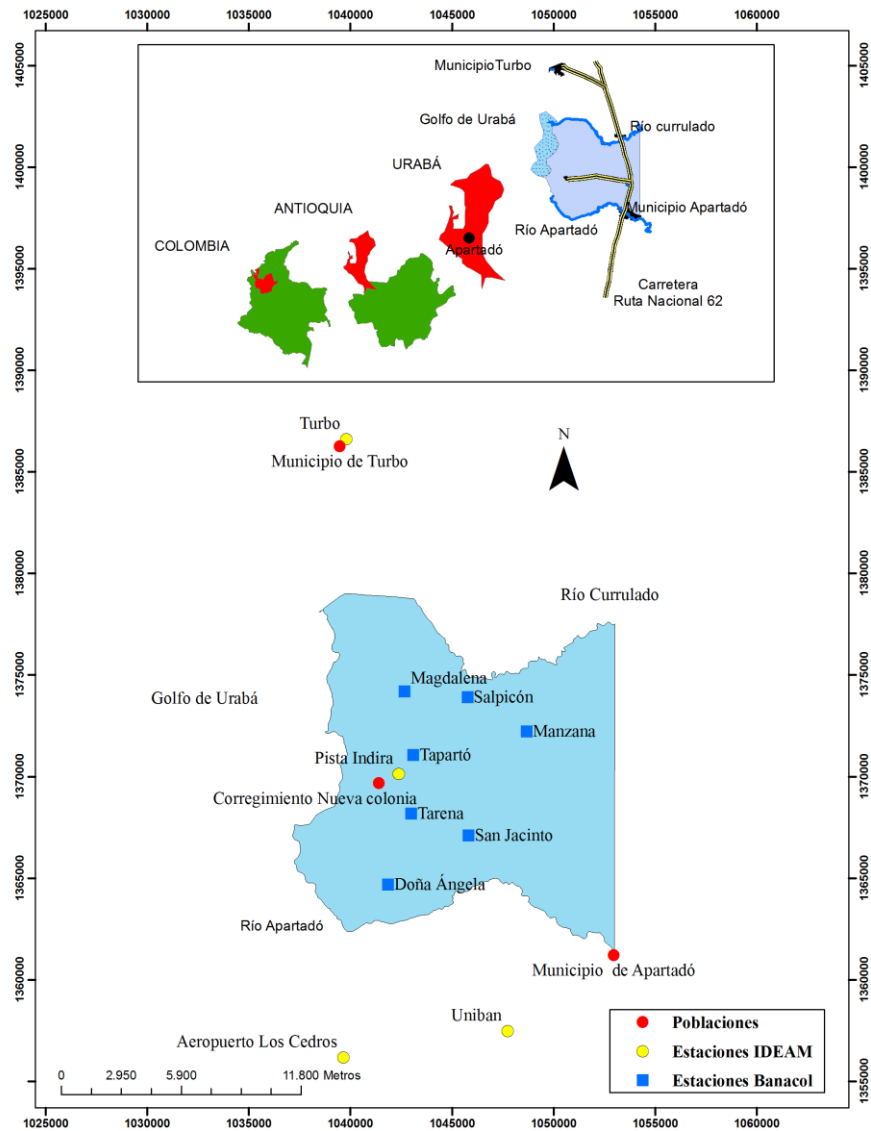


Figura 1. Ubicación de las estaciones fuera y dentro de la zona Norte del eje Bananero del Urabá Antioqueño, Información facilitada IDEAM y Banacol

Cuadro 1.Descripción de las estaciones fuera de la zona Norte del eje bananero.

Estación	Ele	Lat	Long	Precipitación		Tmin y Tmax		Brillo solar	
				P	A	P	A	P	A
Uniban †	37	7.49	-76.39	1985-2012	28	2004-2012	7	1985-2012	28
Aeropuerto Cedros †	15	7.49	-76.43	1985-2012	28	2004-2012	7	1989-2013	24
Turbo †	1	8.05	-76.42	1985-2012	28	2004-2012	7	-	-

Ele: elevación (msnm), Lat: latitud (grados), Long: longitud (grados), P: periodo, A: número años, fuente que proporciona la información: IDEAM: †. Tmin: temperatura mínima y Tmax: temperatura máxima.

Cuadro 2. Descripción de las estaciones dentro de la zona Norte del eje bananero.

Estación	Ele	Lat	Long	Precipitación		Tmin y Tmax		Radiación Visible	
				P	A	P	A	P	A
Doña Ángela ¶	9	7.89	-76.70	2004-2012	9	2004-2012	9	-	-
Magdalena¶	19	7.98	-76.69	2004-2012	9	2004-2012	9	-	-
Manzano¶	23	7.96	-76.64	2004-2012	9	2004-2012	9	-	-
Salpicón ¶	23	7.98	-76.66	2004-2012	9	2004-2012	9	-	-
San Jacinto¶	19	7.91	-76.66	2004-2012	9	2004-2012	9	-	-
Tapartó¶	9	7.95	-76.69	2004-2012	9	2004-2012	9	-	-
Tarena¶	9	7.93	-76.69	2004-2012	9	2004-2012	9	-	-
Pista Indira†	23	7.95	-76.70	2006-2009	4	2004-2009	4	2004-2009	4

Ele: elevación (msnm), Lat: latitud (grados), Long: longitud (grados), P: periodo, A: número años, fuente que proporciona la información: Banacol: ¶, IDEAM: †. Tmin: temperatura mínima y Tmax: temperatura máxima.

Se estimó la radiación solar a través de la radiación visible, se estableció que el 48% de la radiación solar se convierte en visible (IDEAM, 2005), Allen *et al.* (2006) sugirieron la extrapolación de la radiación bajo la siguientes consideraciones si, el tamaño de la región es pequeña, los mecanismos atmosféricos que gobiernan la precipitación y la nubosidad son casi idénticos dentro de las partes analizadas de la región (Procesos convectivos) y la fisiografía de la región es casi homogénea, las diferencias en el relieve deben ser mínimas ya que tienen mucha influencia en el movimiento de las masas de aire. Si se cumplen tales condiciones, los datos observados de radiación solar pueden usarse en las estaciones cercanas, los métodos de estimación de la radiación solar compararon con los datos medidos en la estación Pista Indira pues la diferencia en latitud no es mayor en ningún caso de ($0^{\circ}6'9''$) y altitud en menos de 23 m.

2.3. Estimación de los coeficientes a y b de la ecuación de Angstrom–Prescott

Se utilizó la radiación solar de la estación Pista Indira en las estaciones Uniban y Aeropuerto acorde a lo recomendado por Allen *et al.* (2006) .Con la duración real del brillo solar (n) de cada una se utilizó el modelo de Angstrom-Prescott para obtener los coeficientes a y b como se presenta en la siguiente expresión:

$$\frac{R_s}{R_a} = \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (1)$$

donde: R_s : radiación solar incidente [$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$] (Pista Indira), R_a : radiación extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$], n : duración real del brillo solar [h], N : la máxima duración posible de luz solar o las horas del día [h] de las estaciones Uniban y Aeropuerto. Los coeficientes a y b se denominaron ap y bp (coeficientes Angstrom-Prescott de las estaciones).

2.4. Estimación de la radiación solar

Para la estación Uniban y Aeropuerto se utilizaron los métodos Angstrom- Prescott reportado en Angstrom (1924) y Prescott (1940) y los propuestos por Samani (2000) e IDEAM (2005) para la estimación de la radiación solar, los dos primeros recomendados por Allen *et al.* (2006).

El método propuesto por Samani (2000) es:

$$R_{ssamani} = R_a * k_t * (T_{\max} - T_{\min})^{1/2} \quad (2)$$

donde: $R_{ssamani}$ = radiación solar incidente [$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$], R_a = radiación solar extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$], k_t = coeficiente empírico [$^{\circ}\text{C}^{-0.5}$], $T_{\max}$ = temperatura diaria máxima [$^{\circ}\text{C}$] y $T_{\min}$ = temperatura diaria mínima [$^{\circ}\text{C}$]. El coeficiente k_t de la expresión (2) es empírico a partir de los datos de presión atmosférica, pero Hargreaves citado por Samani (2000) recomendó un $k_t = 0.162$ para las regiones del interior y un $k_t = 0.19$ para las regiones costeras, de modo que se utilizó este último.

El método Angstrom- Prescott propuesto Angstrom (1924) y Prescott (1940) es:

$$Rs_{Angstrom} = \left(a + b \frac{n}{N} \right) * Ra \quad (3)$$

donde: $Rs_{Angstrom}$ es la radiación solar incidente [$MJ m^{-2} d^{-1}$], n es duración real del brillo solar [h], N es la máxima duración posible de la luz solar o las horas del día [h], n / N es la duración relativa del brillo solar, Ra es la radiación extraterrestre [$MJ m^{-2} d^{-1}$]. Para este modelo se evaluaron los coeficientes recomendados por Allen *et al.* (2006) y Doorenbos y Pruitt (1977) ($b = 0.50$ $a = 0.25$), los sugeridos por Frere *et al.* (1978) para la zona tropical humedad de la zona andina ($a = 0.29$ y $b = 0.42$), los planteados por Frere y Popov (1974) y denominado Freregráfico1974 determinados a partir de la relación (n/N anual) de 0.36 y 0.42 para Uniban y Aeropuerto respectivamente, con valores de ($a = 0.2$ y $b = 0.52$) para Uniban y para Aeropuerto de ($a = 0.22$ y $b = 0.48$) y también se evaluó los coeficientes de la estaciones (a_p y b_p) generados con la expresión (1).

Se evaluó el método del IDEAM (2005) con la siguiente expresión:

$$Rs_{IDEAM} = \frac{Rs_{Angstrom}}{Ra} = 0.3429014 + 0.2437401 * \frac{n}{N} + 0.1129569 * \frac{n}{N}^2 - 0.0265681 * \frac{n}{N}^3 \quad (4)$$

donde: Rs_{IDEAM} es la radiación solar incidente [$MJ m^{-2} d^{-1}$], n es duración real del brillo solar [h], N es la máxima duración posible de la luz solar o las horas del día [h], n / N es la duración relativa del brillo solar.

2.5. Determinación de la evapotranspiración de referencia

Se realizó en dos etapas la primera consistió en la estimación de modelos con las cuatro estaciones pertenecientes al IDEAM es Pista Indira la única que está dentro de la zona de estudio (Cuadro 1 y 2) y la segunda etapa en las que se utilizaron las siete estaciones que se encuentran dentro de la zona de estudio pertenecientes a Banacol (Cuadro 2). En ambas etapas se utilizaron los métodos:

Hargreaves y Samani (1985) se estimó con la siguiente expresión:

$$E_{toHS1985} = 0.0135 * (T_{media} + 17.78) * R_s \quad (5)$$

$E_{toHS1985}$ = evapotranspiración referencia diaria (mm d^{-1}), T_{media} = temperatura media ($^{\circ}\text{C}$), R_s = radiación solar incidente (mm d^{-1}).

Hargreaves es un método alternativo para el cálculo de E_{to} propuesto por Allen *et al.* (2006) basado en la siguiente expresión:

$$E_{toHargreaves} = 0.0023 * R_a * (T_{media} + 17.8) * (T_{max} - T_{min})^{1/2} \quad (6)$$

$E_{toHargreaves}$ = evapotranspiración referencia diaria (mm d^{-1}), T_{media} = temperatura media ($^{\circ}\text{C}$), T_{max} = temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$), T_{min} = temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$), R_a = radiación extraterrestre (mm d^{-1}).

El método Penman Monteith (PM) es:

$$E_{t_o}^{PM} = \frac{0.408 * (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 * u_2)} \quad (7)$$

$E_{t_o}^{PM}$ = evapotranspiración de referencia (mm dia^{-1}), R_n = radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), G = flujo de calor de suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), T = temperatura media del aire a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$), u_2 = velocidad del viento a 2m de altura (m s^{-1}), e_s = presión de vapor de saturación (Kpa), e_a = presión real de vapor(Kpa), $e_s - e_a$ = déficit de presión de vapor(Kpa), Δ = pendiente de la curva de presión de vapor($\text{KPa}^{\circ} \text{ C}^{-1}$) y γ = Constante psicrométrica($\text{KPa}^{\circ} \text{ C}^{-1}$) Por ser a escala diaria el valor $G=0$ para el cultivo de referencia según Allen *et al.* (2006). Se utilizó los datos de velocidad del viento reportados por IDEAM (2005) a nivel mensual y para las estaciones dentro y fuera de la zona de estudio se utilizó la radiación solar medida en la estación Pista Indira como lo sugiere Allen *et al.* (2006), también se implementó la estimación de la presión de vapor actual por la ausencia de la temperatura de rocío como lo sugirieron Allen *et al.* (2006).

Así mismo se evaluó el método PM con la radiación solar estimada por Samani (2000) según la ecuación (2), y se denotó como Eto-PM-Samani y también se utilizó el mejor método de estimación de la radiación y se consideró en el método PM.

2.6. Modelo de regresión lineal

Acorde a lo recomendado por Allen *et al.* (2006) se realizó para las estimaciones de Eto un diagrama de dispersión para definir su relación con el método EtoPM a través de los modelos lineales que se presentan en las siguientes expresiones:

$$EToPM = a + b * EToHargreaves \quad (8)$$

$$EToPM = a + b * EToHS1985 \quad (9)$$

$$EToPM = a + b * EToPM \text{ Samani} \quad (10)$$

2.7. Estadísticos de comparación

Para la comparación de los modelos se utilizó: La raíz del error cuadrático medio (RSME) (Stöckle *et al.*, 2004; Teegavarapu y Chandramouli, 2005; Rivas y Carmona, 2010). Coeficiente de Determinación (R^2) (Stöckle *et al.*, 2004; Teegavarapu y Chandramouli, 2005). Error relativo (RE) presentado en Rivas y Carmona (2010), Porcentaje (%) de reducción se implementó para encontrar la disminución en la RSME antes y después de aplicar el modelo lineal con PM citado por Tabari *et al.* (2013) y así como también se realizó la regresión lineal entre los valores medidos de radiación solar (Estación Pista Indira) y los estimados por los métodos de radiación, y entre los valores de EtoPM de cada estación con los otros métodos de evapotranspiración para comparar

el acercamiento a los valores medidos (subestimación o sobreestimación) (Ortega-Farias *et al.*, 2006; Ramírez *et al.*, 2011). El modelo se consideró que tenía un excelente ajuste cuando presentaba valores de $RE \leq 20\%$ y $R^2 > 0.8$ (Stöckle *et al.*, 2004; Caí *et al.*, 2007).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Estimación de los coeficientes a y b de la ecuación de Angstrom –Prescott

Los coeficientes ap y bp obtenidos para la estación Uniban son 0.352 y 0.4458 respectivamente y para Aeropuerto son 0.339 y 0.4174, los valores son cercanos a los reportados por Frere *et al.* (1978).

3.2. Determinación de la radiación solar

Los resultados para las estaciones Uniban y Aeropuerto (Cuadro 3) de los coeficientes estaciones (ap y bp) presentan los menores valores de RSME de 68.44 y 64.73 $\text{cal m}^{-2}\text{d}^{-1}$ respectivamente, seguido de Frere (1978) y son mayores a los reportados por Ramírez *et al.* (2011) para la zona cafetera de Colombia con RSME comprendidos entre 12.87-31.01 $\text{cal m}^{-2}\text{d}^{-1}$. El modelo Frere (1978) con valores de R^2 0.498 y 0.544 para Uniban y Aeropuerto respectivamente presentó un mejor ajuste que el encontrado ap y bp . Los coeficientes estaciones tuvieron un valor de RE menor 20% como lo recomienda Caí *et al.* (2007), sin embargo los métodos IDEAM (2005) y Frere (1978) presentan valores de RE similares y cercanos al 20%. El método que presentan la

mejor estimación de la radiación solar es Angstrom-Prescott con la utilización de los coeficientes estaciones, los coeficientes de Frere (1978) pueden aplicarse en la zona de Urabá en caso de tener valores de brillo solar.

Se evidencia que el método propuesto por Samani presentó valores bajos R^2 , RSME altos y los valores de intercepto y pendiente más alejados a cero y la unidad, en consecuencia es el que más se aleja de los valores medidos, se determina que para zonas húmedas no estima adecuadamente la radiación (Oliveira *et al.*, 2005). Con los resultados obtenidos se optó por utilizar los coeficientes $a=0.29$ y $b=0.49$ de Frere *et al.* (1978) para calcular la radiación e implementarla en el cálculo de la evapotranspiración, ya que su calibración se realizó con un mayor número de registros, estaciones y variedad de condiciones topográficas, y en este estudio mostró similitud con los coeficiente a_p y b_p e incluso presenta mayor R^2 , lo que indica la amplia aplicación de los coeficientes de Frere *et al.* (1978) y su utilización para la zona de Urabá.

Cuadro 3. Estimación de la radiación solar y sus estadísticos de verificación en la comparación de los distintos métodos usados para calcularla en la zona Norte de Urabá, Colombia.

	Estación	Angstrom-Prescott				IDEAM	
		Samani	Frere 1978	Frere 1974	Doorenbos y Pruitt		Coeficientes estaciones
			a=0.29	a=0.2	a=0.25	bp=0.4458	
Coeficiente			b=0.42	b=0.52	b=0.50	ap=0.352	
RSME	Urban	98.99	89.91	125.84	96.89	68.44	89.16
RE		23%	24%	38%	26%	15%	23%
R²		0.1357	0.498	0.5235	0.5126	0.4454	0.4622
a		386.38	150.66	46.101	95.266	204.4	215.9
b		0.1896	0.5206	0.6536	0.6225	0.5498	0.3833
			a=0.29	a=0.22	a=0.25	bp=0.417	
Coeficiente		Samani	b=0.42	b=0.48	b=0.50	ap=0.339	
RSME	Aeropuerto	99.27	75.53	101.74	80.18	64.73	76.95
RE		23%	19%	28%	20%	15%	19%
R²		0.133	0.544	0.559	0.557	0.501	0.520
a		390.11	136.880	58.264	79.046	180.780	201.130
b		0.1898	0.599	0.690	0.718	0.592	0.454

3.3. Determinación de la evapotranspiración de referencia

Para la determinación del mejor método de estimación de la evapotranspiración se utilizaron las estaciones pertenecientes al IDEAM en la primer Etapa y en la segunda se utilizaron las siete estaciones que se encuentran dentro de la zona de estudio

pertenecientes a Banacol, en vista de que el método planteado por Frere *et al.* (1978) presentó la mejor estimación de radiación, se utilizó para calcular la Evapotranspiración con el método PM y se denominó Eto-PM-Rsfrere en primera etapa.

3.3.1. Etapa 1: fuera de la zona de estudio

Los resultados se presentan en el Cuadro 4, el RSME varió entre 0.30-1.05 mm d⁻¹ y RE con valores inferiores a 23% y menores a los reportados en Hargreaves y Allen (2003). Los valores de RSME en el método EtoHargreaves son superiores a los encontrados por Tabari *et al.* (2013) de 0.34 mm d⁻¹ y son inferiores a los reportados por Tabari *et al.* (2012) y Hargreaves y Allen (2003) quienes reportan RSME de 0.901 mm d⁻¹ y también se encuentra dentro del rango de 1.04-0.4mm d⁻¹ obtenido por Gavilán *et al.* (2006). La EtoHS1985 tiene menor RSME y RE para las estaciones Turbo, Uniban y Aeropuerto (Fuera de la zona de estudio) y la estación Pista Indira presentó un menor RSME para el método EtoHargreaves. El método EtoHargreaves presentó un R² de 0.18-0.35, en cambio el método EtoHS1985 tuvo un coeficiente de determinación aceptable de acuerdo a lo presentado por Caí *et al.* (2007), pues en todas las estaciones es mayor al 0.93, en este último se utiliza la radiación solar medida, la cual es componente esencial del término energético de PM situación que también encontraron Tabari *et al.* (2012). El valor RE para todos los métodos fue menor a 20% con excepción de Pista Indira que tuvo un valor mayor y acorde a lo determinado por Caí *et al.* (2007) no está dentro del rango para tener un ajuste excelente en EtoHS1985. Con lo anterior exceptuando a Pista Indira para todas las estaciones la EtoHS1985 presentó los valores más bajos de RSME y RE y los valores más altos de R² a pesar de que Rahimikhoob (2010) argumenta que

no hay variación entre EtoHargreaves y EtoHS1985. Mientras los métodos EtoHargreaves y Eto-PM-Samani tuvieron RSME y RE similares siendo mejores para el primero y pudiendo utilizar este para Pista Indira.

En el Cuadro 4 se determinó que el método EtoHS1985 presenta los valores de interceptó y pendiente más cercanos a cero y la unidad respectivamente, pero con una pendiente mayor a la unidad que tiende a sobreestimar a partir de valores mayores a 4 mm d⁻¹, sobreestimación en zonas húmedas que también reportaron Raziei y Pereira (2013b) esto se debe a que este método enfoca su estimación al término energético. El método de EtoHargreaves en este estudio subestimó (pendiente < 1) la evapotranspiración, lo que no concuerda en lo determinado por Tabari *et al.* (2012), Hargreaves y Allen (2003), Raziei y Pereira (2013a) y Gavilán *et al.* (2006) quienes encontraron una sobreestimación del 15 %, 25%, 10% y 9% respectivamente. El método Eto-PM-Rsfrere en comparación con EtoHargreaves y Eto-PM-Samani es más cercano a la recta 1:1 ya que tiene un intercepto y una pendiente próximo a cero y a la unidad respectivamente, así mismo tuvo los valores de RSME y RE más bajos y R² mayores que la EtoHargreaves y Eto-PM-Samani. Con lo anterior utilizar coeficientes propios y calibrados para la zona permite disminuir la incertidumbre en el cálculo de EtoPM confirmado que la veracidad del método de PM siempre y cuando se obtengan coeficientes calibrados (Liu *et al.*, 2009; Ramírez *et al.*, 2011).

Cuadro 4. Comparación estadística de los métodos de evapotranspiración de las estaciones fuera de la zona de estudio.

Estación	Método	RSME	RE	R ²	b	a
Aeropuerto	EtoHS1895	0.30	6.612%	0.95	1.2011	-0.8341
Uniban		0.31	6.742%	0.94	1.199	-0.8145
Pista Indira		1.05	22.832%	0.93	1.1759	-0.7309
Turbo		0.34	7.470%	0.95	1.2711	-1.098
Aeropuerto	EtoHargreaves	0.68	15.417%	0.35	0.3512	2.8517
Uniban		0.68	15.507%	0.35	0.3482	2.8455
Pista Indira		0.69	15.594%	0.35	0.3785	2.7407
Turbo		0.73	16.613%	0.18	0.2373	3.3138
Aeropuerto	Eto-PM-Samani	0.71	14.937%	0.40	0.4489	2.7376
Uniban		0.71	15.021%	0.39	0.4467	2.7256
Pista Indira		0.73	15.252%	0.39	0.455	2.5918
Turbo		0.76	16.198%	0.21	0.3049	3.3144
Aeropuerto	Eto-PM-Rsfrere	0.55	13.169%	0.69	0.7288	0.9314
Uniban		0.65	14.547%	0.66	0.6567	1.1076

3.3.1.1. Modelo lineal

En el Cuadro 5 se presentan los estadísticos obtenidos para la regresión lineal entre los métodos de estimación de Eto y el método PM.

Cuadro 5. Estadísticos del modelo de regresión lineal con intercepto entre los métodos de evapotranspiración y PM de las estaciones fuera de la zona de estudio.

Estación	Método	Regresión con PM con intercepto				
		b	a	R ²	RSME	RE
Pista	EtoHS1985	0.79	0.89	0.93	0.22	4.886%
Indira						
Uniban		0.79	0.89	0.94	0.20	4%
Aeropuerto		0.79	0.89	0.95	0.194	4.3%
Turbo		0.74	1.06	0.95	0.185	4.2%
Pista	EtoHargreaves	0.94	0.35	0.35	0.69	15.240%
Indira						
Uniban		1.01	0.04	0.35	0.68	15%
Aeropuerto		1.01	0.02	0.35	0.680	15.1%
Turbo		0.77	1.09	0.18	0.715	16.1%
Pista	Eto-PM-Samani	0.49	2.59	0.40	0.80	16.353%
Indira						
Uniban		0.45	2.73	0.39	0.80	17%
Aeropuerto		0.45	2.74	0.34	0.804	16.5%
Turbo		0.30	3.31	0.21	0.789	16.6%

Al utilizar el modelo de regresión lineal entre PM y EtoHS1985 la magnitud del RSME presentó mejoras al comprar los valores del Cuadro 4 y Cuadro 5, especialmente

en la estación Pista Indira con disminución del RSME en 79%, para Uniban 35%, Aeropuerto 36% y Turbo 46%, pues este al implementar la radiación solar medida describe el término energético y a través del modelo lineal se ajusta el aerodinámico de EtoPM. Hargreaves y Allen (2003), reportaron que estos errores iniciales están sujetos a la influencia de la variación del viento y de la presencia de nubes, pues es una variable dependiente localmente y de notable influencia de la topografía y la advección regional. El método EtoHargreaves presentó mejorías menores al 2%, inferiores a los encontrados por Gavilán *et al.* (2006) con una reducción del RSME del 22.2% después del ajustes al modelo lineal, mientras Tabari *et al.* (2013) presentó valores RSME de 0.67 mm d^{-1} similares a lo reportado antes del ajuste (Cuadro 4) y cuando utilizan el modelo lineal el RSME es de 0.34 mm d^{-1} presentando un 50.1% de reducción del error, valor superior al encontrado en este estudio.

En la zona de estudio el modelo EtoHargreaves falla principalmente en la baja capacidad que tiene Rssamani de predecir la radiación solar, que está implícita en la ecuación. Con lo anterior se demuestra la importancia de medir la radiación solar para la estimación de evapotranspiración, como variable principal para el uso de métodos alternativos a PM. El método Eto-PM-Samani aumento su error en 10% producto al bajo coeficiente de determinación presentado en el cálculo de la radiación (Cuadro 3), es probable que la variabilidad de la velocidad del viento juega un papel importante en las discrepancias entre Eto-PM-Samani y EtoPM, el valor de velocidad de viento por defecto sea menos eficaz que el ajuste realizado al método EtoHS1985 o EtoHargreaves. Aunque Raziei y Pereira (2013b), plantean que es casi imposible encontrar un valor predeterminado o una función empírica que tome en cuenta la variabilidad cuando los

datos de velocidad del viento no están disponibles bajo estas circunstancias, no es apropiado encontrar una modificación en los métodos alternativos.

El método EtoHS1985 presentó el mejor R^2 con valores entre 0.93-0.95, los valores de a y b para las estaciones evaluadas mostraron similitud, situación que no se tuvo para el método EtoHargreaves en donde los valores presentaron mayor variación y el R^2 fue inferior a 0.35 mostrando bajo ajuste, por lo tanto a pesar de que los valores de pendiente estén más cercana a la unidad y el intercepto más cercano a cero EtoHargreaves no es representativos del modelo lineal, lo que condujo a determinar que EtoHS1985 estima mejor los valores de Evapotranspiración y que con el ajustes al modelo lineal reducen los errores y se tiene una alta relación con la estimación de EtoPM, de igual manera con el método EtoHargreaves se reducen los errores al aplicar el modelo lineal con EtoPM, pero los coeficientes de determinación son bajos con valores menores a 0.8 dan poca validez al uso de los coeficientes obtenidos en el modelo lineal para este método.

3.3.2. Etapa 2: estimación de los modelos dentro de la zona de estudio

No se utilizó el método Eto-PM-Rsfrere por que no se cuenta con mediciones de brillo solar. En la segunda etapa el modelo EtoHS1985 en las siete estaciones dentro de la zona de estudio tuvo los mejores estadísticos presentando los valores más bajos de RSME y R^2 mayores a 0.77 (Cuadro 6), en este mismo sentido el valor de la pendiente se aproximó a la unidad y el intercepto a cero acercándose más a la recta 1:1 que el método EtoHargreaves, con lo anterior las estimaciones de EtoHS1985 se ajustaron mejor a las estimaciones del EtoPM aunque sus valores mayores a 6 mm d^{-1} tiende a

sobreestimar porque la recta con los valores de pendiente e intercepto en conjunto son más altos que la recta 1:1 y los valores más altos fueron para Magdalena y Tapartó y por ende son las estaciones que más sobreestimaron el valor de EtoPM, a pesar de no ser la más húmedas como reportaron Gavilán *et al* (2006) y Raziei y Pereira (2013a), cabe destacar los valores RSME para ambos métodos aumentaron en comparación con las estaciones fuera de la zona de estudio (Cuadro 4). En vista a que la Eto-PM-Samani presentó muy bajos R^2 y altos valores de RSME sus resultados no se recomiendan, acorde al RE presentados en Cuadro 6 solo la estación Magdalena para el método EtoHargreaves no presentó un buen ajuste, ya que todas tienen con un valor menor 20% de RE.

Cuadro 6. Comparación estadística de los métodos de evapotranspiración de las estaciones dentro de la zona de estudio.

Estación	Método	RE	RSME	b (Pendiente)	a (Intercepto)	R ²
Manzana	EtoHS1985	9.7%	0.46	1.23	-1.3515	0.910
Magdalena		10.9%	0.51	1.14	-0.52	0.801
San Jacinto		12.1%	0.56	1.01	-0.21	0.79
Doña Ángela		11.5%	0.53	1.08	-0.46	0.799
Salpicón		11.6%	0.54	1.15	-1.09	0.85
Tapartó		11.4%	0.53	1.08	-0.46	0.766
Tarena		10.5%	0.49	1.28	-1.61	0.91
Manzana	EtoHargreaves	17.8%	0.85	0.25	3.52	0.1884
Magdalena		21.1%	0.89	0.40	2.40	0.2328
San Jacinto		18.1%	0.84	0.50	2.21	0.3981
Doña Ángela		19.2%	0.86	0.47	2.29	0.3139
Salpicón		15.9%	0.78	0.34	3.21	0.2452
Tapartó		18.1%	0.81	0.45	2.40	0.2832
Tarena		17.0%	0.81	0.21	3.73	0.1467

3.3.2.1. Modelo lineal

El modelo lineal se implementó para las siete estaciones pertenecientes a Banacol, los coeficientes de determinación y regresión lineal con EtoPM se presentan en el Cuadro 7, el valor de RSME más alto fue para San Jacinto y comparando los valores de RSME con los obtenidos sin aplicación del modelo lineal (Cuadro 6) disminuyó en 29.27 % y 6.81% para Eto1985 y EtoHargreaves respectivamente, los valores de pendiente e intercepto se aproximaron más a la recta 1:1 para ambos, sin embargo al aplicar los coeficientes encontrados en el Cuadro 8, la R^2 de la EtoHS1985 fue mayor a 0.77 y se encuentra cerca de los valores recomendado por Caí *et al.* (2007) para presentar un buen ajuste, por lo tanto estos coeficientes reportados en el Cuadro 8 pueden utilizarse para ajustar el modelo EtoHS1985 al EtoPM en la zona de Urabá, situación que no pasa para el método EtoHargreaves aunque los valores de pendiente e intercepto son cercanos a la unidad y cero, el coeficiente de determinación presentó valores bajos mostrando baja relación con el método EtoPM, los valores de RE para ambos métodos son menores al 20% como lo recomienda (Caí *et al.*, 2007).

Cuadro 7 . Estadísticos del modelo de regresión lineal con intercepto entre los métodos de evapotranspiración y PM de las estaciones dentro de la zona de estudio.

Estación	Método	RSME	b	a	RE	R ²
Manzana	EtoHS1985	0.267	0.74	1.44	5.5%	0.910
Magdalena		0.384	0.70	1.28	8.3%	0.801
San Jacinto		0.471	0.79	1.17	9.8%	0.790
Doña						
Ángela		0.426	0.74	1.29	8.8%	0.799
Salpicón		0.336	0.74	1.55	6.7%	0.850
Tapartó		0.438	0.71	1.43	9.1%	0.766
Tarena		0.257	0.71	1.58	5.3%	0.910
Manzana	EtoHargreaves	0.803	0.75	1.34	16.4%	0.188
Magdalena		0.753	0.59	2.12	16.4%	0.233
San Jacinto		0.799	0.79	1.17	16.5%	0.398
Doña						
Ángela		0.788	0.67	1.68	16.2%	0.314
Salpicón		0.754	0.71	1.50	15.1%	0.243
Tapartó		0.746	0.64	1.86	16.1%	0.283
Tarena		0.791	0.68	1.61	16.2%	0.147

4. CONCLUSIONES

Es apropiado el uso para la zona de Urabá de los coeficientes a y b de Frere en la estimación de la radiación solar. El método propuesto por Samani en zonas húmedas no estimó adecuadamente la radiación.

Con excepción de Pista Indira en todas las estaciones dentro y fuera de la zona del estudio, la EtoHS1985 ajustado al modelo Penman-Monteith fue el mejor método de estimación, por lo que se recomienda el uso de los coeficientes obtenidos en el ajuste lineal con PM

Al aplicar el modelo lineal se redujo el error con excepción del método Eto-PM-Samani que aumentó en 10% para la zona.

El uso de coeficientes calibrados como fue el caso de Eto-PM- Rsfrere permitió disminuir el error en el cálculo de la evapotranspiración.

5. LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. N°56 Ed. FAO. Italia, Roma. 323 p.
- Angstrom, A. 1924. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 50 (210): 121-126.

- ASCE (American Society of Civil Engineers). 1996. Hydrology handbook. 2 ed. American Society of Civil Engineers. New York, EE.UU. 769 p.
- Barco, M. O. J., P. L. A. Cuartas, S. Ó. J. Mesa, V. J. F. Mejía, J. G. Poveda, U. J. I. Vélez, G. R. Mantilla, O. C. D. Hoyos, H. B. Botero C. M. I. Montoya. 2000. Estimación de la evaporación en Colombia. Avances en Recursos Hidráulicos. (7): 43-51.
- Caí, J., Y. Liu, T. Leiy L. S. Pereira. 2007. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman–Monteith equation using daily weather forecast messages. Agricultural and Forest Meteorology 145 (1–2): 22-35.
- Chiappe, R. 1998. Técnicas de evaluación de evapotranspiración potencial y balance hídrico. In: Manual de evaluación de impactos ambientales de Colombia. Ministerio del medio ambiente. Bogotá, Colombia. pp 324-348.
- Carvalho A., M. de, L. de Carvalho, R. Vianello, G. Sedyama, M. de Oliveiray A. de Sá Junior. 2013. Geostatistical improvements of evapotranspiration spatial information using satellite land surface and weather stations data. Theoretical and Applied Climatology 113 (1-2): 155-174.
- Doorenbos, J.y W. Pruitt. 1977. Las necesidades de agua de los cultivos. N°24 Ed. FAO Riego y Drenaje Roma, Italia. 194 p.
- Frere, M .y G. F. Popov. 1974. Pronóstico agrometeorológico del rendimiento de los cultivos estudio FAO. 73 N° Ed. FAO producción y protección vegetal. Roma, Italia. 194 p.
- Frere, M., Q. Rijsky J. Rea. 1978. Estudio agroclimatológico de la zona andina. N° 161 Ed. Organización Meteorológica Mundial OMM. Ginebra, Suiza. 297 p.

- Gavilán, P., I. J. Lorite, S. Torneroy J. Berengena. 2006. Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference et in a semiarid environment. *Agricultural Water Management* 81 (3): 257-281.
- Giraldo, J., L. Lince, A. Cuartas y H. González. 2008. Evaluación de fórmulas empíricas para el cálculo de la evapotranspiración potencial. *Fitotecnia* 141: 1-2.
- Gocic, M .y S. Trajkovic. 2010. Software for estimating reference evapotranspiration using limited weather data. *Computers and Electronics in Agriculture* 71 (2): 158-162.
- Guarín, G. W. G. 2011. Impacto de la variabilidad climática en la producción de banano en el Urabá Antioqueño. Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Medellín, Colombia. p. 145.
- Hargreaves, G. y R. Allen. 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 129 (1): 53-63.
- Hargreaves, G. H. y Z. A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. *American Society of Agricultural Engineers (Microfiche collection) (USA)* 1 (2): 96–99.
- IDEAM (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2005. Atlas climatológico de Colombia. Grupo de investigación en Meteorología y climatología. Bogotá, Colombia. 217 p.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2007a. Estudio general de suelos y zonificación de tierras departamento de Antioquia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia. 922 p.

- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2007b. Estudio semidetallado de suelos de las áreas potencialmente agrícolas. Urabá departamento de Antioquia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia. 489 p.
- Jaramillo, A. 2007. Evapotranspiración de referencia en la región andina de Colombia. *Cenicafé* 57 (4): 288-298.
- Liu, X., X. Mei, Y. Li, Q. Wang, Y. Zhangy J. R. Porter. 2009. Variation in reference crop evapotranspiration caused by the Ångström–Prescott coefficient: Locally calibrated versus the FAO recommended. *Agricultural water management* 96 (7): 1137-1145.
- Oliveira, R. Z., L. F. Coutinho de Oliveira, H. R. Wehry l. B. Borges. 2005. Comparative study estimation models for reference evapotranspiration for the region Goiania, go. *Bioscience Journal* 21 (3): 19-23.
- Ortega-Farias, S. O., A. Oliso, S. Fuentes y H. Valdes. 2006. Latent heat flux over a furrow-irrigated tomato crop using Penman–Monteith equation with a variable surface canopy resistance. *Agricultural water management*. 82 (3): 421-432.
- Poveda, G., J. I. Vélez, O. J. Mesa, A. Cuartas, J. Barco, R. I. Mantilla, J. F. Mejía, C. D. Hoyos, J. M. Ramírez y L. I. Ceballos. 2007. Linking long-term water balances and statistical scaling to estimate river flows along the drainage network of Colombia. *Journal of Hydrologic Engineering* 12 (1): 4-13.
- Prescott, J. A. 1940. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society of South Australia*. 64: 114-118.
- Rahimikhoob, A. 2010. Estimation of evapotranspiration based on only air temperature data using artificial neural networks for a subtropical climate in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*. 101 (1-2): 83-91.

- Ramírez, V. H., A. Mejía, E. V. Marín y R. Arango. 2011. Evaluation of models for estimating the reference evapotranspiration in colombian coffee zone. *Agronomía Colombiana* 29 (1): 107-114.
- Raziei, T. y L. S. Pereira. 2013a. Estimation of Eto with Hargreaves–Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. *Agricultural Water Management*. 121: 1-18.
- Raziei, T. y L. S. Pereira. 2013b. Spatial variability analysis of reference evapotranspiration in Iran utilizing fine resolution gridded datasets. *Agricultural Water Management* 126: 104-118.
- Rivas, R. y F. Carmona. 2010. La ecuación de Priestley-Taylor aplicada a nivel de píxel: Una alternativa para estudios detallados de cuencas. *Boletín Geológico y Minero* 121 (4): 401-412.
- Salazar, M. C. A. 2012. Los sistemas agrícolas en el cultivo del banano: Aplicados a las zonas bananeras de Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 592 p.
- Samani, Z. 2000. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 126 (4): 265-267.
- Stöckle, C. O., J. Kjelgaard y G. Bellocchi. 2004. Evaluation of estimated weather data for calculating Penman-Monteith reference crop evapotranspiration. *Irrigation science* 23 (1): 39-46.
- Tabari, H., M. E. Grismery S. Trajkovic. 2013. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrigation Science* 31 (2): 107-117.

- Tabari, H., O. Kisi, A. Ezaniy P. Hosseinzadeh Talaei. 2012. Svm, anfis, regression and climate based models for reference evapotranspiration modeling using limited climatic data in a semi-arid highland environment. *Journal of Hydrology* 444–445: 78-89.
- Teegavarapu, R. S. y V. Chandramouli. 2005. Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. *Journal of Hydrology* 312 (1): 191-206.
- Yoder, R. E., L. O. Odhiambo W. C. Wright. 2005. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid southeast United States. *Applied engineering in agriculture* 21 (2): 197-202.

CAPÍTULO 4. ZONIFICACIÓN AGROCLIMÁTICA Y BALANCE HÍDRICO DE LA ZONA NORTE DEL EJE BANANERO DEL URABÁ ANTIOQUEÑO.

Ana María Toro Trujillo¹, Ramón Arteaga Ramírez¹, Mario Alberto Vázquez Peña¹,
Laura Alicia Ibáñez Castillo¹.

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA) Universidad Autónoma Chapingo. (UACH).Km 38. 5 Carretera México-Texcoco, código postal 56230. Estado de México. namariatoro@hotmail.com

RESUMEN

El trabajo consistió en el balance hídrico y clasificación climática para la zona Norte del eje Bananero del Urabá Antioqueño, con el objeto de definir épocas y regiones con déficit o exceso de humedad y clasificar el clima con la metodología de Thornthwaite. Se utilizaron los valores diarios de temperatura mínima y máxima de siete estaciones de Comercializadora Internacional Banacol S.A (C.I Banacol) para la estimación de la evapotranspiración referencia (Eto) con los métodos Hargreaves, Hargreaves y Samani(HS1985) y se ajustaron a un modelo lineal con Penman-Monteith (PM) denominados (AJUST). A partir de la Eto y precipitación mensual se realizó el Balance Hídrico Climático (BHC) tipo Thornthwaite-Mather, la EtoHS1985AJUST presentó el menor RCCME y valores $R^2 > 0.8$ ajustándose mejor al método PM, los déficit son mayores para la zona Norte, ocurren entre enero-marzo y oscilan de 10-80 mm anuales⁻¹ y los mayores excesos se ubican al Sur y ocurren entre abril-diciembre con valores de 1400-1800 mm anuales⁻¹, los Déficit y Excesos provenientes del método HargreavesAJUST presenta alta relación con EToHS1985AJUS, la zona tuvo dos

regiones según la clasificación Thornthwaite, la Norte Humedad y la Sur-Oriente Muy humedad ambas con deficiencia pequeña o nula, clima cálido y concentración térmica normal.

PALABRAS CLAVE Balance Hídrico Climático, clasificación climática zona de Urabá, evapotranspiración de referencia, índice de humedad

ABSTRACT

The work consisted of the water balance and climatic classification for the northern area of the Banana shaft Urabá Antioquia, in order to define eras and regions with deficit or excess moisture and weather rated to the methodology of Thornthwaite. Daily values of minimum and maximum temperature of C.I Banacol seven stations for estimating reference evapotranspiration (Eto) with Hargreaves, Hargreaves and Samani (HS1985) methods were used and a linear model with Penman-Monteith (adjusted PM) called (SET). From the monthly precipitation Eto and Water Balance Climate (BHC) Thornthwaite-Mather was undertaken, the EtoHS1985AJUST had the lowest RCCME and $R^2 > 0.8$ values to better match the PM method, deficits are greater for the northern zone, occurring between January-March and range from 10-80mm año^{-1} and higher excesses are located south and occur between April-December 1400-1800 values mm año^{-1} , the deficit and Goodwill from HargreavesAJUST method has high EToHS1985AJUS regarding the area had two regions according to Thornthwaite classification, humidity and north-east south with both moisture Very little or no impairment, warm weather and normal heat concentration.

KEYWORDS Water Balance Climate, climate classification Urabá region, reference evapotranspiration, moisture content

1. INTRODUCCIÓN

Identificar el régimen hídrico de una región desde el punto de vista agrícola permite conocer y minimizar riesgos en la producción, sirve de base para la zonificación de cultivos, caracterización de sequías, determinación de épocas de siembra, programación de riego e identificación de necesidades de drenaje (Ruíz *et al.*, 2012), convirtiéndolo en una guía esencial para toma de decisiones estratégicas en la planificación a largo y corto plazo en la agricultura. El balance hídrico climático (BHC) es una de las mejores maneras de conocer el régimen hídrico de una zona, ya que se deriva del principio general de conservación de masa en la precipitación o riego, la cual se reparte en: evapotranspiración, escurrimiento superficial, percolación y la variación de la reserva de agua en el suelo. El método más utilizado para realizar un BHC es el Thornthwaite-Mather (Thornthwaite y Mather, 1955) y aplicado por Ferguson (1996); Ruiz *et al.* (2012) y Sharma *et al.* (2010), pues contemplan las entradas por precipitación, salidas por evapotranspiración y permite relacionarlo con la capacidad de almacenamiento, los excesos y déficits para la zona radicular del cultivo (Kerkides *et al.*, 1996; Pereira, 2005), los cuales desde el punto agrícola están asociados a las pérdidas parciales o totales de las cosechas (Chiappe, 1998), por otra parte el conocimiento del régimen hídrico y la clasificación climática son inseparable, ya que no se puede comprender un grupo de cosas o fenómenos sin clasificar y viceversa (Campos, 2005). La zonificación hídrica climática establecen conjuntos homogéneos en demanda y oferta hídrica del ambiente (Campos, 2005). Sin embargo investigar el clima de una zona requiere la aportación de información multidisciplinaria y personal capacitado (WMO, 1981). La mayoría de los sistemas de clasificación de climas se basan en las características de

vegetación, térmicas e hídricas y existen gran diversidad de métodos entre ellos: Kóeppen (Köppen, 1918), Holdridge (Holdridge, 1947), Thorntwaite-Mather (Thornthwaite, 1948), Martone (1937), Caldas (1802), Lang (1915) en (IDEAM, 2005), y Papadakis (1980) citado por Campos (2005).

En Colombia en la caracterización climática se han realizado numerosos trabajos y se han utilizado diferentes clasificaciones reconocidas en el mundo, tales como Kóeppen, Caldas, Lang, Martonne y Holdridge, en general, todas estas clasificaciones están basadas en el comportamiento medio de parámetros como la precipitación y la temperatura, Ruíz *et al.* (2012) plantean que estas clasificaciones presenta limitaciones sobre todo cuando se requieren una aplicación agrícola, porque no consideran las variables y flujos hidrológicos representados principalmente por la evapotranspiración del cultivo. (Thornthwaite, 1948) propuso la metodología Thorntwaite para que los climas se ordenen de acuerdo al grado de humedad, al tomar en cuenta las necesidades hídricas de los cultivos y los resultados del balance hídrico climático. Los excesos y déficits determinan el índice de Pluvial (Ip) y con fines de caracterización climática de la disponibilidad hídrica en el suelo este índice permite una clasificación (Thornthwaite, 1948; Thornthwaite y Mather, 1955). El Ip intervienen en las entradas (precipitación) y salidas de agua (evapotranspiración) del sistema y se utiliza para conocer la disponibilidad de humedad para el cultivo, valores positivos del Ih se presenta en clima húmedo con exceso y valores negativos en climas áridos con déficits (Thornthwaite, 1948).

La zona de estudio en IDEAM (2005) se clasifica como cálida húmedo por el método Caldas-Lang (1915) y Holdridge (1974), como humedad y humedad lluviosa por el método Martonne (1937), como tropical lluviosa de bosque y tropical lluviosa de selva por el método Koeppen (1923) y por el método de Thornthwaite como zona muy húmeda, IGAC (2007b) reporta a través del índice (Evapotranspiración/Precipitación) como húmeda pero este último presenta el rango de variación de las precipitaciones promedio multianual fluctúan entre 1600-3600 mm, evapotranspiración de 1100-2150 mm, excesos de humedad total anual que varían entre 160-1800 mm, y déficit de 0-500 mm, lo que permite deducir que aun a esa escala se presenta un alta variabilidad de los factores determinantes del régimen hídrico, por lo cual se plantea en el presente trabajo definir regiones y épocas con excesos o déficits hídricos y clasificar el clima de la zona Norte del Urabá Antioqueño de acuerdo al método de Thornthwaite a una escala que permita el planteamiento y desarrollo de proyectos agrícolas y también evaluar la confiabilidad de la estimación de la evapotranspiración con respecto al método Penman Monteith de los métodos: Hargreaves-Samani (Hargreaves y Samani, 1985), Radiación FAO (Samani) y Hargreaves en Allen *et al.* (2006)

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Ubicación de zona de estudio

La zona de Urabá se encuentra ubicada en el del departamento de Antioquia, la zona Norte del eje bananero se encuentra ubicada en la parte central de la zona de Urabá, delimitada por los ríos Apartado y Currulao (Figura 1). Ubicados entre 8°0'40.09"-

7°59'23.94" Norte, 7°56'16.20"-7°53'8.55"Sur, 76°37'57.25"-76°38'.988" Este y 76°44'59.12"-76°44'22.13" Oeste (IGAC, 2007b).

2.2. Datos climatológicos

Se utilizaron siete estaciones ubicadas en zona de estudio pertenecientes Comercializadora Internacional Banacol S.A (C.I Banacol), (periodo 2006-2009), con datos de precipitación, temperatura máxima y mínima medias mensuales, y se extrapolaron los datos de radiación solar de la estación Pista Indira perteneciente a IDEAM acorde a la recomendación (Allen *et al.*, 2006) para las demás estaciones, y utilizó los datos de velocidad de viento a escala mensual reportados en IDEAM (2005).

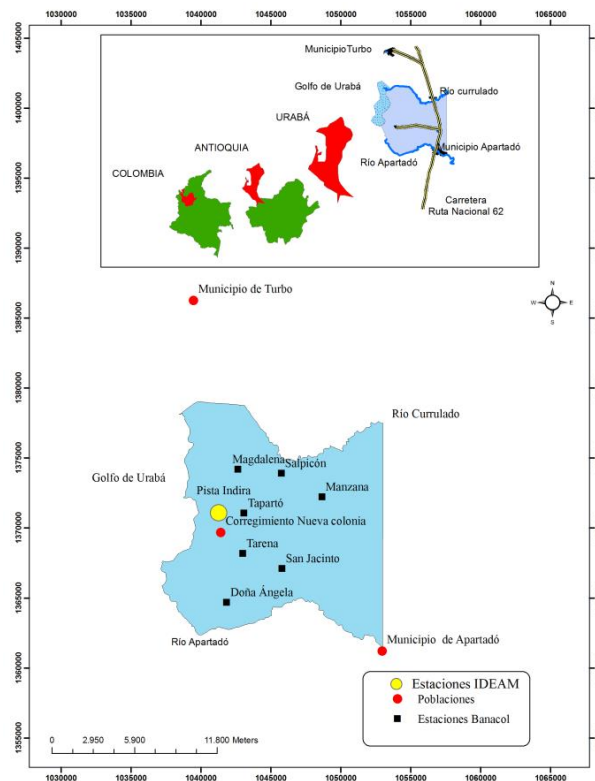


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio y de las estaciones implementadas.

2.3. Datos de suelo

La capacidad de almacenamiento de agua del suelo (CA) se determinó a partir de la publicación en 2007 del estudio semidetallado de suelos de áreas potencialmente agrícolas en la zona de Urabá realizado por Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2007b), se realizó una digitalización en ARCGIS 9.3 a nivel de consolidación de la distribución de los diferentes tipos de suelo asignado la unidad predominante a cada estación para el extracto con una profundidad 0-100 cm con la finalidad de comprender los primero 30-45 cm donde se presenta 65-88% de concentración de raíces para el buen desarrollo de la planta y las profundidades mayores 100 cm en donde el sistema radicular debería tener niveles freáticos inferiores (Slyvio *et al.*, 2003; Araya, 2005; Turner *et al.*, 2007), encontrado para todas 100 mm, excepto para Tapartó que tuvo 150 mm.

2.4. Determinación de la evapotranspiración de referencia (Eto)

Se emplearon los métodos Hargreaves-Samani (1985) propuesto en (Hargreaves y Samani, 1985), Hargreaves recomendado por Allen *et al.* (2006) y los ajustes lineales de los métodos anteriores al método Penman- Monteith (PM).

En la siguiente expresión se presenta el método Hargreaves y Samani (1985) (Hargreaves y Samani, 1985):

$$ET_{oHS1985} = 0.0135 * (T_{med} + 17.78) * R_s \quad (1)$$

$ET_{oHS1985}$ = evapotranspiración potencial diaria ($mm\ d^{-1}$), T_{med} = temperatura media ($^{\circ}C$), R_s = radiación solar incidente en ($mm\ d^{-1}$).

El método Hargreaves (Allen *et al.*, 2006) tiene la siguiente expresión:

$$ET_{oHargreaves} = 0.0023 * R_a * (T_{media} + 17.8) * \sqrt{(T_{max} - T_{min})} \quad (2)$$

$ET_{oHargreaves}$ = evapotranspiración potencial diaria ($mm\ d^{-1}$), T_{media} = temperatura media ($^{\circ}C$), T_{min} = temperatura mínima ($^{\circ}C$), T_{max} = temperatura máxima, ($^{\circ}C$) R_s = radiación extraterrestre ($mm\ d^{-1}$).

2.5. Modelo lineal PM

Cuando se utilizan métodos alternativos diferentes al Penman-Monteith (PM) para el cálculo de Evapotranspiración Allen *et al.* (2006) recomiendan aplicar un modelo lineal entre PM y los métodos utilizados antes de aplicarlo en una nueva región verificando la validez de sus resultados e incorporar características climáticas que constituyen el término aerodinámico en la estimación de ET_o , para esto se calculó ET_o con PM con la siguiente expresión:

$$ET_o PM = \frac{0.408 * (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 * u_2)} \quad (3)$$

EToPM = evapotranspiración de referencia (mmd⁻¹), R_n= radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² d⁻¹), G= flujo de calor de suelo (MJ m⁻² d⁻¹), T= temperatura media del aire a 2 m de altura (°C), u₂ = velocidad del viento a 2m de altura (m s⁻¹), e_s= presión de vapor de saturación(Kpa), e_a= presión real de vapor (Kpa), e_s-e_a= déficit de presión de vapor (Kpa), Δ= pendiente de la curva de presión de vapor (KPa° C⁻¹), γ= Contantes psicrométrica (KPa° C⁻¹), por ser a escala diaria el valor G=0 recomendación presentada en Allen *et al.* (2006). Se utilizaron datos de velocidad de viento reportados por IDEAM (2005) a nivel mensual, y para cada una de las siete estaciones se empleó los datos de radiación solar de estación Pista Indira, también se implementó la estimación de presión de vapor actual, por la ausencia de temperatura de rocío como lo sugieren Allen *et al.* (2006). En el modelo lineal para las siete estaciones se realizó un diagrama de dispersión para definir la relación que existe entre los datos de EtoPM y los calculados con EToHS1985 y ETo Hargreaves, con las siguientes expresiones:

$$EToPM = a + b * EToHargreaves \quad (4)$$

$$EToPM = a + b * EToHS1985 \quad (5)$$

Se obtuvo los coeficientes a y b de cada regresión, se denominaron a_{Ajust} y b_{Ajust} y se obtienen la EtoHS1985AJUS y EtoHargreavesAJUS como se presenta en las siguientes expresiones:

$$\text{EtoHS1985AJUST} = a_{\text{Ajust}} + b_{\text{Ajust}} * \text{EtoHS1985} \quad (6)$$

$$\text{EtoHargreavesAJUST} = a_{\text{Ajust}} + b_{\text{Ajust}} * \text{EtoHargreaves} \quad (7)$$

2.6. Estimación del error

A través de RCCME y R^2 se comparó el método EtoHS1985 , EtoHargreaves , EtoHS1985AJUST y $\text{EtoHargreavesAJUST}$ contra el método EtoPM , ya en estudios realizados por George *et al.* (2000) y Caí *et al.* (2007) indican que estos índices estadísticos determinan la bondad de ajuste al modelo PM y se verifica si el método empleado es confiable con valores $R^2 > 0.8$ (Caí *et al.*, 2007).

2.7. Balance hídrico climático (BHC)

El BHC se realizó con el método descrito por Thornthwaite y Mather (1955) también presentado por Ruíz *et al.* (2012) donde se afirma que este proceso se representa por la expresión:

$$HA_i = HA_{i-1} + P_i - ET_{oi} \quad (8)$$

Dónde: H_{Ai} = humedad almacenada del mes actual (mm); H_{Ai-1} = humedad almacenada del mes anterior (mm); P_i = precipitación del mes actual (mm); E_{Toi} = evapotranspiración de referencia del mes actual (mm). Se realizaron los balances hídricos con la evapotranspiración calculada con: $E_{toHS1985}$, $E_{toHargreaves}$, $E_{toHS1985AJUST}$ y $E_{toHargreavesAJUST}$, con la finalidad evaluar la influencia sobre los déficits y excesos.

2.8. Índices agroclimáticos

Los resultados de los balances hídricos utilizando cada uno de los métodos para calcular E_{to} se expresaron en índices climáticos (Cuadro 1). El índice de pluvial (IP) relaciona los excesos y déficits con la demanda evapotranspirativa del medio, lo que proporciona una clara descripción del clima (Thornthwaite, 1948). En las siguientes expresiones se presenta los índices de pluvial, humedad, de Aridez y concentración térmica.

$$IP = \frac{EXC - 0.6DEF}{E_{To}} * 100 \quad (9)$$

$$I_h = \frac{EXC}{E_{To}} * 100 \quad (10)$$

$$I_a = \frac{DEF}{E_{To}} * 100 \quad (11)$$

$$CE = \frac{E_{ToVerano}}{E_{To}} \quad (12)$$

Dónde: IP = índice de Pluvial (%); Ia = índice Aridez (%); Ih=Índice de Humedad (%)
 CE= concentración térmica (%), EXC = exceso hídrico (mm año⁻¹); DEF = déficit hídrico (mm año⁻¹); ET_O = evapotranspiración de referencia (mm año⁻¹), ETo Verano= evapotranspiración mm meses⁻¹ de verano. En cuadro 1 solo presenta la clasificación utilizada.

Cuadro 1. Clasificación agroclimática método de Thornthwaite.

Símbolo	Tipo de clima	Índice de Pluvial (%)
PA	Superhúmedo	>100
PB	Muy húmedo	80 a 100

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Evapotranspiración

Se obtuvieron los coeficientes a_{Ajust} y b_{Ajust} (Cuadro 2) que fueron implementados para calcular Eto_{HS1985AJUST} y Eto_{HargreavesAJUST}. Los coeficientes *a* y *b* del modelo de regresión lineal para el método HS1985 presenta valores para b_{Ajust} que oscilan 0.70-0.79 y para a_{Ajust} valores entre 1.58-1.17 sin mostrar diferencias significativas, situación que no se presenta para el método Eto_{Hargreaves} pues los valores b_{Ajust} oscilan entre 0.59-0.79 y los a_{Ajust} entre 2.12 a 1.17, las mayores variaciones fueron entre métodos para Magdalena y Tapartó.

Cuadro 2. Coeficientes aAjust y bAjust.

Estación	Método	bAjust	aAjust
Manzana	HS1985	0.74	1.44
Magdalena		0.70	1.28
San Jacinto		0.79	1.17
Doña Ángela		0.74	1.29
Salpicón		0.74	1.55
Tapartó		0.71	1.43
Tarena		0.71	1.58
Manzana	Hargreaves	0.75	1.34
Magdalena		0.59	2.12
San Jacinto		0.79	1.17
Doña Ángela		0.67	1.68
Salpicón		0.71	1.50
Tapartó		0.64	1.86
Tarena		0.68	1.61

En Cuadro 3 se presentan los estadísticos obtenidos con el modelo lineal entre EToPM y EToHS1985, EToHargreaves EtoHS1985AJUS y EtoHargreavesAJUST, los valores R^2 mínimos se obtuvieron para el método EtoHargreavesAJUST y EtoHargreaves con valores 0.15-0.40, mientras para el modelo EtoHS1985Ajust y EtoHS1985 presenta valores que oscilan entre 0.91 y 0.77 estos últimos se encuentra dentro del rango que se consideran aceptables de acuerdo a Caí *et al.* (2007), con lo anterior se reafirma la

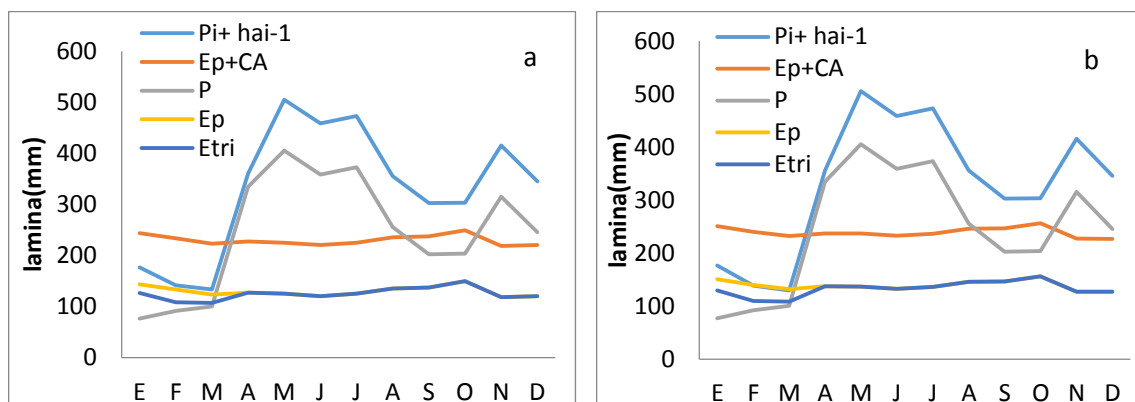
estrecha relación del factor energético de método PM pues utiliza la radiación solar medida, los valores de RCCME menores fueron para EtoHS1985AJUS con valores entre 0.27-0.47 mm d⁻¹ y EtoHS1985 con valores entre 0.46-0.56 mm d⁻¹ y siendo más favorable para la estación Manzana que para San Jacinto, en los métodos EtoHargreaves y EtoHargreavesAJUST los valores oscilaron entre 0.89-0.78 mm d⁻¹ y 0.82-0.74 mm d⁻¹ respectivamente y cabe destacar que al aplicar el ajuste a modelo lineal con PM se redujo el error en 28.6% y 6.3% para EtoHS1985AJUST y EtoHargreavesAJUST respectivamente, con respecto a lo antes nombrado al presentar un menor RCCME y mayor R² el método HS1985AJUS presenta los valores de evapotranspiración que más se ajustan a PM.

Cuadro 3. Índices estadísticos para la comparación de los métodos EtoHS1985, EtoHS1985AJUS (después del ajuste de modelo lineal), EtoHargreaves y EtoHargreaves AJUST (después del ajuste de modelo lineal).

Estación	Método	EtoHS1985	EtoHargreaves	EtoHSAJUST	EtoHargreavesAJUST
Manzana	RE	9.7%	17.8%	5.6%	16.8%
Magdalena		10.9%	21.1%	8.3%	16.4%
San Jacinto		12.1%	18.1%	9.8%	16.5%
Doña Ángela		11.5%	19.2%	8.8%	16.2%
Salpicón		11.6%	15.9%	6.7%	15.1%
Tapartó		11.4%	18.1%	9.1%	16.1%
Tarena		10.5%	17.0%	5.3%	16.2%
Manzana	RCCME	0.4584	0.8463	0.274	0.822
Magdalena		0.5122	0.8919	0.384	0.753
San Jacinto		0.5618	0.8378	0.471	0.799
Doña Ángela		0.5281	0.8579	0.426	0.788
Salpicón		0.5425	0.7782	0.336	0.754
Tapartó		0.5301	0.8145	0.438	0.746
Tarena		0.4851	0.8109	0.257	0.791
Manzana	R ²	0.910	0.188		
Magdalena		0.801	0.233		
San Jacinto		0.790	0.398		
Doña Ángela		0.799	0.314		
Salpicón		0.850	0.243		
Tapartó		0.766	0.283		
Tarena		0.910	0.147		

3.2. Balance hídrico climático (BHC)

En los climogramas de la Figura 2 se representa los BHC, en donde tuvo variaciones de humedad respecto a la época del año y se identificó un periodo seco comprendido de 1 a 3 mes y otro periodo húmedo 11-9 meses similar a lo encontrado por IGAC (2007a), el periodo seco está comprendido entre enero y marzo y el húmedo de marzo a diciembre situación reportada por Guarín (2011) ; Hurtado (2009); Roldán (2008); Salazar (2012) con un verano más prolongado hacia el Norte de la zona de estudio en consecuencia para la estación Salpicón para el mes Febrero y Marzo (HS1985AJUST) y para febrero (Hargreaves y HargreavesAJUST) presentó un déficit total, esto se debe a que se tiene valores anuales más altos de evapotranspiración y más bajos de precipitación, y en este mismo orden de ideas la diferencia en duración de los periodos con déficit o excesos hídricos entre las estaciones se deben a la configuración local de los valor: climático, suelo y fisiográfico que hacen variar la evapotranspiración y precipitación (Ruíz *et al.*, 2012).



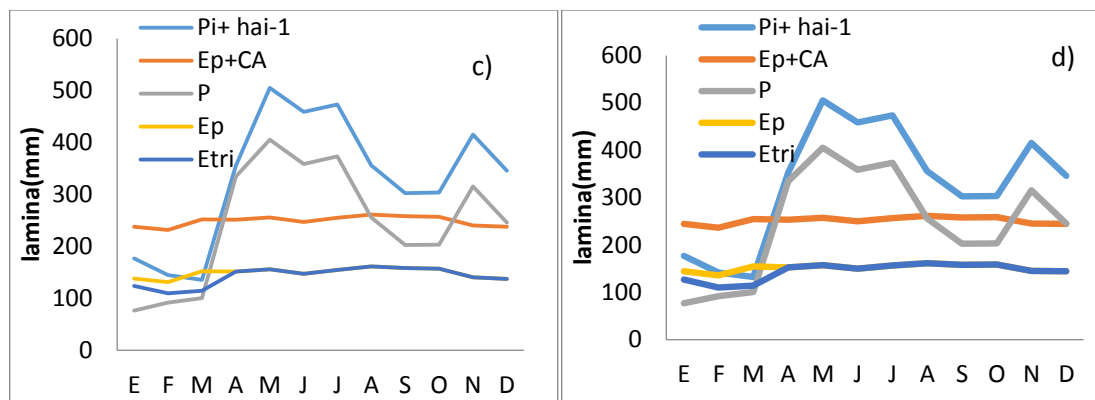


Figura 2. Balance hídrico con el método: a) EToHS1985 b) EToHS1985 AJUST c) EtoHargreaves d) EtoHargreavesAJUST estación Salpicón.

Con resultados obtenidos del BHC se generan mapas de excesos y déficits presentados en Figura 3 y 4 en donde los valores del déficits oscilaron entre 10-80 mm y los excesos entre 1400-1800 mmm, contemplados dentro de los rangos reportados para la zona por IGAC (2007a), las variaciones presentadas entre los diferentes métodos no mostraron diferencia significativas ($P > 0.05$) para estos dos factores, los mayores déficits se presenta hacia el Norte y los mayores excesos hacia el Sur de la zona de estudio estas diferencias de humedad (excesos y déficits) a nivel regional son provocadas por la variación espacial de la evapotranspiración de referencia y la precipitación así como por las características fisiográficas (Ruíz *et al.*, 2012).

La evapotranspiración calculada por el método HS1985AJUST al tener los menores valores de RCCME y mayores R^2 (Cuadro 4) presentó estimaciones con menores errores y más cercanos a la estimación del método PM, los factores del balance hídrico (exceso, déficit) de este método se correlaciona con los métodos EtoHagreaves y EtohagreavesAJUST en las Figuras 5 y 6 en la cual los déficit y los excesos del método EtoHargreavesAJUST presentan valores de R^2 mas alto con EtoHS1985AJUS que lo

obtenidos en el método EtoHargreaves, esto se debe principalmente a que EtoHargreavesAJUST mostro mejorías mayores al 6% en RCCME con el ajuste del modelo lineal con PM y por ende se correlacionara aceptablemente con el modelo EtoHS1985AJUST quien fue el que mejor se ajustó PM, por lo que se recomienda utilizar cuando no se cuente con datos de radiación solar.

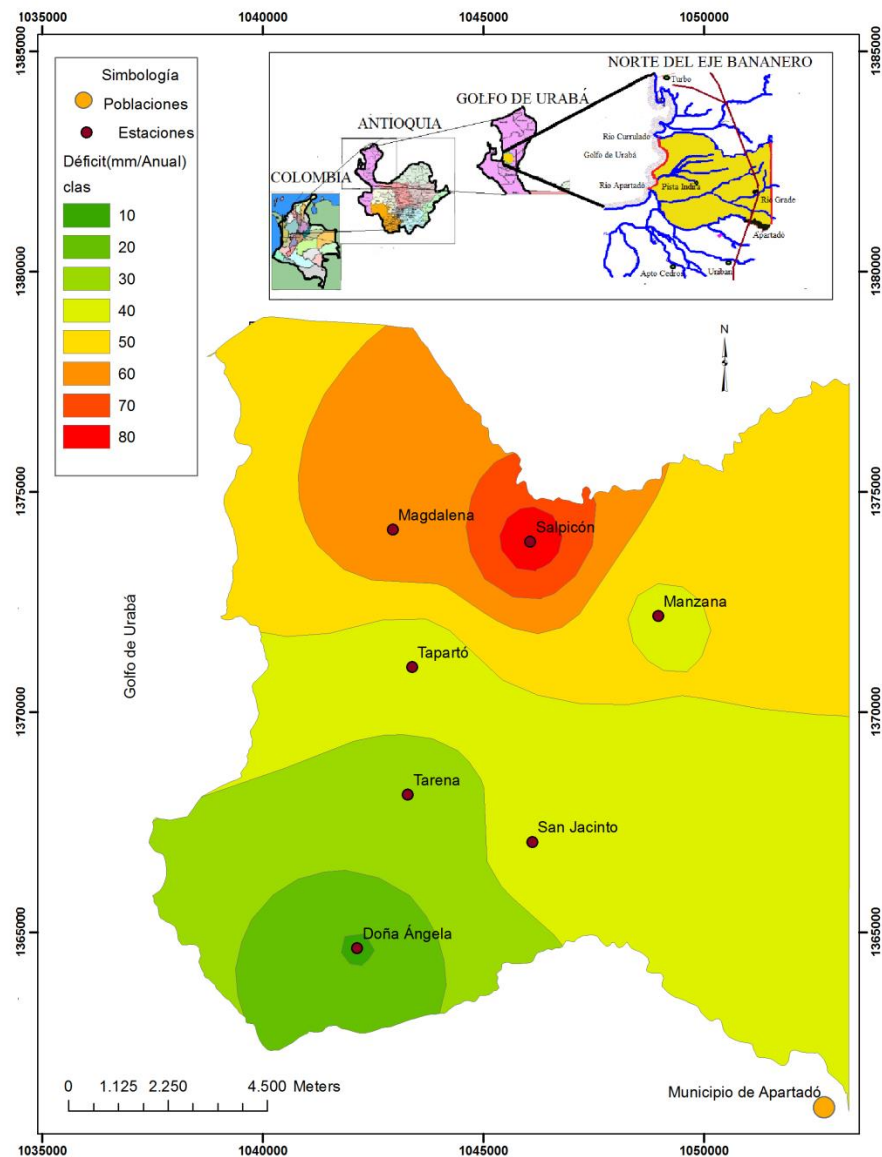


Figura 3. Distribución espacial de los déficits en la zona Norte del Urabá Antioqueño con EtoHS1985ADJUST.

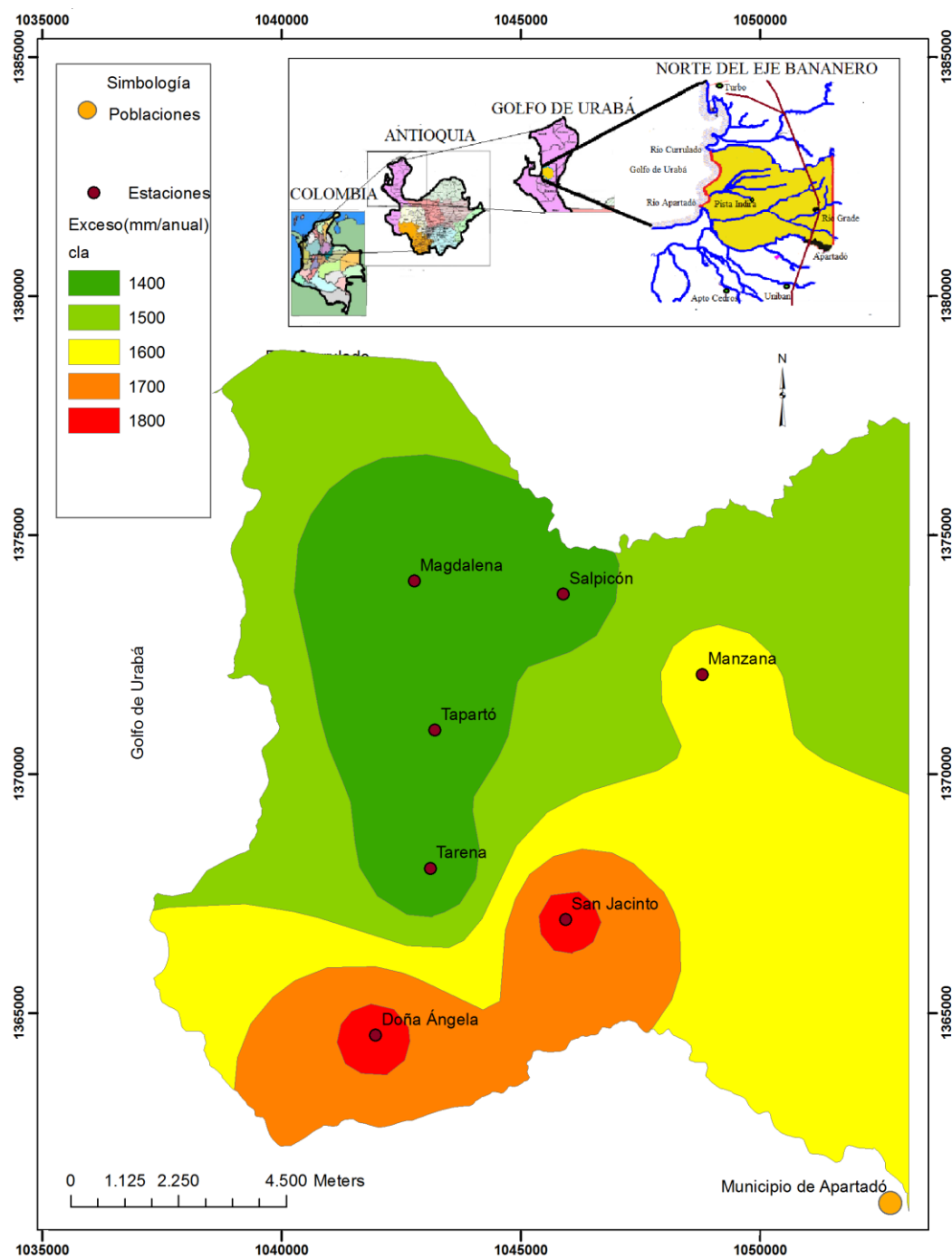


Figura 4. Distribución espacial de los excesos en la zona Norte del Urabá Antioqueño con EtoHS1985ADJUST.

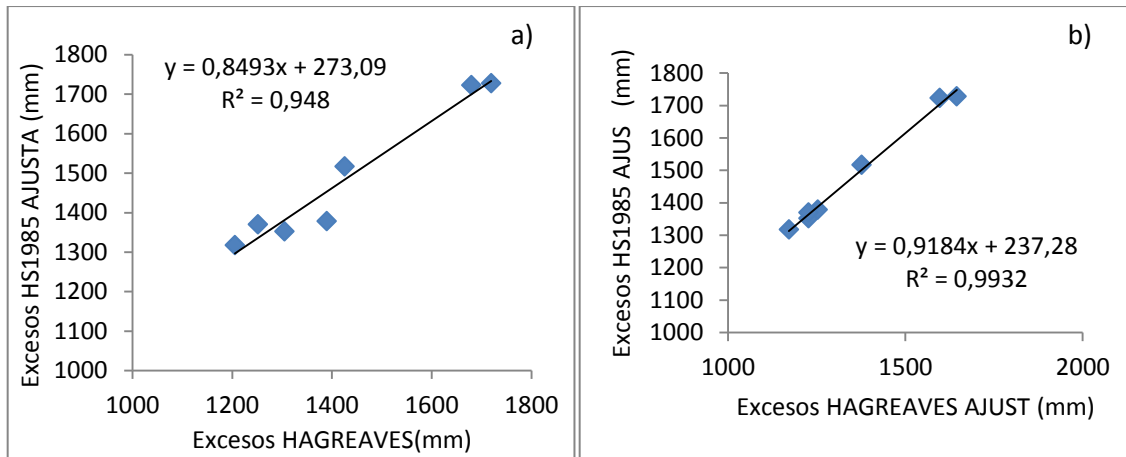


Figura 5. Relación excesos con respecto al método EtoHS1985AJUST a) EtoHagreaves
b) EtoHagreavesAJUST

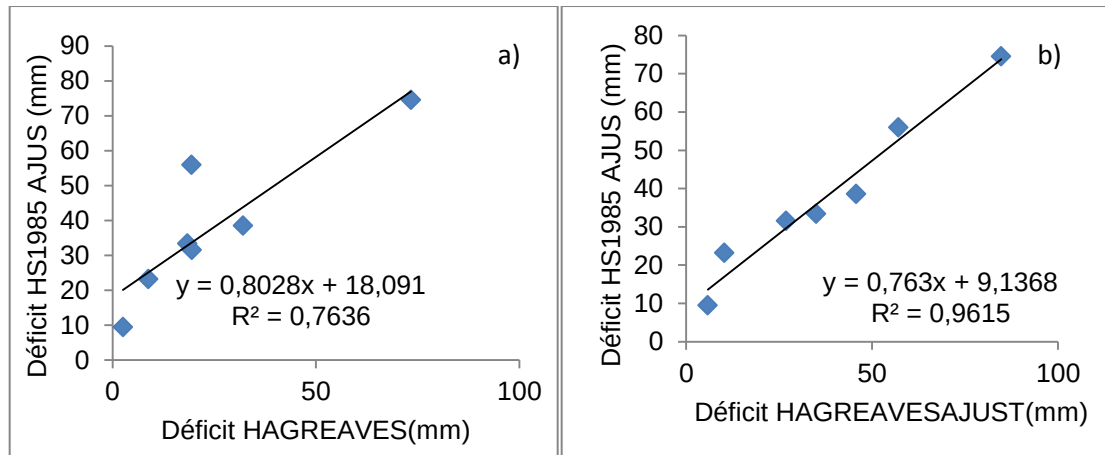


Figura6. Relación déficits con respecto al método EtoHS1985AJUST a) EtoHagreaves
b) EtoHagreavesAJUST.

Acorde a los presentado en Figura 7 la magnitud de los excesos aumenta conforme aumenta la precipitación, presentando un R^2 de 0.9274 el cual se encuentra dentro del rango de aceptación reportado por Caí *et al.* (2007). No se presenta relaciones significativas entre el déficit y la temperatura y el déficit y la precipitación anual.

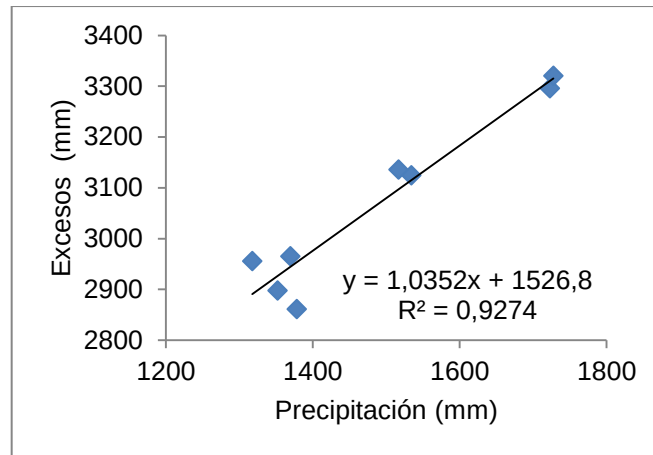


Figura 7. Relación entre los excesos y la precipitación.

Con el valor anual de los déficits, excesos y de la evapotranspiración se obtuvieron los índice de humedad, pluvial, aridez y concentración térmica de los cuales solo presenta variaciones entre súper húmedo (PA) y muy húmedo (PB) el índice fluvial (Cuadro 4), para el método HS1985 todas las estaciones se clasifican como súper húmedos, con el método HS1985AJUST todas son súper húmedo excepto Tarena que se clasifica como muy húmedo, para EtoHargreaves todas son súper húmedas excepto Tarena y Salpicón y con EtoHargreavesAJUST todas son muy húmedas excepto Doña Ángela y San Jacinto que son súper húmedas (Figura 8) es esta última la clasificación con menor disponibilidad hídrica, los demás índices no presentaron variaciones dentro del rango de la clasificación climática en los cuatro métodos empleados de evapotranspiración, y por ende tiene la misma clasificación climática. En Figura 8 para EtoHargreavesAJUST para la clasificación climática por el método de Thornthwaite tuvo dos regiones climáticas la primera muy húmeda (PB) y la segunda como súper húmeda (PA) ambas con deficiencia pequeña o nula (HA), clima cálido (TA) y concentración térmica normal (VA), Con lo anterior la formula climática para Doña Ángela y San Jacinto es PA HA TA VA y para

las demás como Magdalena PB HA TA VA esta tiene los valores más bajos de precipitación y mayor evapotranspiración mientras que en la clasificación presentada por (IDEAM, 2005) la zona de estudio fue clasificada en su totalidad como Muy Húmeda.

Cuadro 4. Clasificación climática.

Índice						
Agroclimático	Estación	HS1985	HS1985 AJUST	Hargreaves	Hargreaves AJUST	Simbología
Índice Pluvial	Doña					
	Ángela	112%	109%	104%	94%	PA
	San Jacinto	113%	106%	106%	96%	PA
	Tarena	89%	79%	69%	65%	PB
	Tapartó	88%	85%	81%	71%	PB
	Magdalena	84%	88%	93%	74%	PB
	Manzana	98%	91%	81%	75%	PB
	Salpicón	92%	81%	69%	66%	PB

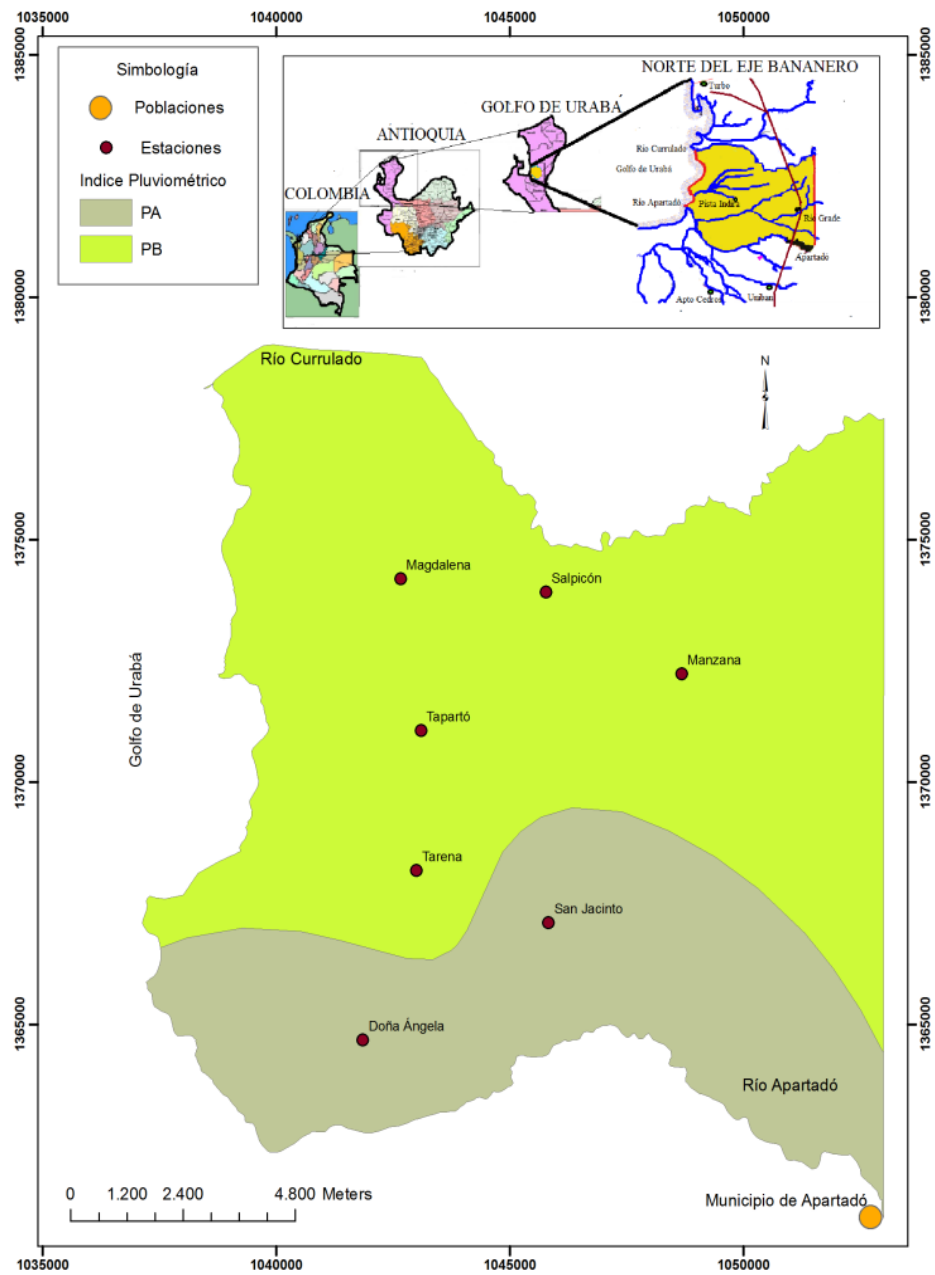


Figura 8. Distribución espacial los climas de la zona Norte del Urabá Antioqueño.

4. CONCLUSIONES

La zona de estudio presentan déficit entre enero y marzo de 10-80 mm mayores en la parte norte y de abril a diciembre excesos de 1400-1800 mm superiores en la parte Sur, la zona Norte del eje bananero del Urabá Antioqueño presenta dos regiones climáticas de acuerdo a la clasificación propuesta por Thornthwaite clasificándola como Muy húmeda en la parte Norte y como súper húmeda en la parte Sur occidental ambas con deficiencia pequeña o nula, clima cálido y concentración térmica normal.

El método que mejor estima la evapotranspiración es EtoHS1985AJUST seguido de HS1985, ya que al aplicar el modelo lineal con PM el método EtoHS1985AJUST redujo el RCCME en un 29.6% con respecto de EtoHS1985. A pesar de que los resultados obtenidos para la estimación de la EtoHagreavesAJUST para R^2 son bajos y presenta una alta relación con los factores influyentes del balance hídrico del método EToHS1985AJUS, quien presentó las mejores estimaciones para la evapotranspiración por lo tanto se sugiere su utilización para el cálculo del balance hídrico cuando no se disponga de valores de radiación solar.

5. LITERATURA CITADA

1. Allen, R. G.; Pereira L. S.; Raes D.; Smith M. 2006.N°56.Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Italia, Roma. FAO. 323 p.

2. Araya, M. 2005.Stratification and spatial distribution of the banana (Musa AAA, Cavendish subgroup, cvs' Valery'and'Grande naine') root system. In: Turner, D. W., Rosales F. E. (Ed). Banana root system: towards a better understanding for its productive management Proceedings of an International Symposium held. San José, Costa Rica on 3-5 November 2003. International Network for the Improvement of Banana and Plantain (INIBAP).83-103.
3. Caí, J.; Liu Y.; Lei T.; Pereira L. S. 2007.Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman–Monteith equation using daily weather forecast messages. Agricultural and Forest Meteorology. 145(1–2):22-35.
4. Campos, D. F. 2005.1° ed. Agroclimatología cuantitativa de cultivos. D.F, México. Trillas. 320 p.
5. Chiappe, R. 1998.Técnicas de evaluación de evapotranspiración potencial y balance hídrico. En: Ministerio del medio ambiente (ed). Técnicas de evaluación de evapotranspiración potencial y balance hídrico. Bogotá, Colombia.324-348.
6. Ferguson, B. K. 1996.Estimation of Direct Runoff in the Thornthwaite Water Balance. The Professional Geographer. 48(3):263-271.
7. George, B.; Shende S.; Raghuwanshi N. 2000.Development and testing of an irrigation scheduling model. Agricultural water management. 46(2):121-136.
8. Guarín, G. W. G.2011. Impacto de la Variabilidad Climática en la Producción de Banano en el Urabá Antioqueño. Tesis de grado en Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Medellín, Colombia. 145 p.

9. Hargreaves, G. H.; Samani Z. A. 1985. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. American Society of Agricultural Engineers (Microfiche collection)(USA).1(2):96–99.
10. Holdridge, L. R. 1947. Determination of World Plant Formations From Simple Climatic Data. Science. 105(2727):367-368.
11. Hurtado, A. F. 2009. Estimación de los campos mensuales históricos de precipitación en el territorio colombiano. Tesis de grado en Magister en Ingeniería - Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 104 p.
12. IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2005. Atlas climatológico de Colombia. Bogotá, Colombia. 217 p.
13. IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2007. Estudio general de suelos y zonificación de tierras departamento de Antioquia. Bogotá, Colombia. 922 p.
14. IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2007. Estudio semidetallado de suelos de las áreas potencialmente agrícolas. Urabá Departamento de Antioquia. Bogotá, Colombia. 489 p.
15. Kerkides, P.; Michalopoulou H.; Papaioannou G.; Pollatou R. 1996. Water balance estimates over Greece. Agricultural Water Management. 32(1):85-104.
16. Köppen, H. W. 1918. Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf. Petermanns Mitteilungen. 64:193-203.
17. Pereira, A. R. 2005. Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. Bragantia. 64(2):311-313.
18. Roldán, P. A. V. 2008. Modelamiento del patrón de circulación de la bahía Colombia, Golfo Urabá. Implicaciones para el transporte de sedimentos. Tesis de grado

en Magíster en Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Escuela de Geociencias y Medio ambiente, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Medellín, Colombia.113 p.

19. Ruíz, O. Á.; Arteaga R. R.; Vázquez P. M. A.; Ontiveros C. R. E.; López L. R. 2012.Inicio de la estación de crecimiento y periodos secos en Tabasco, México. Tecnología y Ciencias del Agua. 3(2):85-102.

20. Salazar, M. C. A. 2012.Los sistemas Agrícolas en el cultivo del Banano: Aplicados a las zonas Bananeras de Colombia. Medellín, Colombia. Universidad Nacional de Colombia.592.p.

21. Sharma, B. R.; Rao K.; Vittal K.; Ramakrishna Y.; Amarasinghe U. 2010.Estimating the potential of rainfed agriculture in India: Prospects for water productivity improvements. Agricultural water management. 97(1):23-30.

22. Slyvio, B.; Rosales F. E.; Pocasangre L. E. 2003.Development and formation of the plantain root. In: Turner, D. W. (Ed). Sistema Radical del Banano: hacia un mejor conocimiento para su manejo productivo Memorias de un simposio internacional.San José Costa Rica.75-82.

23. Thornthwaite, C. W. 1948.An approach toward a rational classification of climate. Geographical review. 38(1):55-94.

24. Thornthwaite, C. W.; Mather R. J. 1955.The water balance. Climatology, laboratory of climatology Drexel Institute of Technology.8:1-104.

25. Turner, D. W.; Fortescue J. A.; Thomas D. S. 2007.Environmental physiology of the bananas (Musa spp.). Brazilian Journal of Plant Physiology. 19(4):463-484.

26. WMO (World Meteorological Organization). 1981.134 ed. Guide to agricultural meteorological practices. Geneva, Switzerland.799 p.

CAPÍTULO 5. INICIO DE LA ESTACIÓN DE CRECIMIENTO Y PERIODOS

SECOS EN EL NORTE DEL EJE BANANERO DEL URABÁ ANTIOQUEÑO

Ana María Toro Trujillo¹, Ramón Arteaga-Ramírez^{1*}, Mario Alberto Vázquez-Peña¹,

Laura Alicia Ibáñez Castillo¹

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y uso integral del agua. Universidad Autónoma

Chapingo. 56230. Chapingo, Estado de México. namariatoro@hotmail.com,

libacas@gmail.com mvazquezd@correo.chapingo.mx, Autor por correspondencia:

arteagar@correo.chapingo.mx

RESUMEN

Se estudió el inicio de la estación de crecimiento (IEC) en la zona Norte del eje bananero del Urabá a partir de tres criterios después de que para todos se presente el inicio de lluvias apreciables (IL), estos fueron: el primero estuvo en función de la cantidad de lluvias, el segundo de la evapotranspiración del cultivo y el tercer por la presencia de periodos secos (PS). Con el Instat versión 3.37 se analizó la probabilidad de excedencia de PS con una duración de 5 días, 10 días, los días para que la primera capa llegue a Punto Marchitez (PM) y los días para que la primera y segunda capa llegue a PM. Se calculó la longitud de estación de crecimiento EC relacionando los tres criterios y la ocurrencia de periodos secos en 10 días, los resultados muestran que los inicios tardíos (20%) de la EC en el criterio 1 para la zona es el 6 de abril (96), para el 2 el, 1 de abril (91), y para el 3, 13 de Mayo (133) y las fechas de la siembra óptima con el criterio 3 tanto para resiembras como renovación de plantaciones son: 25 de abril, 18,11,10,17,21,22 de Mayo para Doña Ángela, San Jacinto, Manzana, Tarena, Tapartó,

Salpicón, y Magdalena respectivamente. El comportamiento espacial del inicio de la EC temprano está en función del régimen de lluvia con una tendencia Sur Occidente rumbo Norte para el criterio 1 y para el 2 está en función de la evapotranspiración anual con una tendencia Sur Oriente rumbo Norte. Las estaciones ubicadas al Noroccidente de la zona de estudio presentaron mayor probabilidad de presentar PS para las diferentes duraciones evaluadas e igual que los valores más bajos de EC. El uso de la EC obtenida por el criterio 3 y la ocurrencia de PS de 10 días produce una técnica confiable para la planificación de renovaciones de plantaciones en la zona Norte de eje bananero, se requiere riego suplementario para el ajuste progresivo de la densidad de población o resiembras.

Palabras Claves: estación de crecimiento, balance hídrico, periodo seco, cadena de Markov, instat.

1. INTRODUCCIÓN

El clima a nivel mundial es el principal obstáculo para la agricultura y su planificación. Aunque las diversas variables climáticas interactúan con el cultivo de formas complejas, la precipitación es el factor limitante en la mayor parte de los trópicos (Stern y Coe, 1984). Los estudio sobre el comportamiento del régimen de lluvia han aumento debido a la falta de planificación agrícola presente en la actual expansión de la agricultura de regadío, el desarrollo de la industrialización y el rápido crecimiento de la población (Deni *et al.*, 2008).La agricultura moderna se caracteriza por el uso creciente de nuevas tecnologías para contrarrestar los excesos y déficit del régimen hídrico en todas las etapas de la producción agrícola, pero los cultivos de regadío siguen siendo una

minoría (Nelson *et al.*, 2009), especialmente con respecto a las grandes áreas plantadas, pues estas tecnologías deben utilizarse de manera racional para justificar su inversión. El riego es una de las tecnologías que asegura altos rendimientos y calidad de los productos agrícolas, los proyectos de riego requieren una adecuada estimación de la distribución de la precipitación, determinación de ocurrencia de periodos extremos, con el fin de contribuir más eficazmente a la planificación de riego suplementario, especialmente en regiones donde la agricultura de regadío presenta un considerable potencial de crecimiento (Ribeiro *et al.*, 2007). La zona de Urabá ante la vulnerabilidad que ha presentado con el fenómeno El Niño y el aumento de periodos secos que presenta los escenarios climáticos evaluados por IDEAM (2010a) se considera una zona potencialmente para la implementación de proyectos de regadío.

En este sentido la zona de Urabá requiere una caracterización de los patrones de precipitación que permiten identificar las zonas más sensibles y vulnerables como consecuencias del cambio climático (Lana *et al.*, 2008), igualmente conocer la oportuna preparación del suelo, selección del cultivo y variedad, determinar las fechas, métodos de siembra, ocurrencia de períodos de sequía perjudiciales para la agricultura, sobre todo en períodos donde las plantas tienen necesidad de agua que tendrá un efecto grave en el rendimiento final (Assad *et al.*, 1993).

Stern y Coe (1984) plantean que el modelamiento para la cadena de markov produce mejores resultados en registros cortos de 10-15 años que otros modelos requieren un mayor número para obtener errores pequeños, así mismo es un modelo flexible, estima con facilidad los parámetros (Eidsvik, 1980). En este sentido varios

autores han realizado importantes aportaciones, entre ellas resulta valioso mencionar las investigaciones de: OtienoOngala *et al.* (2012), Barrantes y Vega (2003), Mupangwa *et al.* (2011) y Luengo *et al.* (2002). En la mayoría de los casos, la ocurrencia de lluvia diaria puede ser descrito por la cadena de Markov de primer orden (Deni *et al.*, 2008). Sin embargo , hay casos en que este modelo ha fallado para adaptarse a la los datos observados y como una alternativa , el uso de la cadena de Markov de orden superior a menudo mejorara estas deficiencias (Hayhoe, 2000), en este sentido los estudios sobre la identificación del mejor orden de la modelos de cadena Markov para describir la distribución de periodos de húmedo y seco se ha llevado a cabo por una serie de investigadores en varios lugares , como en el caso de Fleming (2007) y Wan *et al.* (2005) para Canadá; Anagnostopoulou *et al.* (2003) para Grecia, Harrison y Waylen (2000) para Costa Rica.

Yu *et al.* (2013) plantean la necesidad creciente de estudios a escala regional y global que cuantifiquen el riesgo de sequía asociado con la estación de crecimiento, pues Hachigonta *et al.* (2007) manifiestan la utilidad de la identificación óptima de la temporada de desarrollo radica en la planificación de la oportuna preparación de las tierras de cultivo y la reducción de los riesgos involucrados en la siembra demasiado pronto o demasiado tarde y con menor riesgo de periodos secos.

En la literatura hay dos enfoques principales para el establecimiento del criterio de temporada de crecimiento a través de precipitación: una definición absoluta, sobre la base de un valor umbral determinado, y una definición relativa, basado en una cierta proporción con respecto a la lluvia total, en este sentido Odekunle (2004) propone la

probabilidad de lluvia diaria con un umbral de 0.85 mm para distinguir entre lluvioso y seco y considera confiable la determinación de la época de crecimiento cuando se presente una probabilidad de lluvia mayor a 0.5 y evalúa en conjunto la definición relativa (comienzo cuando el intervalo de 5 días alcance 7-8% y finaliza cuando alcance 90% de precipitación total acumulada). En trabajos distintos se utilizaron criterios a partir de evapotranspiración y balance hídrico como los estudiados por Bannayan *et al.* (2011) quienes definen la fecha de inicio para el Norte Nigeria, donde la precipitación diaria acumulada supera el 0.5 de la evapotranspiración potencial acumulada para el resto de la temporada, siempre que no se produzcan periodos secos mayores de 5 días inmediatamente después de esa fecha de siembra. Raes *et al.* (2004) y Mugalavai *et al.* (2008) utilizan un modelo de balance de agua en el suelo para determinar el índice de crecimiento de la temporada con el fin de optimizar las fechas de siembra y recomendado como criterio una cierta cantidad de lluvia (40 mm) en 4 días, como la cantidad necesaria para estar a capacidad de campo e iniciar la temporada de crecimiento. De una manera similar Bannayan *et al.* (2011) determinan la fiabilidad de cuatro enfoques para definir el comienzo y el final de la creciente temporada: con la temperatura, la combinación de la temperatura y precipitación hasta alcanzar la capacidad de campo, balance hídrico hasta alcanzar la capacidad de campo, la disponibilidad de agua en la capa superior del suelo siendo el balance hídrico el mejor. En este sentido a medida que el agua es el principal factor en el método de balance de agua es más prometedor para un plan de cultivo. Los objetivos fueron determinar la fecha óptima de inicio de estación de crecimiento para resiembras y nuevas plantaciones a partir de varios criterios, la probabilidad de ocurrencia de periodos secos con

diferentes criterios y a partir de estos encontrar la estación de crecimiento con fin de minimizar los riesgos de cultivo de banano en zona de Urabá.

2. METODOLOGÍA

2.1. Localización de zona de estudio

La zona de bananera de Urabá, se extiende aproximadamente entre los $7^{\circ}53'8.55''$ a los $8^{\circ}0'40.09''$ de latitud Norte y entre los $76^{\circ}37'57.25''$ y $76^{\circ}44'22.13''$ de longitud Oeste, comprendida entre los Ríos curulao y Apartado, la precipitación es Bimodal un período de lluvia con picos entre mayo-julio y otro pico más corto de octubre a noviembre (Salazar, 2010) y de los meses de diciembre a finales a abril se presenta el periodo seco.

2.2. Información climatológica

Las variables empleadas son datos diarios de precipitación (mm) (2004-2012) y evapotranspiración anual para cada estación calculada por el método de Hargreaves y Samani (1985). En el Cuadro 1 se presentan la ubicación de las estaciones.

Cuadro 1. Características generales de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.

Estación	Longitud	Latitud	Periodo
Doña Ángela	7.89	-76.7	2004-2012
Magdalena	7.98	76.69	2004-2012
Manzana	7.96	-76.64	2004-2012
Salpicón	7.98	-76.66	2004-2012
San Jacinto	7.91	-76.66	2004-2012
Tapartó	7.95	-76.68	2004-2012
Tarena	7.93	-76.69	2004-2012

2.3. Datos de suelo

La capacidad de almacenamiento de agua del suelo (CA) se determinó a partir de IGAC (2007b), se realizó una digitalización en ARCGIS 9.3 a nivel de consolidación de la distribución de los diferentes tipos de suelo, para dos capa la primera definida por las profundidades comprendidas entre 30-45 cm donde se presenta 65-88% de concentración de raíces y la segunda capa definida para profundidades mayores 45 cm donde el sistema radicular deberá tener niveles freáticos bajos (Turner *et al.*, 2007).

2.4. Instat (versión 3.37)

Es un software que incorpora un paquete de métodos de probabilidad y estadística, así como una gama de herramientas que facilitan el manejo y procesamiento

de datos climáticos aplicables a la agricultura; ha sido generado por la universidad de Reading, Inglaterra, y empleado en numerosos trabajos de climatología agrícola (Raes *et al.*, 2004; Stern *et al.*, 2006)

2.5. Determinación de la fecha de inicio de las lluvias apreciables (IL)

Después de las primeras lluvias del año, es común que se presenten días sin precipitación apreciable (Stern *et al.*, 2006), por tal motivo, para evitar falsos inicios de la estación de crecimiento, se considera conveniente que los resultados del balance hídrico sean los que determinen la fecha en las que lluvias tienen incidencia sobre la humedad almacenada del suelo (Raes *et al.*, 2004; Stern *et al.*, 2006), por esta razón a través del INSTAT versión 3.37 se calculó la fecha del inicio de lluvias apreciables (IL) como aquella que se presenta cuando el balance hídrico tengan $HA_i > 0$ en ascenso continuo y como mínimo una probabilidad de excedencia de 60% , en el INSTAT se ingresaron los valores diarios de precipitación, el valor anual característico de evapotranspiración(ETo) para la estación considerada y la capacidad de almacenamiento de agua suelo considerando en conjunto la primera y segunda capa.

Después de calculada IL se aplican los tres criterios propuesto para el inicio de la estación de crecimiento (IEC).

2.6. Criterios de inicio de la estación de crecimiento

A continuación se presentan los criterios para el establecimiento IEC, se utilizarán a partir de que se presente la fecha del inicio de lluvias apreciables (IL) anteriormente mencionada:

- Criterio 1 (lluvias): El primer día después de que se presenta IL y que la lluvia acumulada por cuatro días lleve la primera capa de punto de marchitez permanente a capacidad de campo, dicha lluvia se calculó con la información presentada por (IGAC, 2007a) a partir del % de humedad CC, PM, densidad aparente .
- Criterio 2 (Evapotranspiración): El primer día después de que se presenta IL y que la lluvia supera por cuatro días 0.5 de evapotranspiración ($P > 0.5 E_{To}$) según definición de periodo seco presentado en Lasso (2003).
- Criterio 3 (Periodo seco): El primer día después de que se presenta IL y que la lluvia acumulada por cuatro días lleve la primera capa desde punto de marchitez permanente a capacidad de campo y no se presenten periodos con más de cinco días secos en 35 días siguientes, ya que la duración media de la etapa inicial de crecimiento de la mayoría de los cultivos es de 30 días (Allen *et al.*, 1998) y entendiéndose como un día seco aquel donde la precipitación diaria es menor a 0.5 evapotranspiración (Lasso, 2003)

2.7. Tratamiento probabilístico del inicio de la estación de crecimiento y del inicio de lluvias.

Para conocer el día del año en que IEC y IL se presenta a los niveles de probabilidad de excedencia del 20,40,60, 80%, se aplicó la distribución Normal estándar inversa. De este modo, el día (X_i) en que IEC e IL (Said y Zarate 2001) está dada por:

$$X_i = \mu + z * \sigma \quad (1)$$

Z variable aleatoria estandarizada, X_i : día Juliano, μ : media de días Julianos en los que ha iniciado la estación de crecimiento para los años de los que se disponen datos, y σ : desviación estándar.

Mugalavai *et al.* (2008) indican que para determinar una temporada temprana es al 80%, Normal al 50% o tardía al 20% de probabilidad de excedencia.

2.8. Definición de un día seco

Mupangwa *et al.* (2011) presentan un umbral para definición de día seco de 5 mm basados en conceptos de evapotranspiración al igual que Lasso (2003) por lo tanto para objetos de este estudio la definición como día seco es cuando la precipitación no es mayor de 0.5 de la evapotranspiración.

2.9. Cálculo de la probabilidad de ocurrencia de periodos secos con duración 5, 10 días secos y la duración critica para el cultivo de banano.

Esta fase se realizó con INSTAT (Stern *et al.* 2006), primero se resumieron los datos de precipitación al considerar que el umbral no supere 0.5 del valor típico de evapotranspiración máximo (Epmax) para cada estación, de esta manera se obtuvo el número de días secos y húmedos para cada uno de los años. Los datos de precipitación se ajustaron al modelo de Markov (Luengo *et al.*, 2002) y se calculó la probabilidad de ocurrencia de periodos de sequía con duración de 5, 10 días secos, la duración critica para que la primera capa alcance PM y la duración critica para que en conjunto la primera y segunda capa alcance PM.

2.10. Período de sequía crítico

Fischer *et al.* (2013) propusieron que el período más crítico de sequía se determina por la relación entre la humedad del suelo disponible y la tasa de transpiración de la vegetación, ya que el desarrollo de la planta se ve obstaculizado o en el peor de los casos se marchita. La longitud del periodo crítico seco (ncr) (días) puede calcularse en cada punto del espacio como la relación de la humedad del suelo disponible (θ mm) y la evapotranspiración del cultivo (ETc) en el periodo medio de desarrollo donde es mayor la demanda (mm día^{-1}):

$$n_{Cr} = \frac{\theta}{ETc} = \frac{(Cc - PM) * Da * Pcapa}{Epmedia * Kc(Banano)} \quad (2)$$

Cc: contenido de humedad a capacidad de campo PM= contenido de húmeda en punto de Marchitez permanente, Da: densidad aparente; Pcapa: profundidad de la capa θ : humedad aprovechable, Epmedia: es evapotranspiración de referencia media anual, Kc (Banano)=1.2 (Allen *et al.*, 2006). Los valores de periodos críticos para la primera capa y en conjunto de ambas se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Características empleadas en el balance hídrico, criterios de inicio de temporada de crecimiento y periodo crítico para el cultivo.

Estación	Unidad de Suelo	CA (cm)		Ep Máxima (mm)	Ep Media (mm)	ETc (mm)	n crítico cultivo		CA Total
		1° Capa	2° Capa				1°	1° y 2°	
							Capa	Capa	
							(días)	(días)	
Doña Ángela	CVTEa	50	78	5.7	4.5	5.4	9.2	23.7	128
Magdalena	CVTEa	50	78	5.3	4.3	5.1	9.7	25	128
Salpicón	CVTEa	50	78	5.4	4.9	5.9	8.5	21.9	128
San Jacinto	CVTEa	50	78	5.8	4.6	5.5	9.1	23.3	128
Tapartó	CVTCa	37.6	138.7	5.2	4.6	5.5	6.9	32.2	176
Tarena	CVTEa	50	78	5.5	4.7	5.7	8.8	22.6	128
Manzana	CVTEa	50	78	5	4.74	5.7	8.8	22.5	128

CA: capacidad de almacenamiento del suelo, 1°capa: Primera capa, 1° y 2° capa:

Primera y segunda capa, Epmax: Evapotranspiración anual máxima diaria típica de cada estación, Epmedia: Evapotranspiración anual media diaria típica de cada estación, ETc: evapotranspiración del cultivo.

2.11. Definición y clasificación de Sequía

En este estudio se define como periodo de sequía donde se presenten más de 5 días secos IDEAM (2005), y estén por encima de una probabilidad de 0.5. Anagnostopoulou *et al.* (2003) determinó una clasificación de la sequías en función a la duración de los periodos secos, Sequía corta 0-10 días, media 11-20, largo 21-30 y muy larga > 30 días.

2.12. Determinación de la longitud de la estación de crecimiento (EC)

La ocurrencia de periodos secos (PS) se relacionó con el inicio de la estación de crecimiento (IEC) para cada uno de los criterios para las diferentes duraciones de periodos secos, y se determinó como el final de la estación de crecimiento (FEC) cuando la probabilidad de ocurrencia de periodos secos superaran 50% para cada duración.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Determinación de la fecha de inicio de las lluvias

La fecha más probable de inicio de las lluvias apreciables (IL) fue el día juliano 84 (25 de Marzo) para Tarena, 86 (27 de Marzo) para Magdalena y Manzana, 80 (21 de Marzo) para Tapartó, Salpicón y San Jacinto, y Doña Ángela el 78 (19 de Marzo), son coherentes con los datos reportados por IDEAM (2005) donde las lluvias se presentan a finales de Marzo.

3.2. Inicio de estación de crecimiento (IEC)

Las estadísticas básicas calculadas para el IEC fueron la media y la desviación estándar para cada uno de los criterios evaluados, el criterio 1 presentó una desviación entre 8 (Magdalena) y 4 (Manzana). La media se encontró entre 88 (San Jacinto) y 93 (Magdalena). Para siete de las estaciones consideradas, la estación de crecimiento inició entre los días 80 y 113 en la mayor parte de los años (Figura 1a), se destaca un comportamiento contrastante entre Doña Ángela y San Jacinto esta última presentando valores de inicios más tempranos como efecto de la presencia del fenómeno de La Niña. El criterio 2 presentó una desviación entre 6 (San Jacinto) y 3 (Manzana). La media se encontró entre 90 (Manzana) y 81 (Doña Ángela). En las siete estaciones consideradas, la estación de crecimiento inició entre los días 78 y 95 en la mayor parte de los años como se presenta en la Figura 1 b, al tener la menor evapotranspiración y una buena oferta de agua la estación Doña Ángela tiene los menores valores de inicios. El criterio 3 presentó inicios más tardíos o mayores con respecto a los otros criterios, ya que tiene una desviación entre 36 (Magdalena) y 17 (Doña Ángela), la media se encontró entre 116 (Salpicón) y 101 (Doña Ángela). Para siete de las estaciones consideradas, la estación de crecimiento inició entre los días 82 y 196 en la mayor parte de los años como se muestran en la Figura 1c.

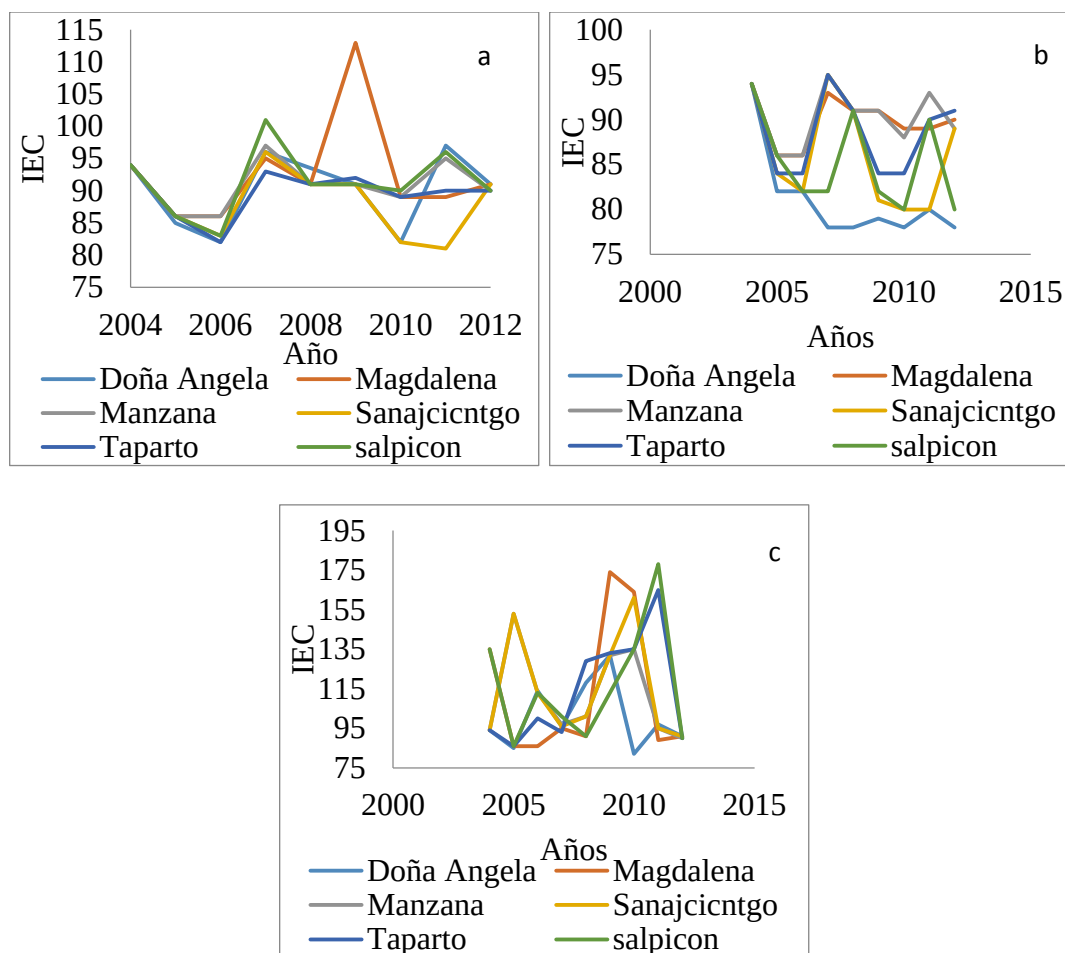


Figura 1.a) criterio 1 (Lluvia) b) criterio 2 (Evapotranspiración) c) criterio 3 (Periodo seco).

Se encontró que las estaciones que presentan inicio anticipado de la estación de crecimiento con el criterio 1 tienen correspondencia con los valores más altos de precipitación total anual; esto se corroboró con el valor de R^2 de 0.36, que se obtuvo entre la fecha media de inicio y la precipitación anual (Figura 2a), igualmente el inicio de temprano de la estación de crecimiento para el criterio 2 presenta una correspondencia con los menores valores de evapotranspiración (Figura 2b), al relacionar la fecha media de inicio de la estación de crecimiento con la

evapotranspiración media anual se encontró un R^2 0.54. Por lo que es lógico pensar que a mayor precipitación anual y menor evapotranspiración, ésta se distribuya en una estación de crecimiento más o menos prolongada; para que esto se cumpla debe existir inicio anticipado de la misma, el criterio 2 con una R^2 de 0.39 entre la latitud y el inicio anticipado de estación de crecimiento, tiene los menores valores para estaciones ubicadas hacia el Sur de la zona de estudio (Figura 2c). En cuanto al inicio tardío de la estación de crecimiento (criterio 2) presentó un R^2 (0.42) al relacionar la fecha media tardía con la evapotranspiración (Figura 2d). El 3 no presentan tendencias fuertes con escalas robustas con valores anuales, ya que implícitamente está más interrelacionado con la longitud de periodos secos y el efecto de la precipitación en la humedad de suelo, los cuales son altamente variables a escala diaria.

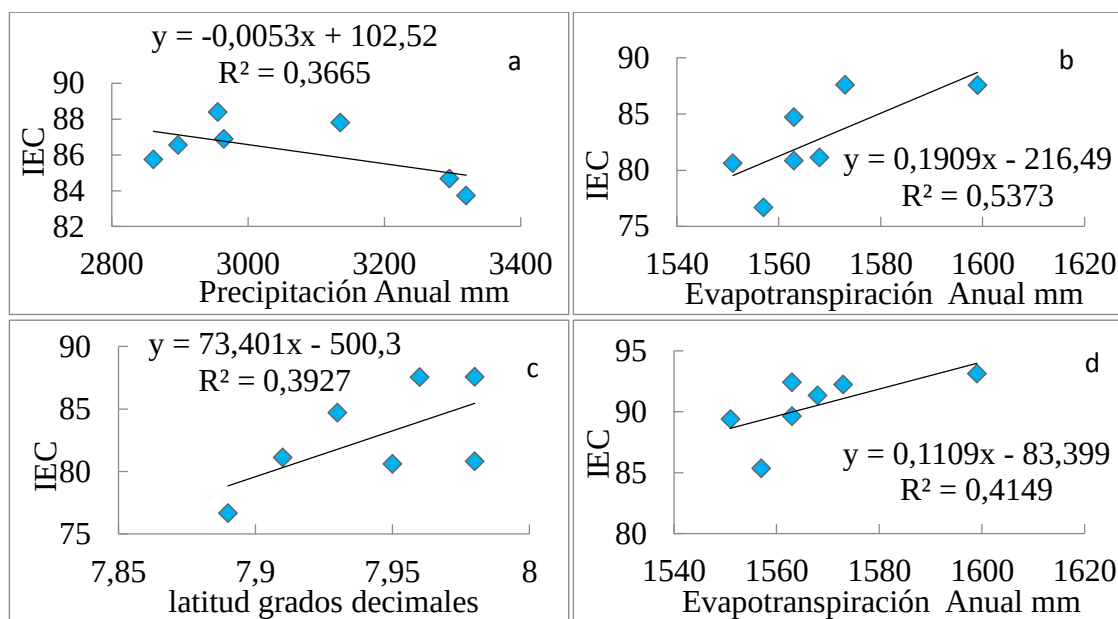


Figura 2. a) Relación entre inicio medio de la estación de crecimiento con precipitación anual criterio 1 b) evapotranspiración y criterio 2 (c) latitud y criterio 2 d) inicio tardío con evapotranspiración (criterio 2)

En el Cuadro 3 se muestran las fechas de IEC al 20, 40, 60 y 80% de probabilidad de excedencia, para todas las estaciones que se utilizaron en el estudio. Estos valores se interpretan de la siguiente manera: para la columna del 20%, los valores indican que en uno de cada cinco, el IEC ocurre en esta fecha o después para el área de influencia de esa estación, mientras que para el 60, 40 y 80% son dos, tres, y cuatro de cada cinco, respectivamente.

Cuadro 3. Probabilidad de inicio de la estación de crecimiento después de los días Julianos indicados.

Criterio	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Probabilidad	Inicio anticipado			Normal			Tardía					
excedencia	80			60			40			20		
Doña Ángela	85	77	87	88	80	97	91	82	105	95	85	115
San jancito	84	81	92	87	85	108	90	88	122	93	91	138
Manzana	88	88	93	90	89	107	92	91	118	94	93	131
Tarena	88	85	87	91	87	102	94	90	115	97	92	130
Tapartó	87	81	91	89	84	107	91	86	121	93	89	137
Salpicón	87	81	91	90	84	108	93	87	123	96	90	141
Magdalena	86	88	82	91	89	103	95	91	121	100	92	142

En el Cuadro 3 a medida que los días transcurren, disminuye la probabilidad de excedencia y por ende hay menos riesgo de tener un falso inicio de estación de crecimiento. El inicio de la estación de crecimiento al que corresponde el 80% de

probabilidad es la fecha de siembra temprana, el 40 y 60% son las fechas normales y el 20 % es la fecha de siembra tardía.

Las tres fechas de IEC obtenidas para cada estación brindan una idea confiable de las fechas de siembra con cierta probabilidad (misma probabilidad del inicio de la estación de crecimiento), el primer criterio garantiza de que exista suficiente humedad, el segundo de que como mínimo se estén satisfaciendo las necesidades hídricas, el tercero de que no se presenten periodos secos iniciando la etapa vegetativa del cultivo. Raes *et al.* (2004) determinaron que la elección de criterio para la determinación de la temporada de siembra depende del riesgo que quiera correr el agricultor.

Con ayuda del Cuadro 3 se generaron mapas de distribución espacial de dichas probabilidades (80%,20% y60% y 20%) consideradas tempranas, tardías y normales, se presenta en las Figuras 3, 4 y 5. En general todas las probabilidades de IEC en el criterio 3 (Figura 3) tienen una dirección Sur Occidente con rumbo Norte, para probabilidades 20,40, 60% mientras que para el 80 % no presenta un comportamiento espacial predominante, la estación Magdalena presenta un riesgo muy alto porque pasa de tener el menor inicio temprano al mayor inicio tardío, esto se debe a que es una estación que presenta mayor probabilidad de periodos secos y menor precipitación en presencia del fenómeno del Niño, por lo tanto la varianza es muy alta. El comportamiento del criterio 1 (Figura 4) tiene un aumento del IEC en dirección Sur Oriente rumbo al Norte, trata de seguir un comportamiento similar a la precipitación anual que está dirigido de Sur a Norte por el paso de ZCIT. Hachigonta *et al.* (2007) plantean que se requiere dar atención en investigaciones futuras a la fecha de inicio, intensidad de precipitación y

frecuencia de periodos húmedos para obtener la mejor fecha de siembra. La probabilidades para el criterio 2 (Figura 5) tienen un aumento del IEC en dirección Sur Occidente rumbo al Norte, trata de seguir el comportamiento de evapotranspiración anual que presenta los menores valores para Doña Ángela y los mayores para Manzana. Mupangwa *et al.* (2011) reportan que las diferencias entre los inicios tempranos y tardíos de estación de crecimiento, aumentan a medida que la precipitación es menor, caso de Magdalena que es la estación con menor oferta hídrica.

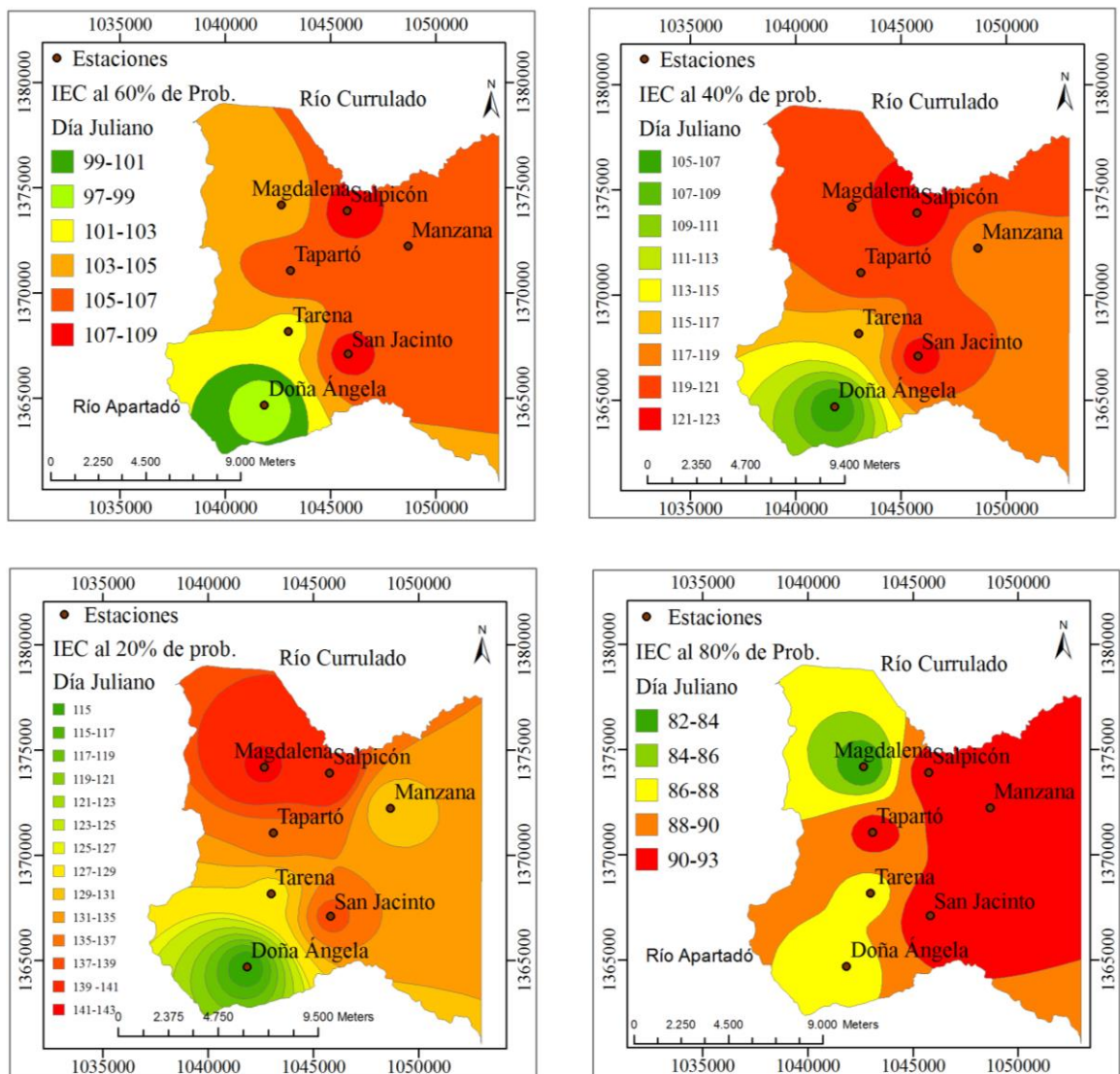


Figura 3. Distribución espacial del IEC para el criterio 3.

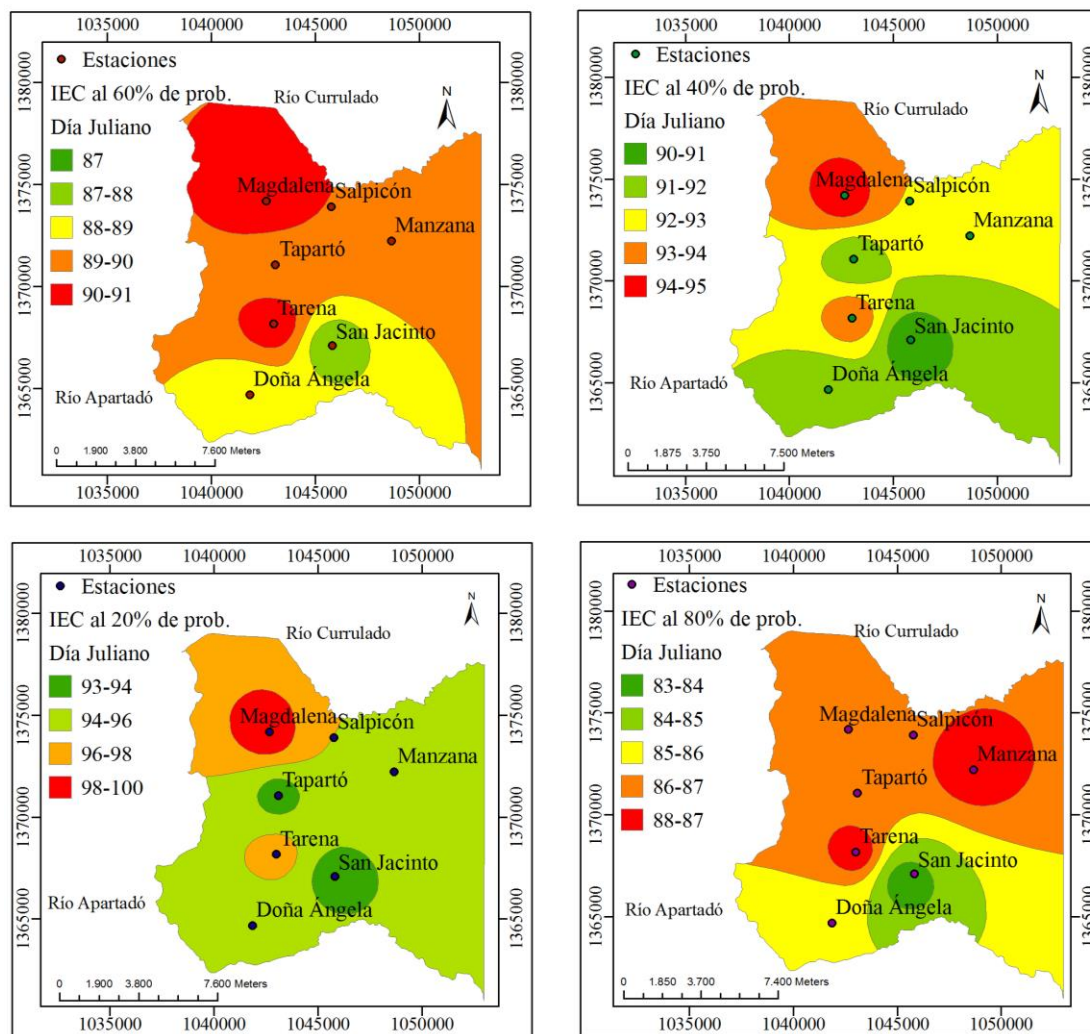


Figura 4. Distribución espacial del IEC para el criterio 1.

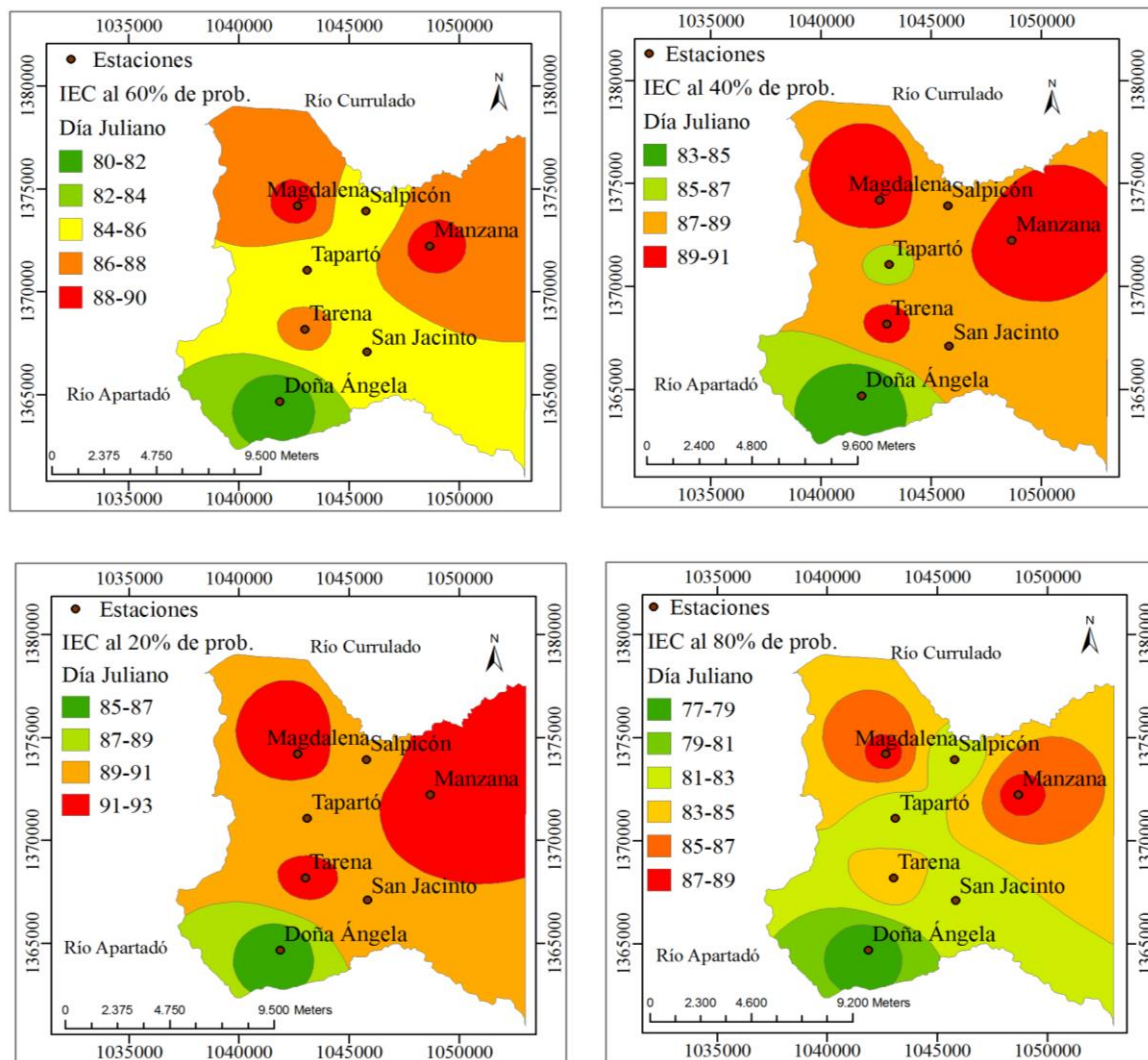


Figura 5. Distribución espacial del IEC para el criterio 2.

Para el uso del criterio 3 debido a su alta variabilidad se recomienda utilizar el menor riesgo presentado (20%), y su uso deberá estar ligado a las probabilidades de ocurrencia de periodos secos presentados más adelante. La fecha que promete mayores esperanzas de éxito en el establecimiento del cultivo es la que deriva del 20% de probabilidad de excedencia, sin embargo, las desventajas a las que se expondría el productor es que en las siembras tardías de este tipo, debido a la intensidad de las

precipitaciones y a que a principios del ciclo agrícola el suelo aún no está ocupado por las raíces de las plantas, existen muchas posibilidades de lixiviación y arrastre de sustancias nutritivas, mayormente en suelos del trópico, donde existe una baja capacidad de retención de humedad (Ruiz *et al* 2012), además de que se incrementarían los gastos por conceptos de control de sigotaka negra, que proliferan con mayor agresividad, una vez establecida la estación de crecimiento.

Los rangos de inicios tardíos (20%), son menores para el criterio 1 y son incluyentes a los obtenidos por el criterio 2, por lo tanto se puede intuir que después de que el suelo alcance capacidad de campo (criterio 1) el régimen de lluvia de la zona satisface las necesidades evapotranspirativas del cultivo de banano (criterio 2) y se encuentran por encima de la humedad fácilmente aprovechable en la zona de estudio. Los criterio 1 y 2 pueden ser excelentes indicadores para realizar labores como fertilización y subsolado o aireaciones superficiales pues garantizan un adecuado contenido de humedad en suelo. El productor pudiera establecer los criterio 1 y 2 con inicios tardíos para realizar resiembras y renovaciones de plantación pero estas presentarían altos riesgos a ser sometidos a periodos secos durante la fase vegetativa ya que el criterio 3 mostró la evidencia de periodos secos cercanos y prologados a la época donde los criterios 1 y 2 determinan el IEC.

3.3. Periodos secos e inicio de la estación de crecimiento

A partir de las curvas de probabilidad de ocurrencia de periodos secos (Cuadro 4) se presenta el inicio y finalización de periodos secos para una duración de 5 días, una

duración critica para la primera capa del suelo de cada estación, una duración de 10 días y una duración critica para de la primera y segunda capa del suelo de cada estación, igualmente se tiene el número total de días secos, en el caso más extremo de 5 días presenta un rango de 165 a 276 días superior al reportado de 210-182 por IDEAM (2005) .

Cuadros 4. Descripción del inicio y fin (días julianos) de los periodos de sequías para duración de 5 días, días críticos para la primera capa y 10 días.

			Ocurrencia	Doña		San				
Duración	Temp		de Sequía	Ángela	Magdalena	Manzana	Jacinto	Tapartó	Tarena	Salpicón
5	V	1°	Inicio	1	1	1	1	1	1	1
			Fin	115	124	115	112	118	121	121
	LL	2°	Inicio			226		211		193
			Fin		244	262		280	217	277
	LL	3°	Inicio	316		316	319	304		295
			Fin	366	366	366	366	366	366	366
	Número de días secos en Año			165	246	201	159	249	270	276
críticos 1° Capa	V	1°	Inicio	1	1	1	1	1	1	1
			Fin	88	100	97	91	106	100	97
	LL	2°	Inicio	358	352	349	355	337	340	337
			Fin	366	366	366	366	366	366	366
	Número de días secos en Año			96	114	114	102	135	126	126
10	V	1°	Inicio	1	1	1	1	1	1	1
			Fin	85	97	91	88	94	91	88
	LL	2°	Inicio	364	358	361	361	355	352	349
			Fin	366	366	366	366	366	366	366
	Número de días secos en Año			87	105	96	93	105	105	105

Temp= Temporada, V: Verano, LL: Lluvias, 1°,2° y3° sequía

Ruíz *et al.* (2012) determinan que cuando en la curva de probabilidad de ocurrencia se presenta $p > 0.5$ es una probabilidad confiable para la ocurrencia de periodos secos pues es importante señalar que las probabilidades de mayor interés en agricultura son las menores a 50%, que es cuando existe menos riesgo de periodos secos para los cultivos.

En el Cuadro 4 la duración de periodos secos con 5 días la sequías se pueden clasificarse en tres tipos: la primera presentan estaciones con dos periodos uno comprendido en época de verano desde (1) 1 enero hasta (115-112) 25 -22 de abril y otro al finalizar la época de lluvias comprendido entre (316-319) 12-15 de noviembre hasta 366 (31 de diciembre) como es el caso de Doña Ángela y San Jacinto , el segundo tipo presenta estaciones compuestas por tres periodos sequías uno en periodo de verano comprendido (1) 1 de enero hasta el (115-121) 15 de abril- 1 Mayo, otro en periodo de lluvias desde (193-226) 12 de junio - 14 de agosto hasta el (262-280) 19 de septiembre- 7 de octubre y último periodo de sequía finalizando la lluvias desde (304-316) 31 de octubre -12 noviembre hasta 31 de diciembre como es el caso de: Manzana, Tapartó y Salpicón. También existen estaciones con dos periodos de sequía uno en verano comprendido 1 de enero hasta (121-124) 1-4 de mayo y otro que es parcial o totalmente en el periodo lluvioso comprendido desde (217-244) 5 de agosto y 1 de septiembre hasta 366 (31 de diciembre) como lo son Magdalena y Tarena respectivamente. En el Cuadro 4 se ve una relación inversa entre la duración de los periodos secos y número de periodos secos, a mayor duración menor longitud de estos, relación encontrada también por Ruíz *et al.* (2012). Con ayuda de los valores reportados en el Cuadro 4, se obtuvo la longitud en semanas de los periodos sequías con alta probabilidad de encontrar al menos

5 días secos, 10 días secos y los días secos críticos para que la primera capa alcance PM en temporada de lluvias y temporada de verano, así mismo para tener una tendencia de severidad de los periodos secos se calculó el número de días el año en que era posible tener periodos de sequía de 5 días, 10 días y los días críticos para la primera capa de suelo los cuales se presentan en Figuras 6,7 y 8.

Para todas las duraciones se puede determinar qué número de semanas secas tiene los valores más alto para las estaciones ubicadas al Noroccidente de la zona (Magdalena, Tapartó y Salpicón). En la Figura 6 los periodos secos de 5 días presentan una tendencia similar al comportamiento anual de las lluvias de la zona y todas las sequías tienen una duración larga acorde a la clasificación presentada por Anagnostopoulou *et al.* (2003) con más de 4 semanas secas consecutivas. Analizando periodos críticos para la primera capa la estación Tapartó con limitaciones de retención de humedad (Figura 7) presentó uno de los comportamientos más críticos, mientras que Magdalena al tener menor evapotranspiración y Manzana mayor oferta hídrica no son críticos para la primera capa a nivel anual, pero en verano es crítico para Magdalena por tener una menor oferta hídrica con respecto a Manzana, en general este comportamiento es muy dependiente de la evapotranspiración máxima diaria, así mismo todas las sequías presentan duración larga según Anagnostopoulou *et al.* (2003) con más 4 semanas secas consecutivas. El periodo de 10 días secos tiene una tendencia espacial similar al comportamiento anual de la precipitación ya que incrementa de Sur a Norte (Figura 8), las sequías se clasifican acorde a los presentados Anagnostopoulou *et al.* (2003) para Doña Ángela, San Jancito, Manzana, Tarena y Tapartó con sequías cortas, mientras

Salpicón sequías medianas en la época de lluvias y para época de verano tiene sequías largas ya que siempre hay más de 4 semanas secas consecutivas.

El inicio de la temporada de crecimiento se pudiera establecer cuando la probabilidad fuera inferior a 0.5 para duración es de: 5, 10 o para la primera capa pero estos inicios a pesar de que tiene una baja probabilidad al compararse con los inicios de criterio 3 hay inicios más tempranos y por ende pudieran someter a las platas en su periodo vegetativo a condiciones de estrés, contrario a lo encontrado por Mupangwa *et al.* (2011) quienes determinaron que no habían cambio significativos en la inicio temporadas de crecimiento cuando hay periodos de sequía a pesar de un alta probabilidad de ocurrencia durante los picos de precipitación.

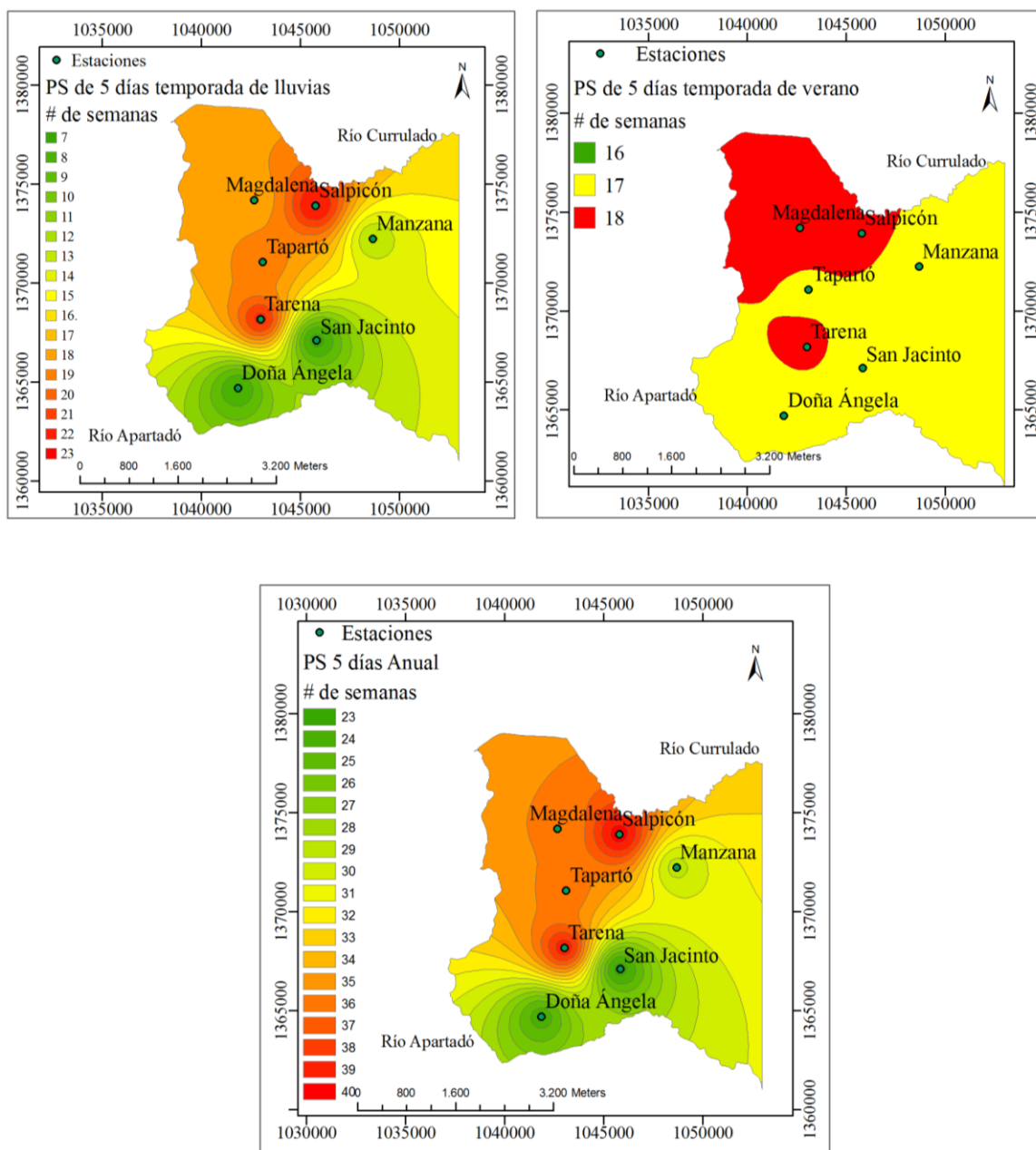


Figura 6. Duración en semanas de periodos de sequía donde sea posible encontrar al menos 5 días secos consecutivos: a) época de lluvias b) época de verano, c) en el año.

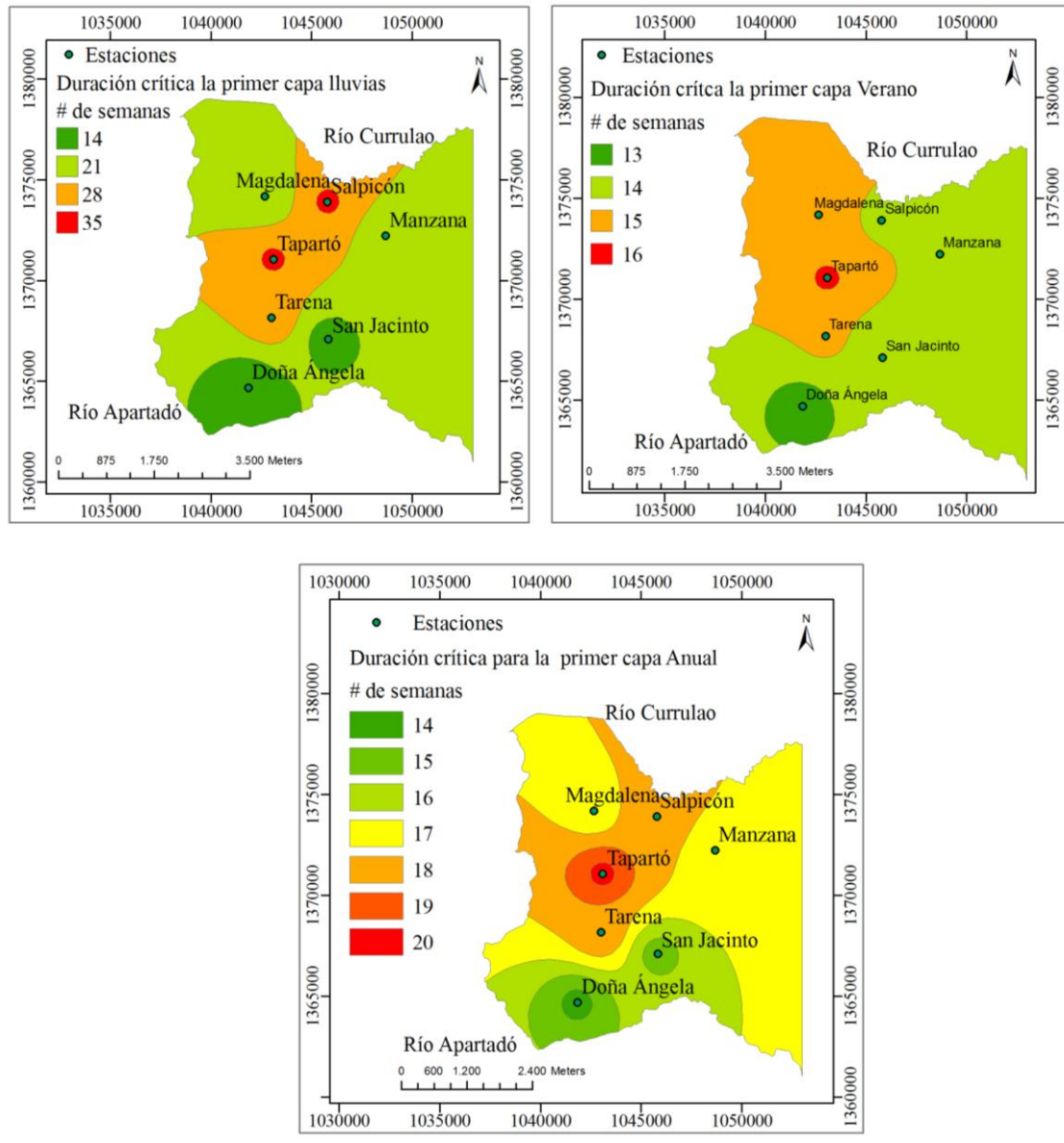


Figura 7. Duración en semanas de periodos de sequía donde sea posible encontrar al menos los días críticos para la primera capa consecutivos: a) época de lluvias b) época de verano, c) en el año.

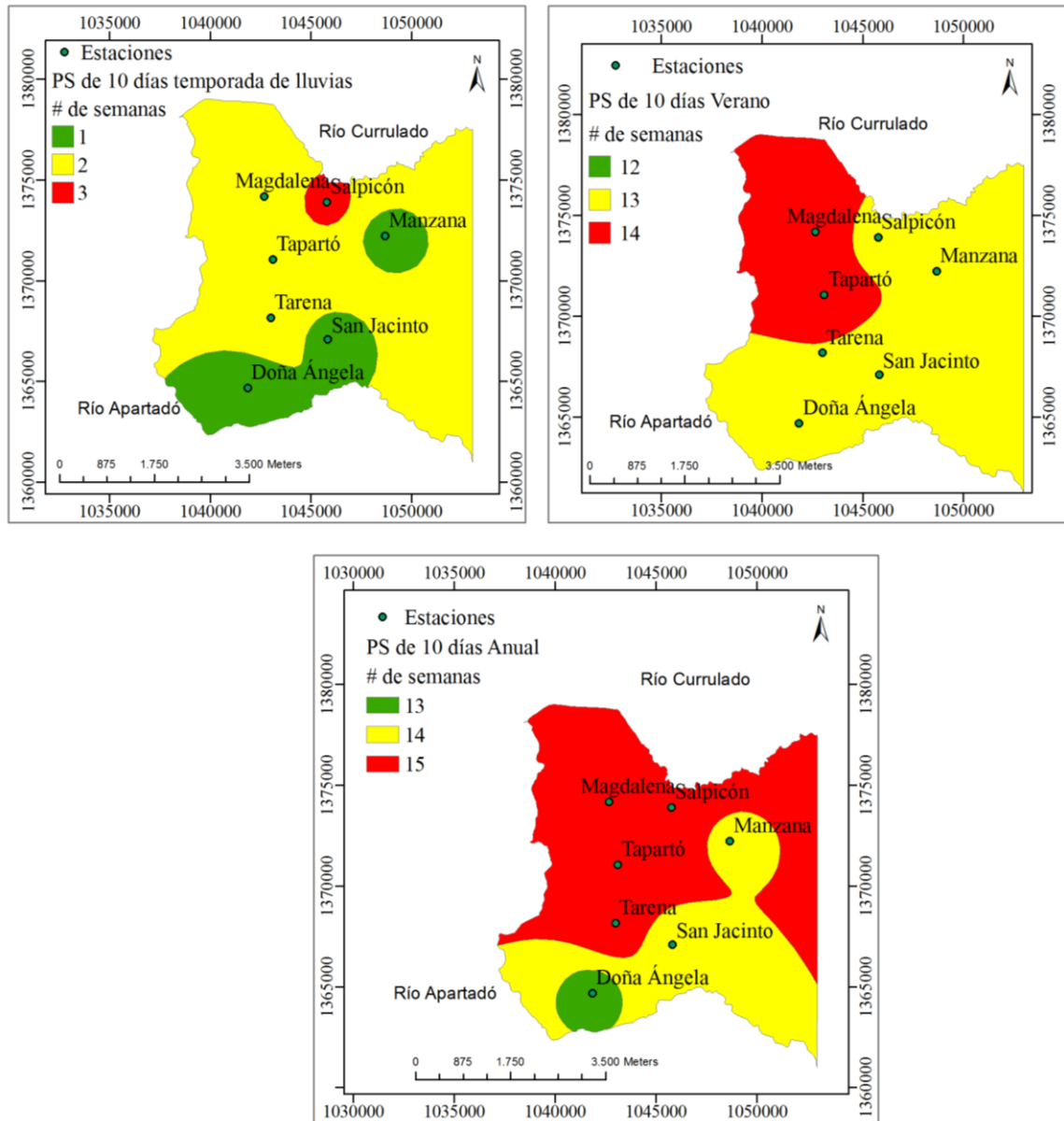


Figura 8. Duración en semanas de periodos de sequía donde sea posible encontrar al menos 10 días secos consecutivos en: a) época de lluvias b) época de verano, c) en el año.

3.4. Determinación de la longitud de la estación de crecimiento (EC)

Se presenta el cálculo la longitud de temporada de crecimiento (EC) como la diferencia entre inicio tardío (20%) de criterio 1 o 3 y el FEC (el primer día en que $p > 0.5$ para una duración de 5 días secos, 10 días secos, días crítico para la primera capa y días crítico para la primera y segunda capa). El criterio 1 y 2 presenta valores similares y el inicio tardío es el que menor riesgo presenta, los valores de EC para cada una de las duraciones de los criterios 1 y 3 se tienen en las Figura 9 y 10.

Para una duración de periodos seco de 5 días la longitud de la estación de crecimiento (EC) presentó en el criterio 1 un máximo de 33 semanas (San jancito) y el mínimo de 17 (Salpicón) y para el 3 un máximo de 29 (Doña Ángela) y el mínimo de 11 (Salpicón). Para una duración critica que lleve a PM la primera capa la longitud de la estación de crecimiento (EC) en el criterio 1 obtuvo un máximo de 38 semanas (Doña Ángela) y el mínimo de 35 (Salpicón) y para el 3 presentó un máximo de 35 (Doña Ángela) y el mínimo 8(Salpicón). Para una duración de periodos secos de 10 días el criterio 1 tuvo un máximo de 39 semanas (Doña Ángela) y el mínimo de 37 (Salpicón) y el 3 presentó un máximo de 36 semanas (Doña Ángela) y el mínimo 30 (Salpicón) . Para un duración critica en que lleve a PM la primera y segunda capa la longitud de la estación de crecimiento (EC) para el criterio 1 presentó máximo de 272-275 días (San jancito) y el mínimo de 266-277 (Magdalena) y el 3 un máximo de 36 semanas (Doña Ángela) y el mínimo de 33 (Magdalena), al contemplar la incidencia de los periodos secos los rangos de EC son menores a los reportado por (IDEAM, 2005) quien determinó que cuando se presenta una relación óptima entre precipitación y

evapotranspiración de 0.8 la longitud de crecimiento para la zona de Urabá está comprendida entre 40 y 45 semanas. Las mayores EC se presenta para las zonas de influencia de las estaciones Doña Ángela, Manzana y San jancito, mientras que las menores longitudes son para la zona de influencia de las estaciones Tarena, Tapartó, salpico y Magdalena.

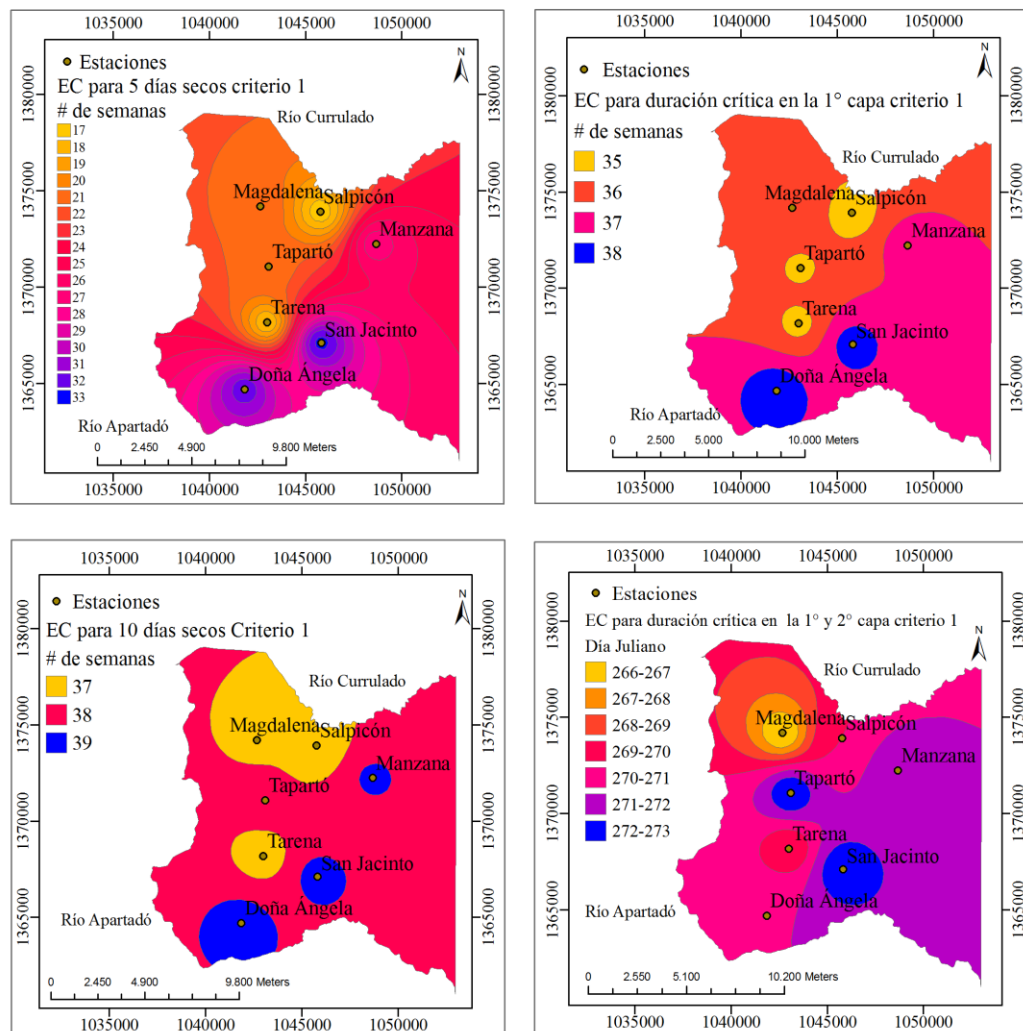


Figura 9. Longitud en semanas de la estación de crecimiento para el criterio 1.

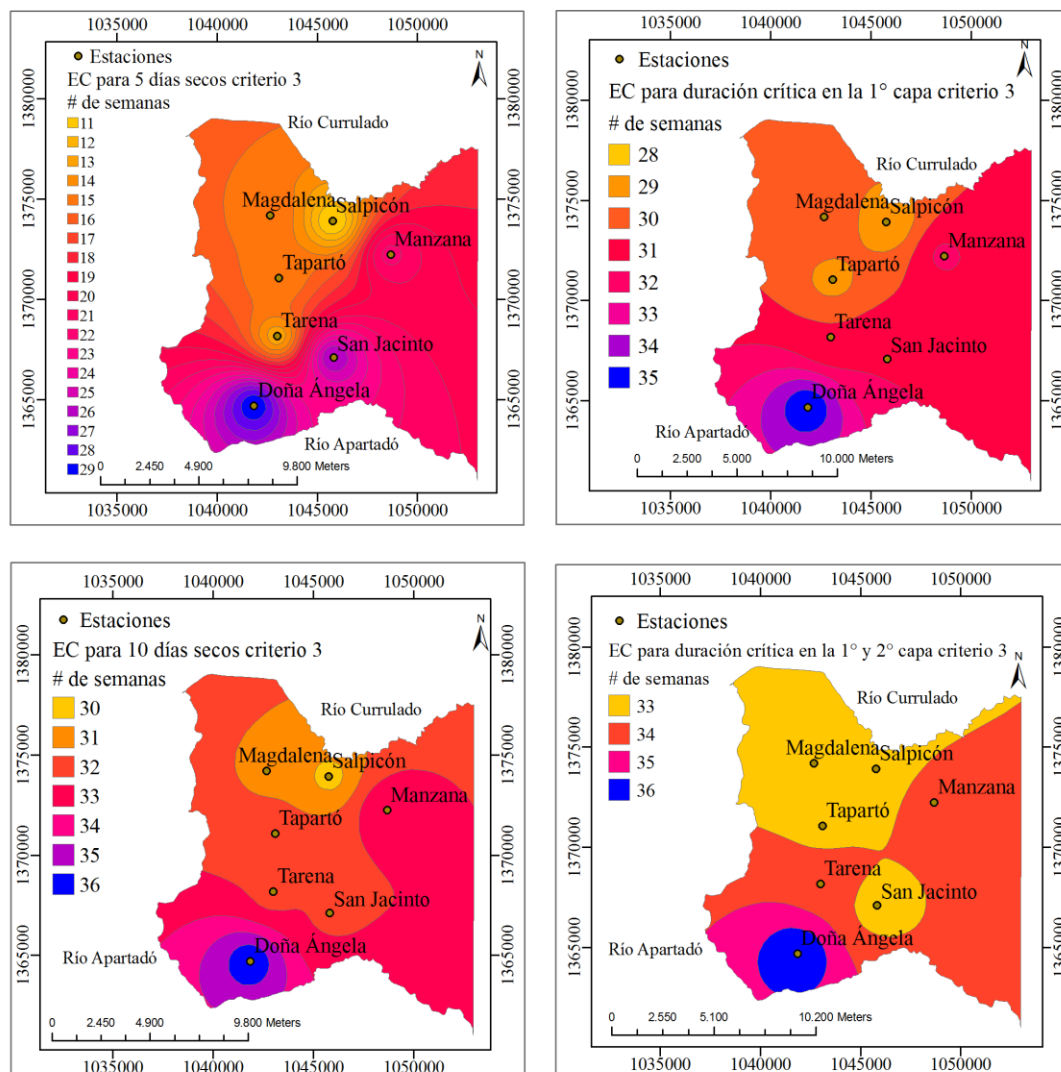


Figura 10. Longitud en semanas de la estación de crecimiento para el criterio 3.

Los inicios más tardíos de EC entre los criterios evaluados los presentó el 3, tienen los menores riesgo de someter a la plantación a estrés en fase vegetativa y utilizan una probabilidad ($p > 0.5$) para una duración 10 días secos como FEC, para renovación de plantaciones tiene mínimo 30 semanas (Figura 10, Magdalena) son buenas condiciones ya que el cultivo de banano dura 36 semanas a cosecha, igualmente con este criterio se trasladaría la cosecha para el primer semestre donde los precios son altos

y no se verían tan afectados los factores de calidad como el grado de la fruta que tiene a disminuir cuando se presentan prolongadas condiciones de sequía. Con lo anterior el uso la EC obtenida por el criterio 3 y la ocurrencia de periodos secos de 10 días produce una técnica confiable para la planificación de renovaciones de plantación en la zona.

Por otra parte los ajustes progresivos de la densidad de población requieren resiembras a través del año, estas deben tener múltiples fechas de siembra dentro de los rangos de inicio y fin de EC presentados en Cuadro 5 y 6, en la temporada de lluvias ofrecen mejores condiciones para una larga estación de crecimiento pero con los criterios evaluados deber ser necesario implementar riego complementario para suministrar el agua que los cultivos requieren y que las precipitación no alcanza a satisfacerlas, incluso para Doña Ángela que presentó los valores más alto de EC en el criterio 3 tiene 36 semanas de longitud, por lo tanto al realizar resiembras en las semanas subsiguientes del inicio propuesto (Cuadro 5) se incrementaría el riesgo a exponerlas a periodos de sequía.

Cuadro 5. Inicio y fin (días julianos) de la estación de crecimiento para duración de: 5 días secos, días secos críticos para la primera capa, 10 días secos y días secos críticos para la primera y segunda capa (criterio 3).

Duración	Días secos críticos para									días secos críticos para el					
	5 días secos					la primera Capa			10 días secos			primera y segunda Capa			
	Longitud					Longitud			Longitud			Longitud			
Estación	Inicio	Fin	Inicio	Fin	EC	Inicio	Fin	EC	Inicio	Fin	EC	Inicio	Fin	EC	
Salpicón	141	193	277	295	70	141	337	196	141	349	208	141	366	225	
Tarena	130	217			87	130	340	210	130	352	222	130	366	236	
Tapartó	137	211	280	304	98	137	337	200	137	355	218	137	366	229	
Magdalena	142	244			102	142	352	210	142	358	216	142	366	224	
Manzana	131	226	262	316	149	131	349	218	131	361	230	131	366	235	
Doña Ángela	115	316			201	115	358	243	115	364	249	115	366	251	
San Jacinto	138	319			181	138	355	217	138	361	223	138	366	228	

Cuadros 6. Inicio y fin(días julianos) de la estación de crecimiento para duración de 5 días secos, días secos críticos para la primera capa, 10 días secos y días secos críticos para la primera y segunda capa (criterio 1).

Duración	5 días secos					Días secos críticos para la primera capa			10 días secos			días críticos para la primera y segunda capa		
	Longitud		Longitud		EC	Longitud		EC	Longitud		EC	Longitud		EC
Estación	Inicio	Fin	Inicio	Fin		Inicio	Fin		Inicio	Fin		Inicio	Fin	
Salpicón	96	193	277	295	115	96	337	241	96	349	253	96	366	270
Tarena	97	217			120	97	340	243	97	352	255	97	366	269
Tapartó	93	211	280	304	142	93	337	244	93	355	262	93	366	273
Magdalena	100	244			144	100	352	252	100	358	258	100	366	266
Manzana	94	226	262	316	186	94	349	255	94	361	267	94	366	272
Doña Ángela	95	316			221	95	358	263	95	364	269	95	366	271
San Jacinto	93	319			226	93	355	262	93	361	268	93	366	273

4. CONCLUSIONES

Con una probabilidad de excedencia de 60 % la fecha de inicio de las lluvias apreciables para la zona es el primero de abril (día 82).

Los inicios tardíos (20%) de la EC para el criterio 1 son 6 de abril (96), para el 2 el 1 de abril (91), y para el 3, 13 de mayo (133). En general para todas las probabilidades el IEC en el criterio 2 presentan una dirección Sur Occidente con rumbo Norte, el criterio 1 tiene un aumento del inicio de estación de crecimiento en dirección Sur Oriente rumbo al Norte, el criterio 3 mostró la ocurrencia de periodos secos cercanos y prolongados en la época donde el criterio 1 y 2 determinan el inicio de la estación de crecimiento, por lo tanto con el criterio 3 se establece la fecha óptima de siembra de plantaciones nuevas y de las resiembras pues tiene el menor riesgo de someter el cultivo a estrés hídrico y debido a la variabilidad que presentó en la zona se debe utilizar en siembra tardía (20%) los valores en días julianos obtenidos fueron: 115, 138, 131, 130, 137, 141, 142 (25 de abril, 18, 11, 10, 17, 21, 22 de mayo) para Doña Ángela, San Jacinto, Manzana, Tarena, Tapartó, Salpicón, y Magdalena respectivamente.

Las estaciones ubicadas al Noroccidente: Magdalena, Tapartó y Salpicón presentaron mayor probabilidad de ocurrencia de periodos secos para las duraciones evaluadas. Para la duración de 5 días y los días críticos de la primera capa tanto en verano como en la época de lluvias hay sequías largas, mientras que para duración de 10 días secos en época de lluvias son sequías cortas para Manzana, San Jacinto, Doña Ángela, Tarena y Tapartó. Salpicón presentó sequías medias. Para esta misma duración

en la época de verano todas estaciones presentaron sequías largas y para la duración crítica de la primera y segunda capa solo tienen sequías largas Salpicón y los demás no presentan ningún tipo de sequía.

Las mayores EC son para la zona de influencia de: Doña Ángela, Manzana y San jancito, mientras que las menores son para: Tarena, Tapartó, salpico y Magdalena. La EC obtenida a través de inicio de estación de crecimiento por el criterio 3 y la ocurrencias de periodos secos de 10 días produce una técnica confiable para la planificación de renovación de plantación en la zona Norte de eje bananero, y para la resiembras a se recomienda su uso siempre y cuando a media que se aleje de la fecha óptima del criterio 3 se haga uso de riego suplementario.

5. LITERATURA CITADA

- Allen, R. G. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Food & Agriculture Org(FAO).
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome 300: 6541.
- Anagnostopoulou, C., P. Maheras, T. Karacostas y M. Vafiadis. 2003. Spatial and temporal analysis of dry spells in greece. Theoretical and Applied Climatology 74 (1-2): 77-91.
- Assad, E. D., E. E. Sano, R. d. C. L. H. Masutomoy F. A. M. DA Silva. 1993. Veranicos na região dos cerrados brasileiros frequência e probabilidade de ocorrência

Pesquisa Agropecuária Brasileira 28: 993-1003.

Bannayan, M., A. Lakzian, N. Gorbanzadehy A. Roshani. 2011. Variability of growing season indices in northeast of iran. Theoretical and Applied Climatology 105 (3-4): 485-494.

Barrantes, J. A.y N. G. Vega. 2003. La persistencia y las cadenas de markov aplicadas a la lluvia en san josé durante el periodo 1950-1990. Topicos Meteorologicos y Oceanografico 10 (1): 12-19.

Deni, S. M., A. A. Jemainy K. Ibrahim. 2008. The spatial distribution of wet and dry spells over peninsular Malaysia. Theoretical and Applied Climatology 94 (3-4): 163-173.

Eidsvik, K. J. 1980. A model for heavy gas dispersion in the atmosphere. Atmospheric Environment (1967) 14 (7): 769-777.

Fischer, B. M. C., M. L. Muly H. H. G. Savenije. 2013. Determining spatial variability of dry spells: A markov-based method, applied to the makanya catchment, Tanzania. Hydrology and Earth System Sciences 17 (6): 2161-2170.

Fleming, S. W. 2007. Climatic influences on markovian transition matrices for vancouver daily rainfall occurrence. Atmosphere-Ocean 45 (3): 163-171.

Hachigonta, S., C. J. C. Reasony M. Tadross. 2007. An analysis of onset date and rainy season duration over Zambia. Theoretical and Applied Climatology 91 (1-4): 229-243.

Hargreaves, G. H.y Z. A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. American Society of Agricultural Engineers (Microfiche collection) (USA) 1 (2): 96-99.

- Harrison, M. y P. Waylen. 2000. A note concerning the proper choice for markov order for daily precipitation in the humid tropics; a case study in Costa Rica International Journal of Climatology 20: 1861-1872.
- Hayhoe, H. N. 2000. Improvements of stochastic weather data generators for diverse climates. Climate Research 14 (2): 75-87.
- IDEAM. 2005. Atlas climatológico de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia), Colombia. p 217.
- IDEAM. 2010. Estudio nacional del agua 2010. Instituto de Hidrología Meteorología y estudios Ambientales. Bogota DC. p. 409.
- IGAC. 2007a. Estudio general de suelos y zonificación de tierras departamento de Antioquia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia. 922 p.
- IGAC. 2007b. Estudio semidetallado de suelos de las áreas potencialmente agrícolas. Urabá departamento de Antioquia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Colombia. p. 489.
- Lana, X., M. D. Martinez, A. Burguenoy C. Serra. 2008. Return period maps of dry spells for catalonia (northeastern spain) based on the weibull distribution. Hydrological Sciences Journal 53 (1): 48-64.
- Lasso, E. L. D. 2003. Metodología de la distribucion agroclimatica de las lluvias Meteorología Colombiana 7: 134-134.
- Luengo, U. M. Á., B. A. Ceballos, F. J. Martínezy Y. C. Yuste 2002. Las rachas secas en el sector central de la cuenca del Duero. Investigaciones geográficas, 27:65-82.
- Mugalavai, E. M., E. C. Kipkorir, D. Raesy M. S. Rao. 2008. Analysis of rainfall onset, cessation and length of growing season for western Kenya. Agricultural and Forest Meteorology 148 (6-7): 1123-1135.

- Mupangwa, W., S. Walkery S. Twomlow. 2011. Start, end and dry spells of the growing season in semi-arid southern Zimbabwe. *Journal of Arid Environments* 75 (11): 1097-1104.
- Nelson, G. C., M. W. Rosegrant, J. Koo, R. Robertson, T. Sulser, T. Zhu, C. Ringler, S. Msangi, A. Palazzoy M. Batka. 2009. Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation. *Intl Food Policy Res Inst.*
- Odekunle, T. O. 2004. Rainfall and the length of the growing season in nigeria. *International Journal of Climatology* 24 (4): 467-479.
- OtienoOngala, J., D. stery R. D. Stern 2012. Extending genstat capability to analyze rainfall data using markov chain model *European Scientific Journal* 8 (18): 1-13.
- Raes, D., A. Sithole, A. Makaraury J. Milford. 2004. Evaluation of first planting dates recommended by criteria currently used in zimbabwe. *Agricultural and Forest Meteorology* 125 (3-4): 177-185.
- Ribeiro, B. T., J. C. Avanzi, C. R. de Mello, J. M. de Limay M. L. Naves Silva. 2007. Comparação de distribuições de probabilidade e estimativa da precipitação provável para região de barbacena, mg. *Ciências. agrotecnologia* 31 (5): 1297-1302.
- Ruíz, O. Á., R. R. Arteaga, P. M. A. Vázquez, C. R. E. Ontiverosy L. R. López. 2012. Inicio de la estación de crecimiento y periodos secos en Tabasco, México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 3 (2): 85-102.
- Said, G., G. Zarate y 2001. *Métodos estadísticos*. Trillas México.
- Salazar, M. C. M. 2010. El drenaje agrícola en el cultivo de banano. . *Universidad Nacional de Colombia. Medellín Colombia.*
- Stern , R., l. Daley K. Joan. 2006. *Instat guia climate*. Tercera ed. Reading. UK. 400 p.

- Stern , R. D.y R. Coe. 1984. A model fitting analysis of daily rainfall data. Journal of the Royal Statistical Society. Series 147 (1): 1-34.
- Turner, D. W., J. A. Fortescuey D. S. Thomas. 2007. Environmental physiology of the bananas (musa spp.). Brazilian Journal of Plant Physiology 19 (4): 463-484.
- Wan, H., X. Zhangy E. M. Barrow. 2005. Stochastic modelling of daily precipitation for canada. Atmosphere-Ocean 43 (1): 23-32.
- Yu, X., X. He, H. Zheng, R. Guo, Z. Ren, D. Zhangy J. Lin. 2013. Spatial and temporal analysis of drought risk during the crop-growing season over northeast China. Natural Hazards 71 (1): 275-289.

CAPÍTULO 6. REQUERIMIENTOS DE RIEGO Y PREDICCIÓN DE RENDIMIENTO EN EL CULTIVO DE BANANO MEDIANTE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN EL URABÁ ANTIOQUEÑO COLOMBIA

Ana María **Toro-Trujillo**¹, Ramón **Arteaga-Ramírez**^{2*}, M. Alberto **Vázquez-Peña**², L.
Alicia **Ibáñez-castillo**²

¹Posgrado de Ingeniería Agrícola y uso integral del agua. Universidad Autónoma
Chapingo.56230. Chapingo, Estado de México.

²Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. 56230. Chapingo,
Estado de México. Autor por correspondencia:*(arteagar@correo.chapingo.mx).

RESUMEN

El cultivo de banano es la actividad agrícola más importantes de la economía de Urabá, Antioqueño, desarrollada en 49000 ha, los fenómenos ENSO han afectado la producción con el déficit de precipitación, los incrementos de temperatura, períodos de sequía más intensos adicionalmente las altas incertidumbres asociadas al cambio climático y la distribución desigual de las lluvias en la zona, han aumentado la necesidad de riego. El objetivo fue estimar mediante simulaciones con el modelo CROPWAT los requerimientos de riego y la reducción del rendimiento del banano cuando se cultivan en condiciones sin riego en tres escenarios de precipitación 20, 50 y 80 % de probabilidad de excedencia. Se usaron datos diarios de precipitación y temperatura máxima y mínima de siete estaciones meteorológicas, información fenológica y referencias edafológicas del Urabá, con siembra en verano (SV) y siembra en época de lluvias (SL). En los

resultados la evapotranspiración del cultivo presenta sus mayores valores SV en marzo-agosto y con SL en julio-agosto, siendo Salpicón la mayor. Todas las estaciones presentan los valores menores de precipitación efectiva entre Enero- Marzo, los mayores requerimientos hídricos para SV y con lluvia al 80 %. La reducción de rendimientos fue de 5-15% (normal) y 25-30% (seco) en SV y en SL fue de 1-3%(normal) y 5-10% (Seco), en el escenario húmedo fueron menores a 0.9% para SV y 2% SL. En la zona Norte del Urabá Antioqueño, el riego suplementario es importante para no tener disminuciones en el rendimiento en los escenarios seco y normal

Palabras clave: evapotranspiración, precipitación efectiva, requerimiento de riego, escenario

ABSTRACT

Banana cultivation is the main agricultural activity intense economy Urabá, Antioquia, developed in 49000 ha, the ENSO phenomena have affected the production deficit of precipitation, temperature increases, droughts further the high uncertainties associated with climate change and the uneven distribution of rainfall in the area, have increased the need for irrigation. The objective was to estimate the model through simulations CROPWAT irrigation requirements and yield reduction when grown banana in rainfed conditions in three rainfall scenarios 20, 50 and 80% exceedance probability. Daily precipitation data and maximum and minimum temperature 7 weather stations, phenological information and references Urabá soil, sown in Summer (SV) and planting in the rainy season (SL) were used. In the results presented crop evapotranspiration their

elders SV values from March to August and SL in July-August, with the largest spatter. All stations have the lowest values of effective rainfall from January to March, the largest water requirements for SV and rain 80%. The yield reduction was 5-15% (normal) and 25-30% (dry) in SV and SL was 1-3% (normal) and 5-10% (dry) in the wet stage were lower 0.9% and 2% for SV SL. In the northern Urabá Antioquia, supplemental irrigation is important to avoid decreases in performance on dry, normal scenarios

Keywords: evapotranspiration, effective rainfall, irrigation requirement, scenario

1. INTRODUCCIÓN

Colombia a nivel mundial actualmente aporta 10% de la producción total del banano tipo exportación (Espinal *et al.*, 2005). El banano para Colombia representan un 3% de las exportaciones totales, 35 % del PIB agropecuario sin el café y 0.4% del PIB de Colombia, con 90 millones de cajas exportadas que representan 757.3 millones US al año (Augura, 2013), para la zona de Urabá representa la principal actividad económica ya que agrupa aproximadamente 22 mil trabajadores (Espinal *et al.*, 2005). En el 2012 el cultivo de banano ocupó 49000 Ha del área agrícola sembrada del país y alcanzó 1834822 Tm de la producción agrícola total, y la zona de Urabá aporta 77% de producción con un rendimiento promedio para banano de exportación de 33.7 t ha⁻¹ superior al nacional 32.3 t ha⁻¹ (Agronet, 2013).

La producción del banano en Urabá en los últimos años se ha afectado por: los fenómenos ENSO como consecuencia de los déficit de precipitación y los incrementos de temperatura (Guarín, 2011) y la tendencia lineal decreciente de la producción por hectárea en función de la evaporación potencial/precipitación (Quiceno, 2004), en este mismo sentido IDEAM (2010a) pronóstico que el cambio climático puede alterar los patrones de distribución de las lluvias y posiblemente se traducirá en períodos de sequía más intensos que puede aumentar aún más su impacto en la producción de banano, bajo sequía las raíces producen señales que cierran los estomas lo que permite que el banano permanezca altamente hidratado, con una reducción de carbono asimilado y por lo tanto una reducción en el rendimiento (Turner *et al.*, 2007), como consecuencia a la alta sensibilidad del banano al estrés hídrico más de las dos terceras partes que se cultivan para la exportación en todo el mundo presenta regadío, entre ellas zonas en el trópico con periodos secos marcados (Carr, 2009), situación que no se presenta en la zona en la temporada seca de diciembre a marzo, de igual forma Machovina y Feeley (2013) plantea el riego suplementario en la zona de estudio bajo diferentes escenarios de cambio climático y la zona no cuenta con más de 5% de zona irrigadas, con todo lo antes planteado se requiere el conocimiento de las necesidades reales de agua del cultivo para la gestión y la planificación de los recursos hídricos (Cigales y Pérez, 2011), pero en este proceso se requiere experimentación, recursos económicos, tiempo y mano de obra; y los resultados no se pueden exportar a otras regiones, pero los modelos computacionales evalúan las necesidades de riego, la productividad del agua y se pronostica el rendimiento para regiones con condiciones meteorológicas distintas y situaciones de suelo específicas que no se han estudiado (Ruíz *et al.*, 2011). Existen diferentes aplicaciones del modelo CROPWATER, Eid *et al.* (2006) lo implementaron para la

evaluación del impacto de cambio climático sobre la evapotranspiración y rendimiento con tres escenarios para maíz, trigo y algodón en Egipto, encontrado un aumento en evapotranspiración y disminución del rendimiento para maíz y trigo, y como estrategia de mitigación propone la expansión de cultivo de algodón que se ve más favorecido ante las condiciones modeladas, del mismo modo Cigales y Pérez (2011) estimaron la influencia de los elementos climáticos y suelos en los requerimiento hídrico del banano en conjunto con el programa CROPWAT y de acuerdo con los resultados del estudio se concluyó que este constituye una herramienta útil, fácil y versátil para efectuar ajustes en los programas de riego; o bien, calcular la lámina y frecuencia de riego en huertas donde se desea determinar con buena precisión un programa de riego en banano.

Shen *et al.* (2013) y Freitas *et al.* (2008) plantean que la determinación de las variaciones espaciales y temporal de la demanda de riego agrícola y los requerimientos de cultivos son de importancia para ayudar a mejorar la gestión del agua hacia el uso sostenible, y Chopin y Blazy (2013) manifiestan que la importancia de describir las causas de variabilidad de los rendimientos y de esta manera focalizar las estrategias y políticas de promociones y facilitar la de adopción de buenas prácticas a los agricultores de banano. El objetivo del presente estudio fue estimar mediante simulaciones los requerimientos de riego y la reducción del rendimiento en el cultivo banano en condiciones de secano, en los escenarios de precipitación normal (50 %), seca (80 %) y húmeda (20 %) mediante el modelo CROPWAT en zona Norte del Urabá Antioqueño.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El estudio se realizó en la zona Norte del eje bananero del Urabá Antioqueño ,se extiende entre los $7^{\circ} 43.779'$ a los $8^{\circ}01.035'$ de latitud Norte y entre los $76^{\circ}36.677$ y $76^{\circ}44.802$ de longitud Oeste, y está comprendida entre los Ríos curulao y Apartado (Figura 1), el eje bananero presenta un rango altitudinal que va desde los 1-1000 msnm, la precipitación promedio multianual fluctúa entre los 1.600 -3600 mm, temperatura media multianual oscila entre los 22.8-28.5°C, la evapotranspiración potencial (ETP) registra valores entre 1100-2150 mm (IGAC, 2007b), la humedad relativa está en función al ciclo de lluvias de la zona, presenta los valores más alto para los periodos Mayo-Abril y octubre- noviembre y humedades bajas de diciembre a Marzo es siendo este último el valor más bajo (Roldán, 2008).

2.2. Información climática

Para las siete estaciones de Comercializadora Internacional Banacol S.A (C. I Banacol) se usó la información a escala diaria de precipitación (mm) en periodo 2004-2012, la temperatura máxima y mínima en periodo 2004-2009 y se empleó la radiación solar medida de la estación Pista Indira proporcionada por IDEAM para el cálculo de evapotranspiración de las siete estaciones de C.I Banacol como lo recomienda Allen *et al.* (2006). El relleno de los datos faltante se realizó por el método WS (ASCE, 1996).

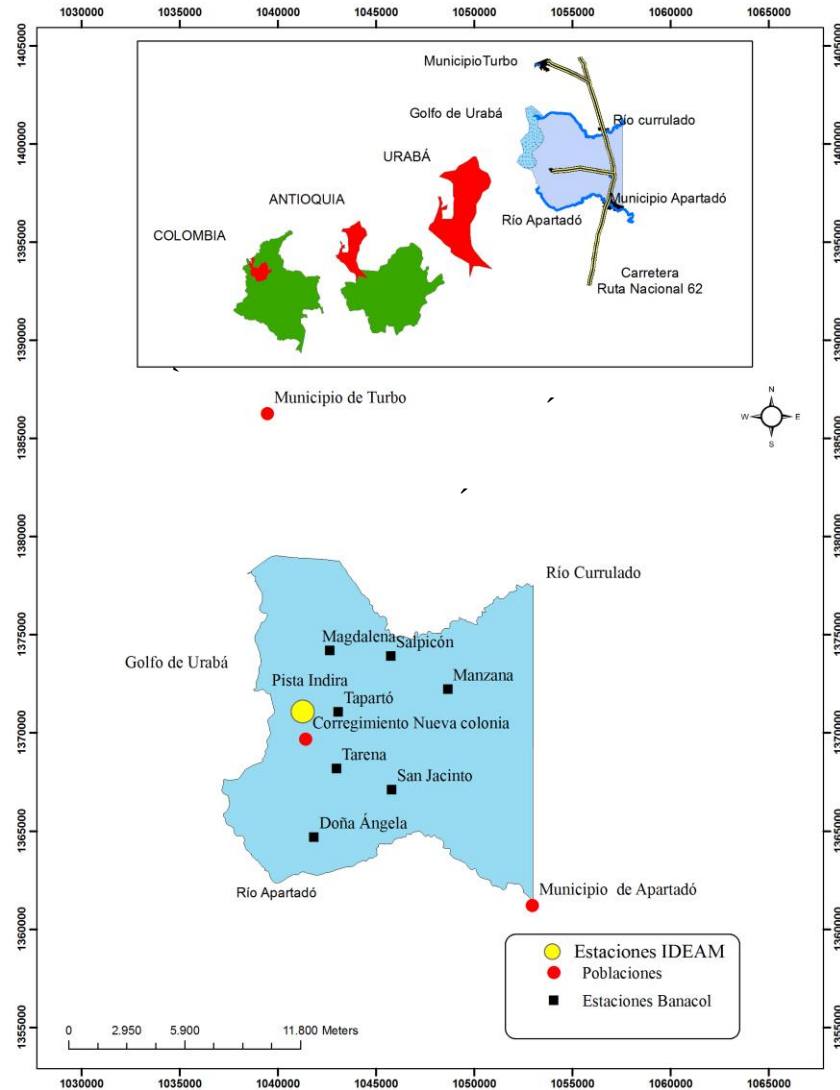


Figura 1. Ubicación de estación y delimitación de la zona Norte del eje Bananero del Urabá Antioqueño.

2.3. Modelo CROPWAT

CROPWAT 8.0 para Windows es un programa de computación que puede ser usado para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos en base a datos climáticos, fenológicos y edafológicos. Además, permite la elaboración de calendarios de riego para

diferentes condiciones de manejo y el cálculo del esquema de provisión de agua para diferentes patrones de cultivos. Está basado en las metodologías descritas en los boletines 56, 33 y 24 de la serie FAO Riego y Drenaje (Doorenbos y Pruitt, 1977; Doorenbos y Kassam, 1979; Allen *et al.*, 2006), y ha sido utilizado en banano por Cigales y Pérez (2011); Karanja (2006) y Stephen *et al.* (1985). En otros cultivos (George *et al.*, 2000; Molua y Lambi, 2006). Este modelo estima la reducción del rendimiento por estrés hídrico, se expresa como un porcentaje de la producción máxima alcanzable en la zona en condiciones óptimas. Todas las versiones operan bajo el concepto de evapotranspiración de referencia calculado mediante el método de Penman-Monteith FAO y la versión ocho ofrece la posibilidad de ingresar el valor de Evapotranspiración por métodos recomendados en Allen *et al.* (2006).

2.4. Datos de suelo

La información edafológica de la zona de Norte del eje bananero requerida por el modelo CROPWAT para planificar el riego fue tomada del estudio semidetallado de suelos de áreas potencialmente agrícolas en la zona del Urabá (IGAC, 2007b) y de la base de datos de suelos con la que cuenta este programa, se eligieron la textura franco-arcillosa como representativa con excepción de Tapartó que se tomó como arcillo-limosa. La humedad inicialmente disponible considerada al momento de la siembra fue de 130 mm como representativa y para Tapartó de 170 mm. Se consideró una profundidad máxima de enraizamiento del banano de 90 cm según Allen *et al.* (2006)

2.5. Cálculo de ETo

El cálculo se realizó con el método Hargreaves una ecuación basada en temperaturas propuesto por Hargreaves y Samani (1985) y ajustado al Método de Penman-Monteith (Ecuación 1 y 2).

$$E_{toHS1985} = 0.0135 * (T_{med} + 17.78) * R_s \quad (1)$$

$$E_{toPM} = a + b * E_{toHS1985} \quad (2)$$

$E_{toHS1985}$ = evapotranspiración referencia diaria (mm d^{-1}), T_{media} = temperatura media ($^{\circ}\text{C}$), T_{max} = temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$), T_{min} = temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$), R_a = radiación extraterrestre (mm d^{-1})

2.6. Precipitación efectiva (P_{ef})

Se calculó con el modelo CROPWAT con el criterio del Servicio de Conservación de Suelos (USDA) (Dastane, 1977; George *et al.*, 2000; Molua y Lambi, 2006) con las siguientes expresiones:

$$P_{ef} = \frac{(125 - 0.2 * p) * p}{125} \quad P \leq 250 \text{ mm.} \quad (3)$$

$$P_{ef} = 0.1 * p + 125 \quad P > 250 \text{ mm.} \quad (4)$$

P = Precipitación (mm)

2.7. Coeficientes de cultivo (K_c)

En el Cuadro 1 están los valores generales del coeficiente de cultivo (K_c) y datos fenológicos para el banano. Esta información se tomó de la base de datos del CROPWAT basada en Allen *et al.* (2006) ya que en la región no hay datos experimentales, estos fueron constantes en las simulaciones realizadas.

Cuadro 1. Valores fisiológicos generales para Banano de la base de datos de CROPWAT y Boletín 56.

Fase	Inicial	Desarrollo	Mediados		Total
			de temporada	Final de temporada	
Coeficiente del cultivo (K_c)	1		1.2	1.1	
Duración de la fase (días)	60	60	75	45	240
Factor de respuesta del rendimiento (K_y)	1.35	1.35	1.35	1.35	1

2.8. Evapotranspiración del cultivo de Banano

El cálculo se realizó con CROPWAT mediante el método del coeficiente único de cultivo (K_c) (Allen *et al.*, 2006), donde se integran los efectos combinados de la transpiración y evaporación del suelo con la relación:

$$ET_c = E_{to} * K_c \quad (6)$$

Donde ET_c es la evapotranspiración real del cultivo (mm).

2.9. Predicción de rendimiento (ecuación de productividad)

La respuesta del rendimiento del cultivo a la deficiencia al agua es presentada por Doorenbos y Kassam (1979) en un modelo lineal basado en la teoría de que, teniendo en cuenta todos los demás factores de la producción en su nivel óptimo, es el factor de escasez de agua (estimado como la relación real y el máximo de evapotranspiración, ET / ET_m) que limitan el rendimiento final (Ali, 2011), es decir el porcentaje de la producción con respecto a la producción máxima en condiciones óptimas y el porcentaje de las necesidades hídricas insatisfechas de agua con respecto a las condiciones óptimas, puede ser calculada con referencia a una única etapa del ciclo o para toda la temporada del cultivo, fue implementado por Steduto *et al.* (2012) en ACUACROP y también ha sido adoptados por Giorgis *et al.* (2006); Molua y Lambi (2006); Ruíz *et al.* (2011). El cálculo se realiza con la siguiente ecuación.

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right) \quad (7)$$

Y_a y Y_m= rendimiento real cosechado y el Máximo en (kgHa⁻¹), K_y= Factor del efecto del suministro del agua sobre el rendimiento adimensional (Cuadro 1), E_t y ET_m= Evapotranspiración real y máxima (mm) cuando el suministro del agua se atiende plenamente las necesidades del cultivo.

2.10. Fecha de siembra

IDEAM (2005) reporta que el verano finaliza con la entrada de lluvias a finales de marzo, se obtuvo que en promedio para las siete estaciones el seis de abril las lluvias alcanzaba a llevar a capacidad de campo la húmeda del suelo con 80% de probabilidad de excedencia, denominada fecha siembra óptima y con la finalidad de evaluar los efectos de la reducción del rendimiento producidos por el verano se evaluó el primero de enero como fecha de siembra en verano.

2.11. Escenarios climáticos

Las simulaciones se realizaron mediante la condición seco y se manejó con una lluvia al 20, 50% y 80 % de probabilidad de excedencia, para conocer el comportamiento del cultivo ante los impactos del cambio climático y sus requerimientos de agua calculados como la diferencia entre la evapotranspiración del cultivo y la Precipitación efectiva (Dastane, 1977; Molua y Lambi, 2006). Así el nivel de probabilidad (20 %) denota un escenario húmedo, el nivel (50 %) un año normal y el nivel (80 %) un año seco que podría presentarse en cuatro de cada cinco años (Doorenbos y Pruitt, 1977; Smith, 1992). La precipitación probabilística se determinó con la distribución Normal (Infante y Zarate, 1990) porque se usaron totales mensuales y la región de estudio es una zona húmeda

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Evapotranspiración de referencia (Eto).

En la zona Norte del eje bananero la evapotranspiración de referencia está ligada a factores locales y su fluctuación anual (Figura 2) presentó un aumento rápido de enero a febrero en el que alcanzó un primer pico de valores altos y después un descenso y sostenimiento de abril a julio producto de entrada de las lluvias (Húmeda relativa alta) luego el mayor pico empieza su ascenso en agosto hasta el mes octubre pues se presenta Húmeda relativa media y alta radiación, así mismo los valores menores son para diciembre. El mínimo lo presenta Magdalena y el máximo para Salpicón, siendo estas dos estaciones muy cercanas, el promedio para todas las estaciones de $1618 \text{ mmAuales}^{-1}$ ¹ acordes a lo reportado por IGAC (2007b) y superiores a los encontrados por Guarín (2011). En la Figura 3a y b se puede evidenciar como la precipitación de enero, febrero y marzo no logra satisfacer las necesidades del cultivo.

3.2. Evapotranspiración del cultivo del banano

La evapotranspiración promedio mensual diaria tuvo valores de $5.3\text{-}5.8 \text{ mmdía}^{-1}$, se encuentran dentro del rango que Robinson (1996) reporta de $3\text{-}6 \text{ mm d}^{-1}$ y Montenegro *et al.* (2008) de $3\text{-}8 \text{ mm d}^{-1}$, superior al reportado por Bassoi *et al.* (2004) 3.3 mm d^{-1} tercer ciclo y por Carr (2009) en los trópicos de 4.3 mm d^{-1} . En la Figura 4 se muestra el comportamiento anual de la evapotranspiración del cultivo de banano en temporada de Verano y temporada de lluvias, durante el año los valores mayores de la

evapotranspiración para el cultivo se presentaron para Salpicón, seguido de Manzana, Tarena, San Jacinto, Tapartó, Doña Ángela y por último Magdalena tanto para el cultivo sembrado en verano como el cultivo sembrado a partir del seis de abril (lluvias). Los valores de evapotranspiración para el cultivo sembrado en temporada de verano oscilan entre 1188 mm (Magdalena) y 1294 mm (Salpicón) y la sembradas a partir del seis abril presentó una evapotranspiración de cultivo comprendida entre 1205mm (Magdalena) y 1305(Salpicón), valores similares encontrados por Cigales y Pérez (2011) quienes reporta una evapotranspiración para el cultivo de banano de 1047 mm anual⁻¹. Robinson y Alberts (1989) reportan estimaciones de las tasas de evapotranspiración de 1200-2690 mm anuales⁻¹ según las condiciones del clima mientras que Marinato (1980) obtiene que el consumo anual del banano entre 1200-1800 mm.

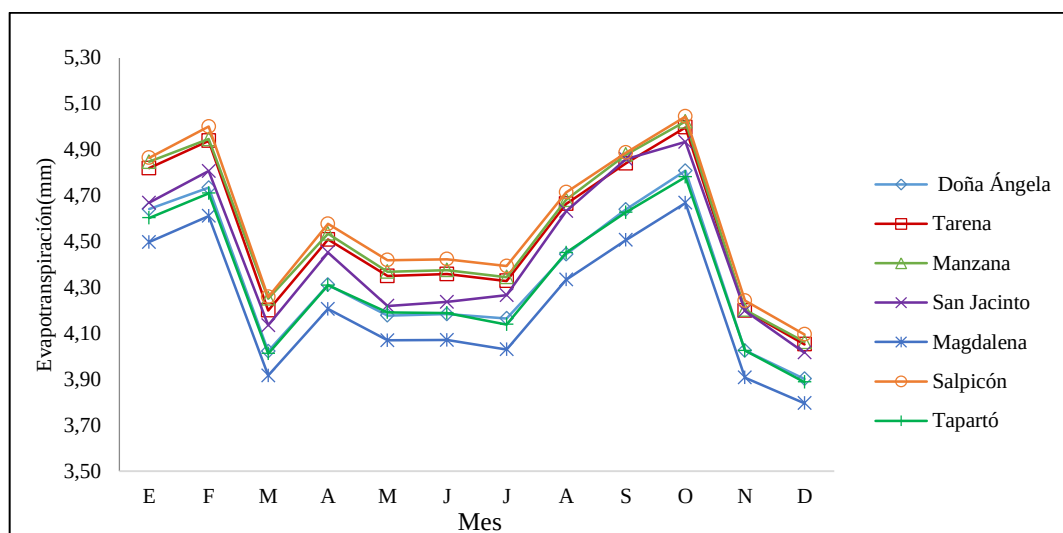


Figura 2. Evapotranspiración media mensual (mm d⁻¹) para las estaciones de zona Norte del Urabá.

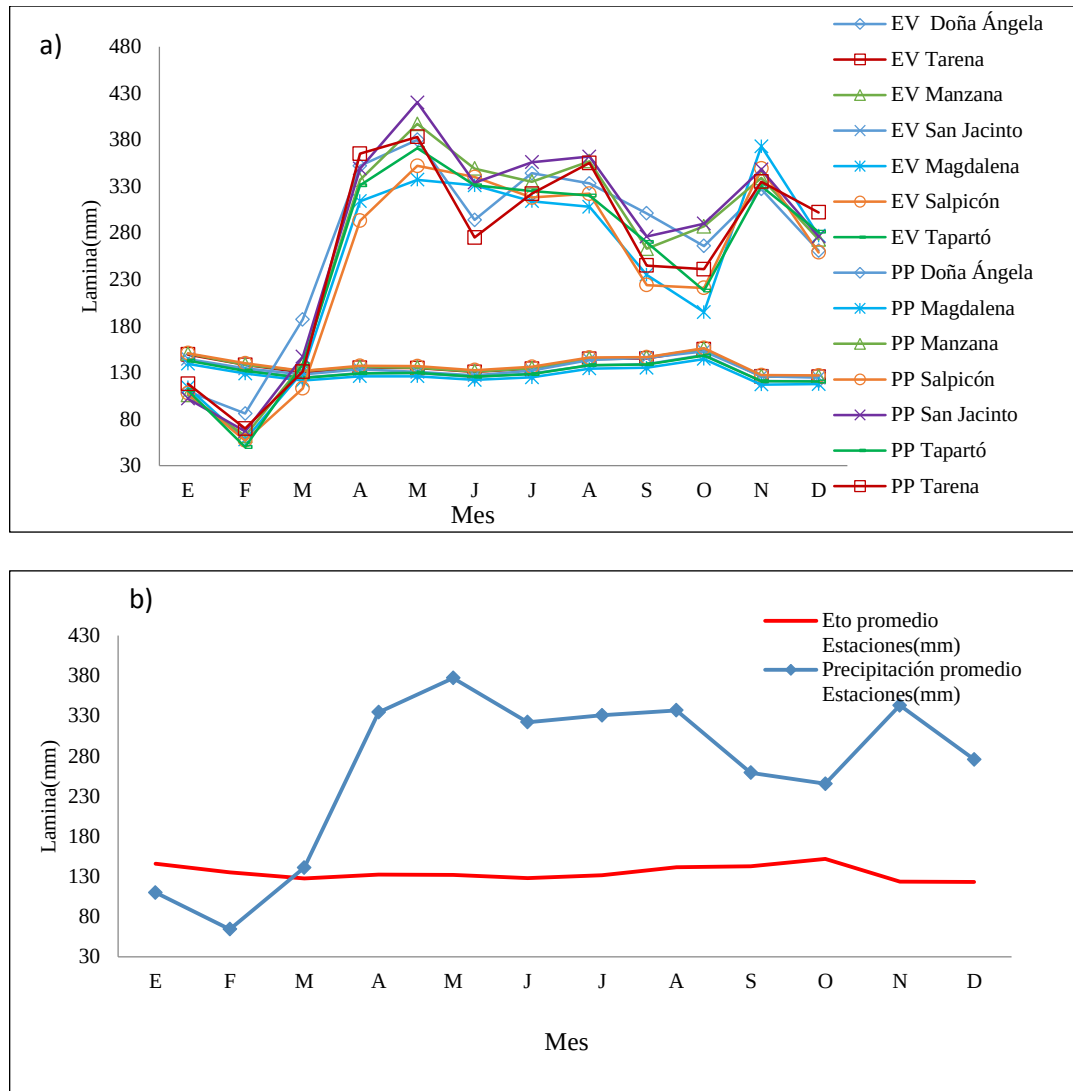


Figura 3. a) EV: Evapotranspiración y PP: precipitación media mensual para las siete estaciones 3b) Evapotranspiración y precipitación media mensual en promedio para la zona de Norte del Urabá.

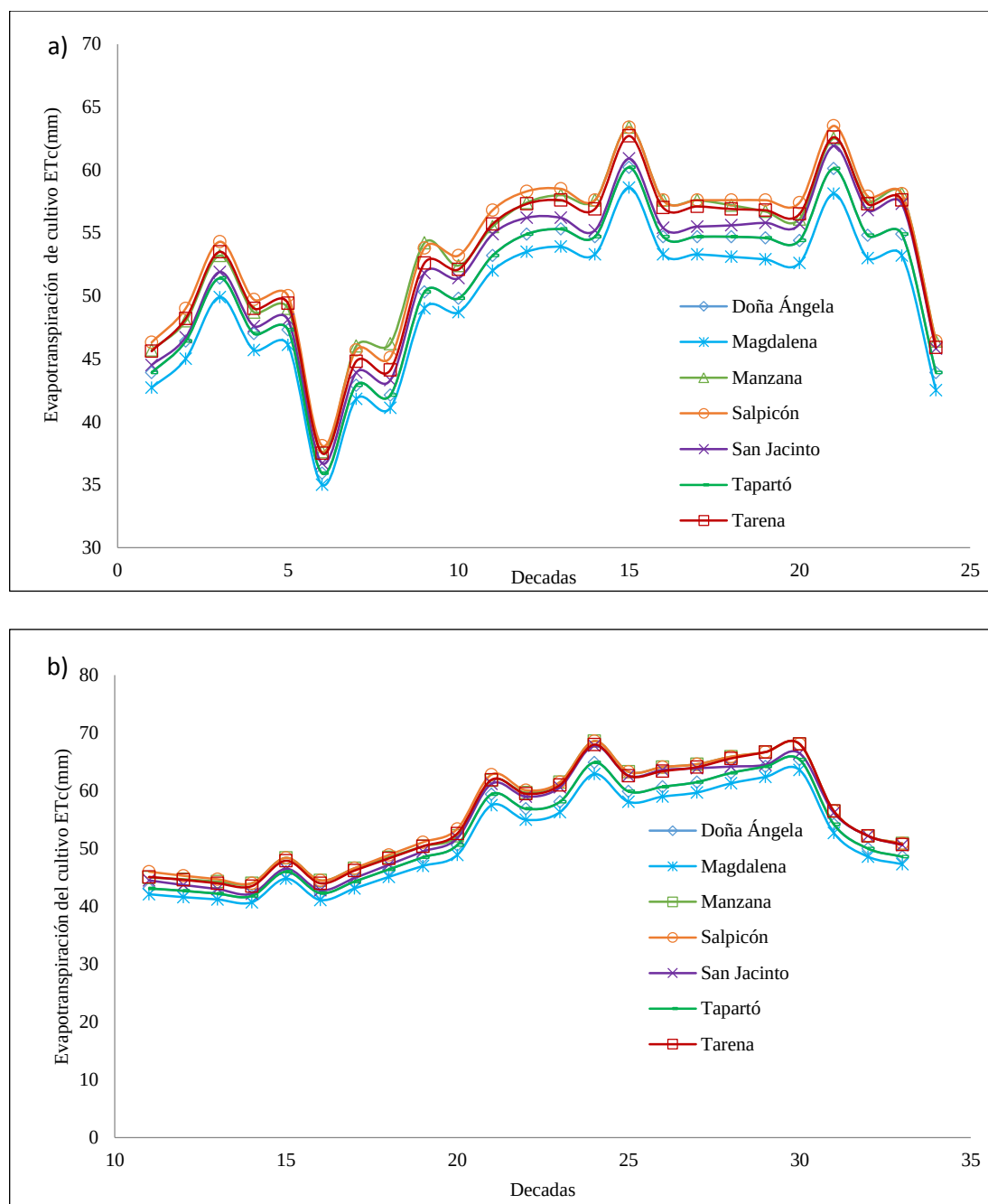


Figura 4. a) Evapotranspiración del cultivo sembrada para época de verano, b) sembrada en época de lluvias (6 de abril).

3.3. Precipitación efectiva (Pef)

En la Figura 5 se presenta el comportamiento anual de precipitación efectiva para el escenario húmedo, seco y normal, esta varió en función de la cantidad de precipitación total registrada (Ruíz *et al.*, 2011) y para los tres escenarios las regiones que presentaron mayor cantidad durante el año fueron San Jacinto, Doña Ángela y Tarena; mientras que los valores más bajos se registraron en Tapartó, Salpico y Magdalena. La menor dispersión entre los valores de Pef se presentó de abril a agosto para el escenario normal. Para los tres escenarios todas las localidades presentaron las cantidades menores de precipitación efectiva en febrero y después el valor aumentó hasta su máximo valor que para todas las estaciones es mayo, a excepción de escenario seco que lo presentó en Julio, en octubre disminuye nuevamente para los escenarios húmedos y normal mientras que para el escenario seco disminuye para el mes de octubre solo para Magdalena y Tapartó mientras para las demás en septiembre, en este mismo sentido en la Figura 5 principalmente Doña Ángela y Tarena en julio -junio pasan a tener menor oferta hídrica que las demás estaciones, a pesar de que en los demás meses se presenten con los valores más alto situación que se manifiesta en todos los escenarios, la estación Magdalena en escenario seco tiende a presentar una menor oferta hídrica en los meses de Agosto y Octubre con respecto a los demás escenarios, igualmente Tarena para el periodo de febrero a marzo en escenario seco pasa a presentar una oferta hídrica mediana con respecto a los demás estaciones, mientras que en los demás escenarios presentan valores altos.

Los valores anuales oscilan para el escenario húmedo de 1888.5 mm (Doña Ángela) a 1822.9 mm (Salpicón), en el escenario normal de 1706.6 mm (Doña Ángela) a 1618.6

mm (Salpicón) y para el escenario seco de 1372.6 mm (Manzana) a 1239.4 mm (Magdalena).

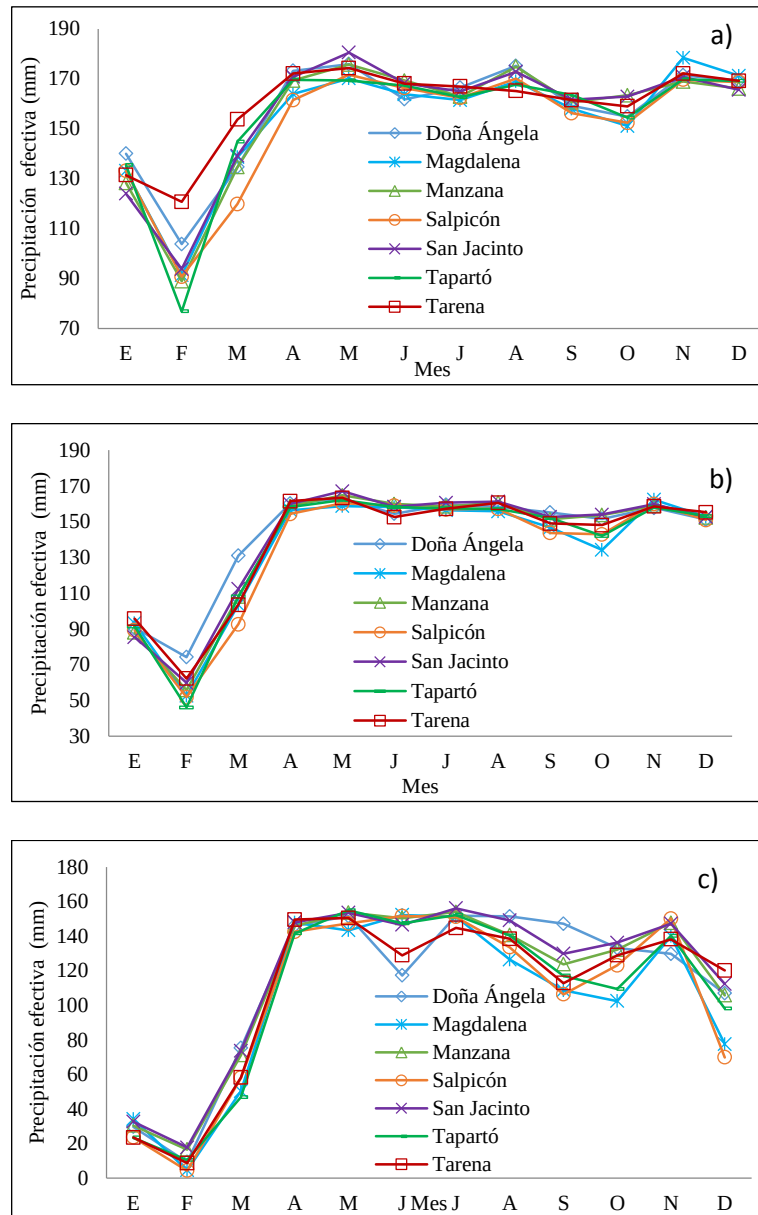


Figura 5. a) Precipitación efectiva (mm) anual para escenario húmedo, b) escenario normal c) seco.

3.4. Requerimiento de Riego

Para el escenario húmedo (20%) con siembra en la época de verano se requirió riego durante todo el periodo con excepción del periodo comprendido entre la primer semana de abril (década10) y finales de Mayo (década20) salvo Salpicón que requirió riego durante todo el periodo del cultivo (Figura 6a), así mismo con la siembra en la época de lluvia se requirió en las siete estaciones desde mediados de julio (década19) hasta finales de septiembre (década 27) y posteriormente en la primer semana de diciembre(década32) (Figura 6 b),la mayor necesidad se presenta para Salpicón y menor para Doña Ángela tanto en temporada de lluvias cómo en época de verano. Para el escenario normal (50%) con fecha de siembra en verano requiere riego en toda la temporada con excepción a mediados de abril (década 11) para todas las estaciones excepto Salpicón que requiere riego toda la temporada, los valores más altos se presentan para Salpicón y menor para San jancito y Doña Ángela (Figura 7a), para la fecha de siembra en temporada de lluvias en el escenario normal requiere riego desde finales de julio (década21) hasta principios de noviembre (31) y posteriormente a principio de diciembre (década34), los valores más altos se presentan para Salpicón y lo más bajo para Doña Ángela (Figura 7b).Para el escenario seco(80%) con siembra en verano todas las estaciones requieren riego en la temporada del cultivo, los valores más altos de requerimiento de riego los presenta Salpicón y Tarena y los menores Magdalena y San Jancito, en cambio para siembras realizadas en la época de lluvia se requiere riego desde finales de Julio (21década) con excepción de Doña Ángela y Tarena que requiere desde principio de junio (década 16) y todas las estaciones requieren riego hasta la primer semana de diciembre (34década)a pesar de que a mediados de noviembre los

requerimientos disminuyen, el menor requerimiento de riego lo presenta Doña Ángela y el mayor Salpicón y Tarena. En general para todos los escenarios a partir de diciembre se requiere riego debido la ubicación más al Norte de la zona de Inter-convergencia Tropical y los valores se presentan bajos para Doña Ángela y los más altos para Salpicón, Magdalena y Tapartó.

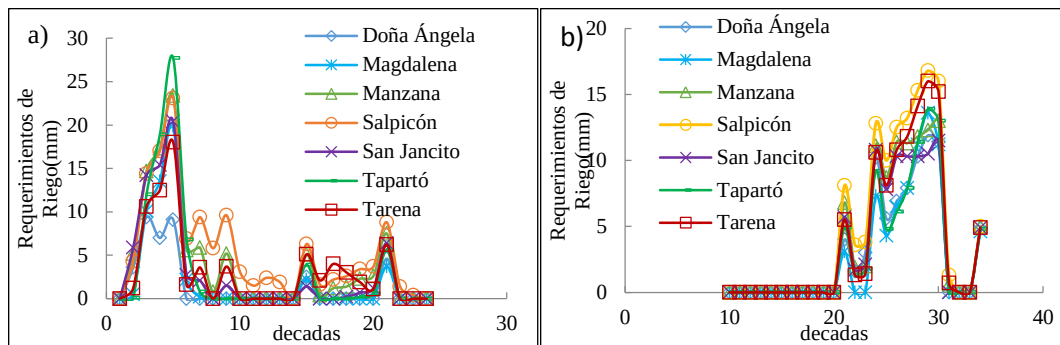


Figura 6. a) Requerimiento de riego para el escenario húmedo con siembra en verano, b) con siembra en época de lluvias.

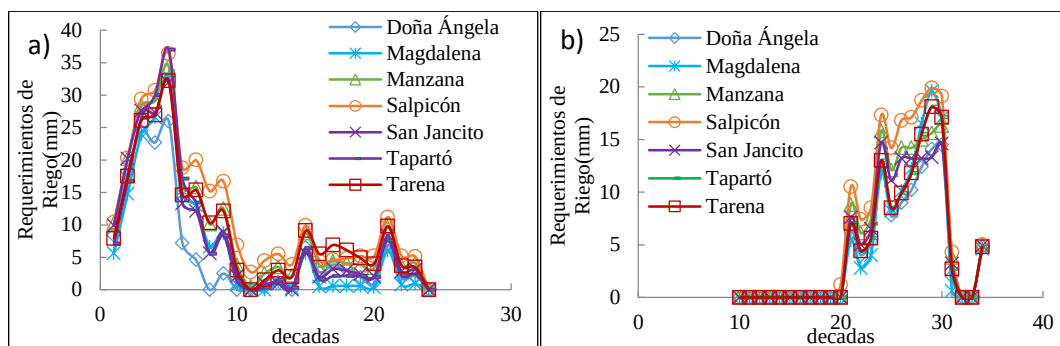


Figura 7. a) Requerimiento de riego para el escenario normal con siembra en verano, b) con siembra en época de lluvias.

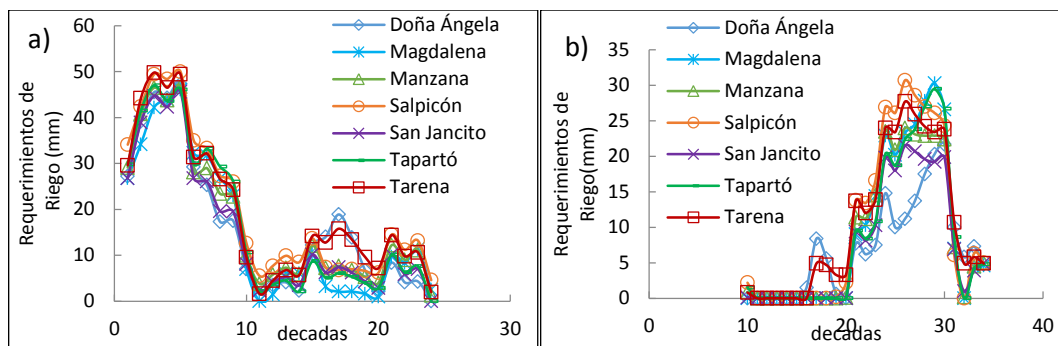


Figura 8. a) Requerimiento de riego para el escenario seco con siembra en verano, b) con siembra en época de lluvias.

En la figura 9 se puede ver que los requerimientos de Riego son mayores para la temporada de verano que para las siembras realizadas en temporada de lluvias (6 de abril)

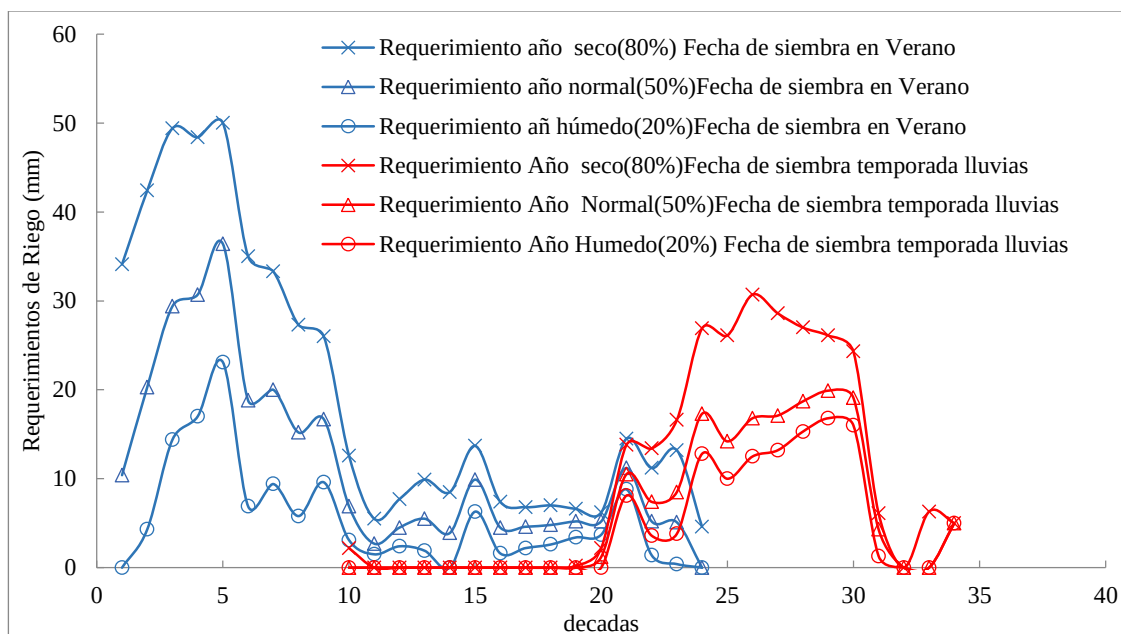


Figura 9. Requerimiento de riego escenario húmedo, normal, seco en temporada de lluvias y de verano para estación Salpicón.

En la Figura 10 se muestra la variación de los requerimientos de riego para el escenario seco (80 %), normal (50%) y húmedo (20%), en todas las estaciones del escenario seco presentó mayor requerimiento de riego que el escenario normal y se encontró que aún en el húmedo es necesario aplicar riego suplementario para satisfacer la necesidades y mantener el cultivo de banano en buenas condiciones, cabe señalar que para el escenario húmedo el promedio de la zona presentó una necesidad de riego de 89 mm año⁻¹ (siembra época de lluvias) y 105mm año⁻¹ (siembra verano), mientras que para el escenario normal requiere 123 mmaño⁻¹ (siembra época de lluvias) y 216mmaño⁻¹ (siembra verano) los cuales se encuentran dentro del rango reportado por IGAC (2007b) y en el escenario seco presentó un requerimiento de riego promedio de 217 mm año⁻¹ (siembra época de lluvias) y 403 mm año⁻¹ (siembra verano).

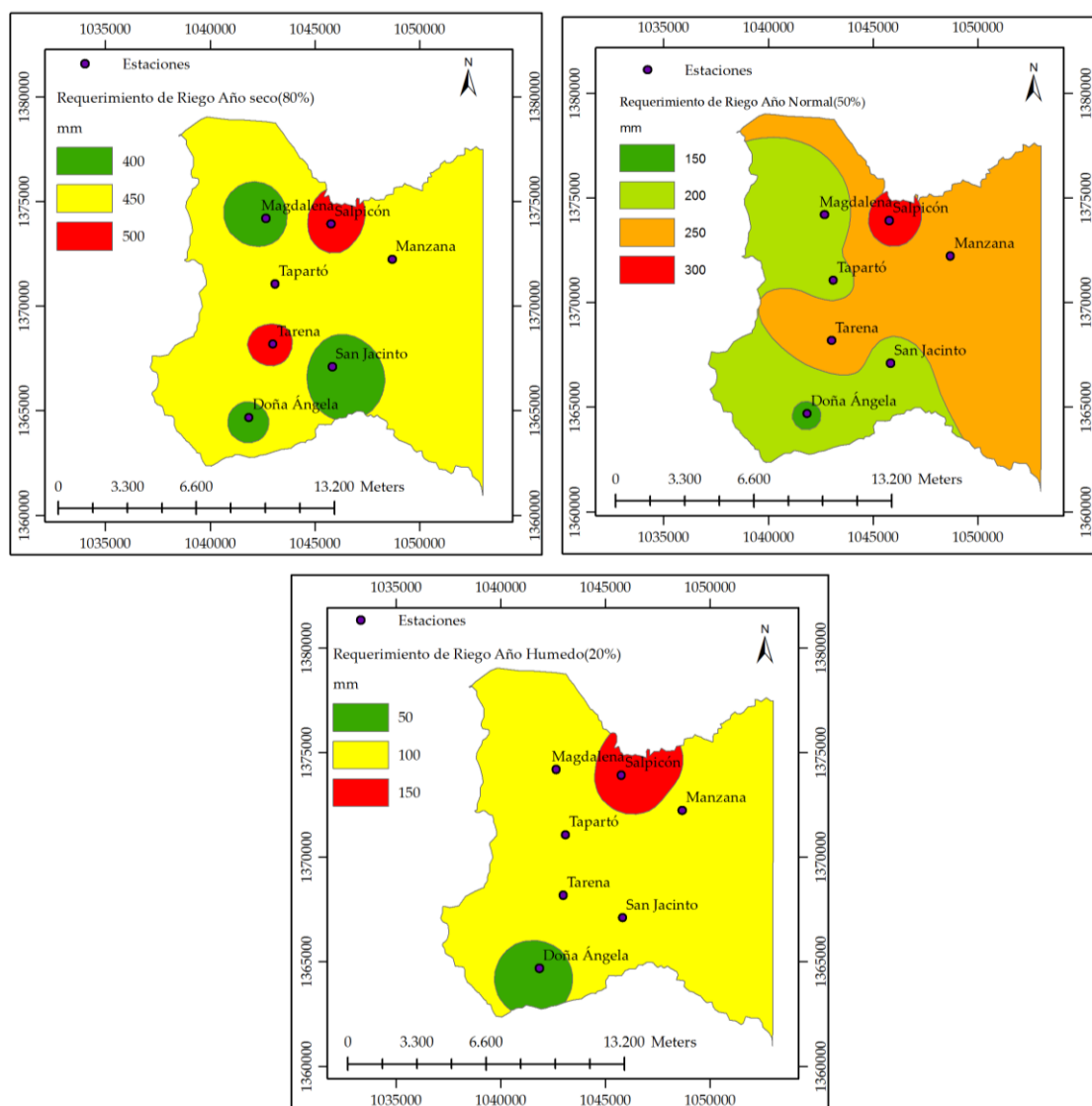


Figura 10. Requerimiento de Riego para año seco (80%) normal (50%) y húmedo (20%) con siembra en verano.

3.5. Reducción del rendimiento

En la Figura 11 Para el escenario normal (50 %), las reducciones en las siete estaciones fueron superior con siembra en verano que en la temporada de lluvias (Fecha óptima), en temporada de verano se presenta reducciones con respecto al potencial del 15% en las

estaciones Salpicón y Manzana, mientras que para el escenario seco (80%) tuvo rangos de 25 a 30 % para la época de verano, y en época de lluvia se presenta rangos de reducción de 5 al 10%, son las estaciones ubicadas al Sur las que más se ven afectadas, los % de reducción se encuentra dentro de los rango donde Martínez (2013) presenta que en todas las fases en que existió un nivel de déficits hídrico en relación con la demanda, se produjo una afectación de la productividad, la cual oscilo entre el 6.88–26.18% en función de la fase y el nivel de afectación hídrica así mismo los valores reportados para % de reducción en siembra óptima están dentro de los encontrados por Wairegi *et al.* (2010) quien identifica los factores más importantes que limitan la producción de banano en Uganda; encontrando un reducción de 5% de producción principalmente por la escasez de precipitaciones a pesar de presentar un promedio de 1132 mm d⁻¹ inferior al utilizado en este estudio.

Cabe destacar que en escenario húmedo para la siembra realizadas en verano presenta reducciones de 0-0.9% son mayores para Salpicón, Manzana y Tarena, mientras para temporada de lluvias presenta reducciones de 0-2% son mayores en Manzana y Tarena.

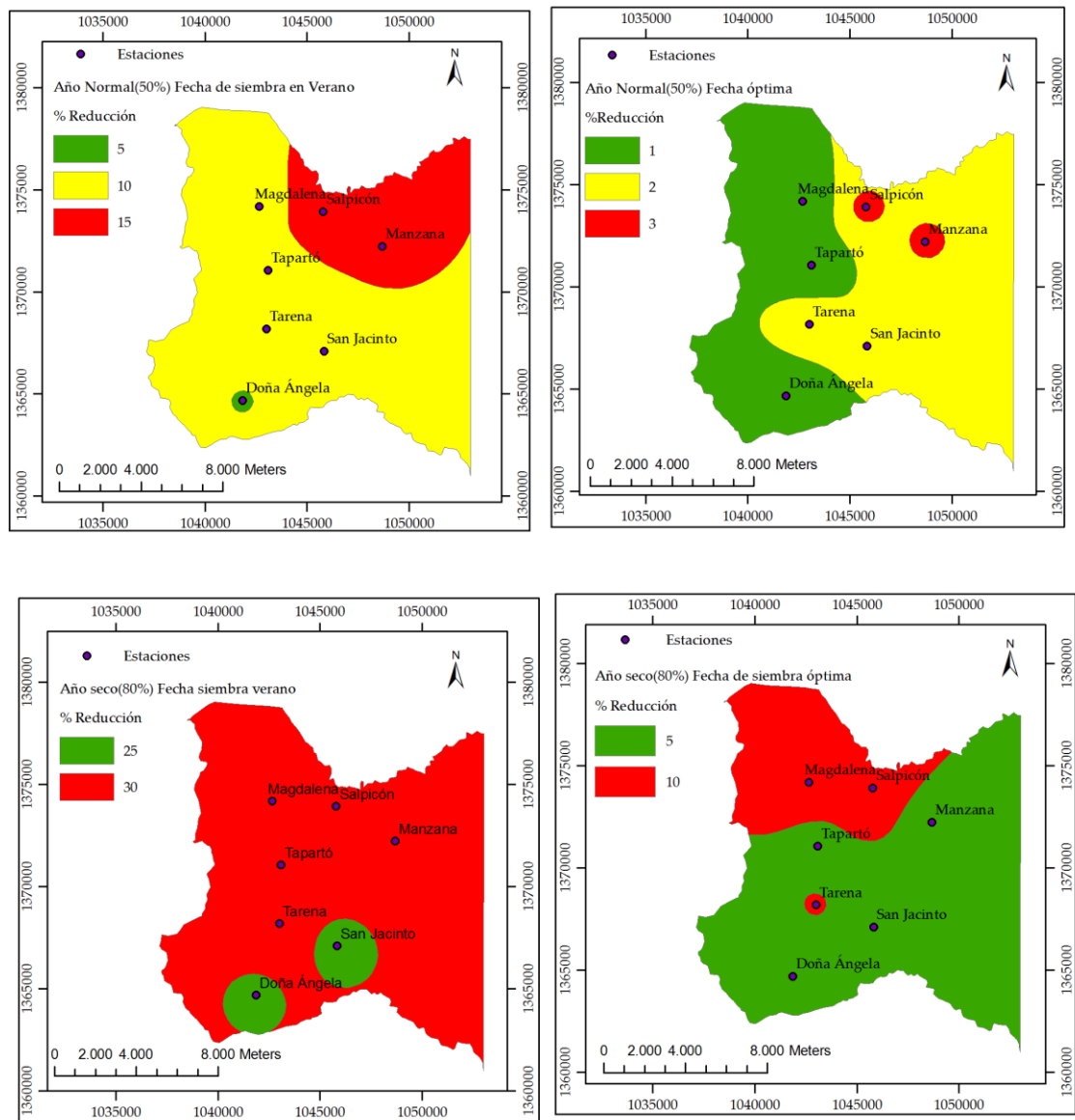


Figura 11. Reducción del rendimiento para el escenario seco (80%) y normal (50%) en condición de secano.

Se realizó una regresión para el escenario normal y seco entre el porcentaje de reducción del rendimiento y los requerimientos de riego de cada una de las estaciones, para obtener un modelo para la zona de estudio (Figura 12 y 13). Caí *et al.* (2007) recomiendan un $R^2 > 0.8$ para un buen ajuste al modelo y acorde al R^2 de 0.876, la regresión obtenida

representa la ecuación de productividad de la zona. Para el banano se presenta rendimiento en buenas condiciones hídricas de (Ym) 40-60 t ha⁻¹ el en trópico según Doorenbos y Kassam (1979) y utilizar la ecuación entre el rendimiento y requerimiento de riego obtenido en la Figura 12 para la época de siembra de verano, se obtiene que para un año normal de no suplir las necesidades hídricas por cada 100 mm se puede reducir 1.42 a 2.13 tha⁻¹, menor a lo encontrado por Stephen *et al.* (1985) quienes observaron que la evapotranspiración (Et) insatisfecha en 100 mm resultó en una pérdida de rendimiento de 3.1tha⁻¹ para el cultivo después del segundo ciclo y una pérdida de rendimiento de 2.6 tha⁻¹ para el primer ciclo. En la zona de Urabá las condiciones de una Finca bananera en general presentan una densidad de siembra de 1600 plantas ha⁻¹ (Martínez y Cayón, 2011) y en el proceso pos cosecha la conversión de racimo a cajas obtiene en promedio un desperdicio de 12% respecto al total de producción y por razones comerciales y exigencias de calidad se presenta ratio (razón de racimos/cajas) de uno y peso de caja 18.6 kg, con dichos indicativo se tienen 33ton ha⁻¹ similar a la producción reportado por Augura (2013), Bajo las condiciones antes mencionadas y con las ecuaciones de la Figura 12 del escenario Normal por cada 100 mm que no se suplan se obtiene una reducción de 3.56% de producción total, equivalente a 1.17 t ha⁻¹, lo que repercute en 0.65 Kg de perdida en el peso en racimo, menor a los encontrados por Goenaga *et al.* (1995) en donde por cada 100mm de disminución del agua de riego resultó en 2.5 a 2.7 kg peso de racimo y a los encontrados por van Asten *et al.* (2011) por cada 100 mm de precipitación ausente causa pérdidas de peso de 1.5 a 3.1 kg. Al aplicar las misma condiciones e indicativos de una finca Bananera a la ecuación de Figura 13 para el escenario seco presentó un perdida de 4.31t ha⁻¹ lo que repercute en 2.41 kg en peso del racimo por cada 100 mm y una reducción de producción del 13.07

%, mayores a los encontrados por Goenaga *et al.* (1995) y similares a los encontrados por Stephen *et al.* (1985) y van Asten *et al.* (2011).

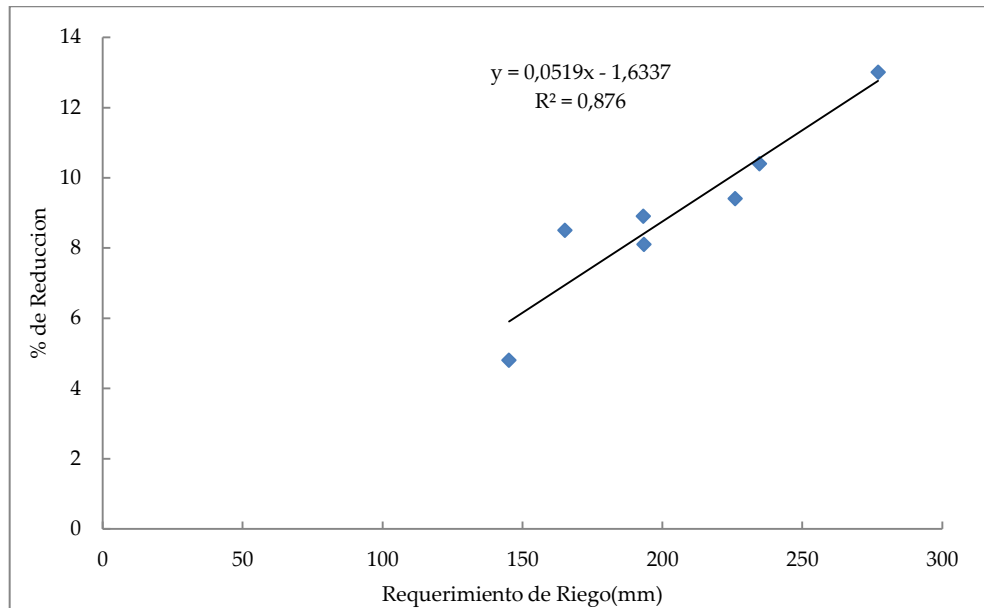


Figura 12. Relación entre el requerimiento de riego en escenario normal y % de reducción de producción (verano).

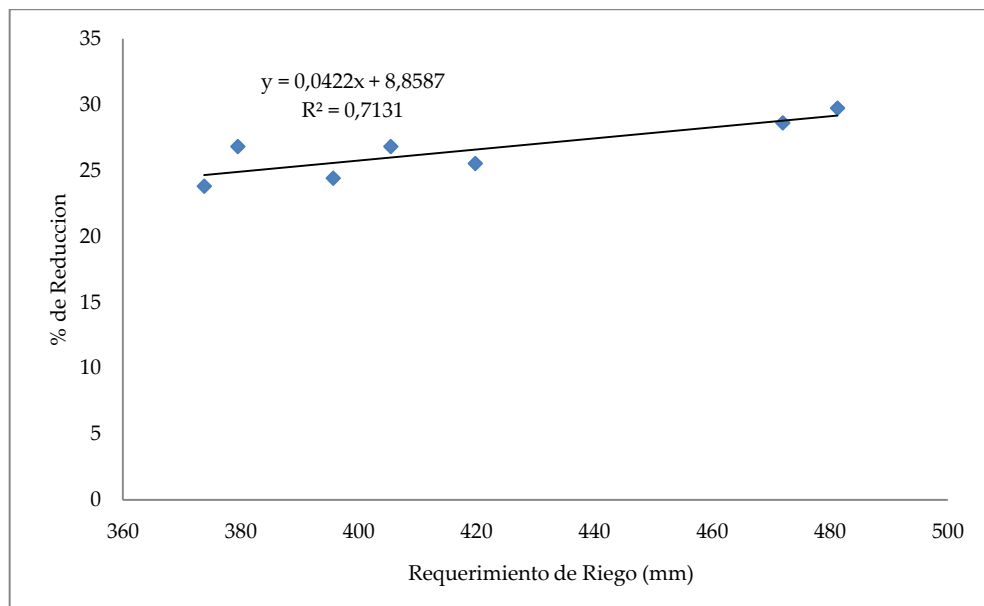


Figura 13. Relación entre el requerimiento de riego en escenario seco y % de reducción de producción (verano).

4. CONCLUSIONES

Las condiciones climáticas en la región Urabá se encuentran en los rangos adecuados para un óptimo desarrollo del banano en escenario húmedo, presenta reducciones en rendimiento menores al 2%; sin embargo, se pueden presentar épocas de déficit de agua en escenarios normales y seco en donde se hace necesario la utilización de riego suplementario indicando que la distribución de la precipitación no satisface las exigencias de la evapotranspiración del cultivo porque presentó reducciones en rendimiento de 15 y 30 %. En el futuro las necesidades de riego serán aumentadas hasta en 50% debido a los escenarios simulados, siendo mayor para las siembras realizadas en enero que las realizadas a partir de seis de abril (Inicio de lluvias). El CROPWATER es una herramienta para identificar la cantidad a regar de agua optimizar los recursos hídricos y maximizar los rendimientos, así mismo la ecuación de productividad da un conocimiento preciso del consumo de agua del cultivo y su respuesta al riego, para los beneficios y los riesgos inherentes a las decisiones de gestión de este

5. REFERENCIAS

- AGRONET (Red de Información y Comunicación Estratégica del Sector Agropecuario). Anuario estadístico del sector agropecuario 2012 Resultados Evaluaciones Agropecuarias Municipales Política Sectorial y Sistemas de Información. Bogotá, Colombia: Ministerio de agricultura y desarrollo rural, 2013, 294 pp.
- ALI, M. H. Models in Irrigation and Water Management. In Practices of Irrigation & On-farm Water Management. Springer New York, 2011, vol. 2, pp. 379-422.

- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D. y SMITH, M. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. N°56 Edición. Italia, Roma, 2006, 323 pp.
- ASCE. Hydrology Handbook. 2 Edición. New York, EE.UU: American Society of Civil Engineers, 1996, 769 pp.
- AUGURA. Coyuntura Bananera 2012. Primera Edición. Colombia, Medellín: Asociación de Bananeros de Colombia, 2013, 51 pp.
- BASSOI, L. H., TEIXEIRA, A. H. D. C., LIMA FILHO, J. M. P., SILVA, J. A. M. E., SILVA, E. E. G. D., RAMOS, C. M. C. y SEDIYAMA, G. C. Guidelines for irrigation scheduling of banana crop in São Francisco Valley, Brazil. II - Water consumption, crop coefficient, and physiological behavior. Revista Brasileira de Fruticultura. Vol. 26, num.3, 2004, pp. 464-467.
- CAÍ, J., LIU, Y., LEI, T. y PEREIRA, L. S. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman–Monteith equation using daily weather forecast messages. Agricultural and Forest Meteorology. Vol. 145, num.1–2, 2007, pp. 22-35.
- CARR, M. K. V. The water relations and irrigation requirements of banana (*Musa spp.*). Experimental agriculture. Vol. 45, num.03, 2009, pp. 333-371.
- CIGALES, M. y PÉREZ, O. Variabilidad de suelos y requerimiento hídrico del cultivo de banano en una localidad del Pacífico de México. Avances en Investigación Agropecuaria. Vol. 15, num.3, 2011, pp. 21-31.
- CHOPIN, P. y BLAZY, J.-M. Assessment of regional variability in crop yields with spatial autocorrelation: Banana farms and policy implications in Martinique. Agriculture, Ecosystems & Environment. Vol. 181, 2013, pp. 12-21.

DASTANE, N. G. Precipitación Efectiva en la Agricultura de Regadío. N° 25 Edición. Roma, Italia: FAO. Riego y Drenaje, 1977, 68 pp.

DOORENBOS, J. y KASSAM, A. Efectos del Agua sobre el Rendimiento de los Cultivos. N° 33 Edición. Roma, Italia: FAO Riego y Drenaje, 1979, 212 pp.

DOORENBOS, J. y PRUITT, W. las Necesidades de Agua de los Cultivos. N°24 Edición. Roma, Italia: FAO Riego y Drenaje 1977, 194 pp.

EID, H. M., EL-MARSAFAWY, S. y OUDA, S. A. Assessing the impact of climate on crop water needs in Egypt: the CROPWAT analysis of three districts in Egypt. CEEPA Discussion Papers. Vol. 29, 2006, pp. 1-35.

ESPINAL, C. F., MARTÍNEZ, C. H. J. y ACEVEDO, G. X. La cadena del Banano en Colombia: una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005. Bogotá, Colombia: Ministerio de Agricultura y desarrollo rural observatorio de agrocadenas Colombia, 2005, 51 pp.

FREITAS, W. D. S., RAMOS, M. M. y COSTA, S. L. D. Demanda de irrigação da cultura da banana na bacia do Rio São Francisco. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Vol. 12, num.4, 2008, pp. 343-349.

GEORGE, B., SHENDE, S. y RAGHUWANSHI, N. Development and testing of an irrigation scheduling model. Agricultural Water Management. Vol. 46, num.2, 2000, pp. 121-136.

GIORGIS, K., TADEGE, A. y D, T. Estimating crop water use and simulating yield reduction for maize sorghum in Adama Miesso districts using the CROPWAT model. CEEPA Discussion Papers. Vol. 31, 2006, pp. 14.

GOENAGA, R., IRIZARRA, H., COLEMAN, B. y ORTIZ, E. D. T. Drip irrigation recommendations for plantain and banana grown on the semiarid southern coast of Porto

Rico. Journal of Agriculture of the University of Porto Rico. Vol. 79, num.1-2, 1995, pp. 13-27.

GUARÍN, G. W. G. Impacto de la Variabilidad Climática en la Producción de Banano en el Urabá Antioqueño. Tesis para optar al título de Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, 2011,145 p.

HARGREAVES, G. H. y SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. American Society of Agricultural Engineers (Microfiche collection) (USA). Vol. 1, num.2, 1985, pp. 96–99.

IDEAM. Atlas climatológico de Colombia. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia). 2005, 217 p

IDEAM. Estudio Nacional del Agua 2010. Bogotá DC: Instituto de Hidrología Meteorología y estudios Ambientales, 2010, 409 pp.

IGAC. Estudio semidetallado de suelos de las áreas potencialmente agrícolas. Urabá Departamento de Antioquia. Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2007, 489 pp.

INFANTE, G. S. y ZARATE, D. L. G. Métodos estadísticos: un enfoque interdisciplinario. Segunda Edición. DF, México: Editorial Trillas, 1990, 634 pp.

KARANJA, F. Cropwat model analysis of crop water use in six districts in Kenya. Nairobi, Kenya: Department of Meteorology, University of Nairobi, 2006, 35 pp.

MACHOVINA, B. y FEELEY, K. J. Climate change driven shifts in the extent and location of areas suitable for export banana production. Ecological Economics. Vol. 95, 2013, pp. 83-95.

MARINATO, R. Irrigação da bananeira. Informe Agropecuário. Vol. 6, num.63, 1980, pp. 42-45.

MARTÍNEZ, A. A. M. y CAYÓN, S. D. G. Dynamics of Growth and Development of Banana (Musa AAA Simmonds cvs. Gran Enano and Valery). Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín. Vol. 64, num.2, 2011, pp. 6055-6064.

MARTÍNEZ, V. R. Efecto del riego deficitario controlado en la productividad del banano. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. Vol. 22, num.2, 2013, pp. 51-55.

MOLUA, E. L. y LAMBI, C. M. Assessing the impact of climate on crop water use and crop water productivity: The CROPWAT analysis of three districts in Cameroon. Buea, Cameroon: CEEPA, 2006, 44 pp.

MONTENEGRO, A. A. T., GOMES, A. R. M., DE MIRANDA, F. R. y CRISÓSTOMO, L. A. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo da bananeira para a região litorânea do Ceará. Revista Ciência Agronômica. Vol. 39, num.2, 2008, pp. 203-208.

QUICENO, M. M. Influencias de la precipitación y evaporación sobre la producción de banano en una hacienda del Urabá Antioqueño: condiciones normales y El Niño. Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia. 2004, pp. 19.

ROBINSON, J. C. Bananas and Plantains. . Primera edición Edición. Wallingford, U.K, 1996, 238 pp.

ROBINSON, J. C. y ALBERTS, A. J. Seasonal variations in the crop water-use coefficient of banana (cultivar William) in the subtropics. Scientia Horticulturae. Vol. 40, num.3, 1989, pp. 215-225.

ROLDÁN, P. A. V. Modelamiento del patrón de circulación de la bahía Colombia, Golfo Urabá. Implicaciones para el transporte de sedimentos. Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Escuela de Geociencias y Medio ambiente, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos hidráulicos, 2008, 113 p.

RUÍZ, Á. O., ARTEAGA, R. R., VÁZQUEZ, P. M. A., LÓPEZ, L. y ONTIVEROS, C. R. E. Requerimiento de riego y predicción del rendimiento En gramíneas forrajeras mediante un modelo De simulación en Tabasco, México. *Agrociencia*. Vol. 45, num.7, 2011, pp. 745-760.

SHEN, Y., LI, S., CHEN, Y., QI, Y. y ZHANG, S. Estimation of regional irrigation water requirement and water supply risk in the arid region of Northwestern China 1989–2010. *Agricultural Water Management*. Vol. 128, 2013, pp. 55-64.

SMITH, M. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management. N°46 Edición. Roma, Italia: Food & Agriculture Org., 1992, 122 pp.

STEDUTO, P., HSIAO, T. C., FERERES, E. y RAES, D. Crop yield response to water. primera Edición. Roma, Italia: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012.

STEPHEN, C. H. Y., SAMMIS, T. W. y WU, I. P. Banana yield as affected by deficit irrigation and pattern of lateral layouts. *Transactions of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers*. Vol. 28, num.2, 1985, pp. 507-510.

TURNER, D. W., FORTESCUE, J. A. y THOMAS, D. S. Environmental physiology of the bananas (*Musa spp.*). *Brazilian Journal of Plant Physiology*. Vol. 19, num.4, 2007, pp. 463-484.

VAN ASTEN, P. J. A., FERMONT, A. M. y TAULYA, G. Drought is a major yield loss factor for rainfed East African highland banana. *Agricultural Water Management*. Vol. 98, num.4, 2011, pp. 541-552.

WAIREGI, L. W. I., VAN ASTEN, P. J. A., TENYWA, M. M. y BEKUNDA, M. A. Abiotic constraints override biotic constraints in East African highland banana systems. *Field Crops Research*. Vol. 117, num.1, 2010, pp. 146-153.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES GENERALES

El relleno de las series en las variables precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima con los métodos RM, WS y RL presentaron estadísticos RE, RCCME y MAE similares, pero el valor mayor del índice (d) para la precipitación se tuvo con el método WS, la temperatura mínima con los métodos WS y RM fue similar y para la temperatura máxima RM, WS y RL tuvieron un comportamiento semejante, por ende su utilización con llevaría a determinar errores similares, se utilizó el método WS, ya que los métodos RL y RM presentaron bajos coeficientes de determinación.

Los coeficientes a y b de Frere *et al.* (1978) mostraron similitud en los estadísticos RE y RCCME con los coeficiente ap y bp y presentan mayor R^2 y por esto se optó por utilizar los coeficientes $a=0.29$ y $b=0.49$ de Frere *et al.* (1978) para calcular la radiación e implementarla en el cálculo de la evapotranspiración, y no se recomienda el método propuesto por Samani (2000) para la estimación de radiación.

El modelo EtoHS1985 para el cálculo de la evapotranspiración de referencia dentro y fuera de la zona de estudio tuvo los mejores estadísticos con los valores más bajos de RCCME y RE, y R^2 mayores a 0.777, el valor de la pendiente se aproxima más a la unidad y el intercepto a cero con lo anterior las estimaciones de EtoHS1985 se ajustan mejor a las estimaciones de PM. La implementación del modelo lineal entre EtoHS1985 y PM reducen los errores en 29.6% y se obtiene una $R^2 > 0.8$ en la EtoHS1985 por lo que se recomienda el uso de estos coeficientes para ajuste a PM, de la misma forma con la EtoHargreaves se reducen los errores 6.81% al aplicar el modelo lineal con PM, pero los

R^2 son bajos con valores menores a 0.8 dando poca validez a la utilización de coeficientes obtenidos en el modelo lineal situación presentada tanto dentro como fuera de la zona de estudios. La utilización de coeficientes calibrados como fue el caso de Eto-PM-Rsfrere (1978) para la zona permitió disminuir la incertidumbre en cálculo de Eto.

La zona de estudio presentan déficit entre enero y marzo de 10-80mmm mayores en la parta Norte y de abril a diciembre excesos de 1400-1800mm superiores en la parte Sur, la zona Norte del eje bananero del Urabá Antioqueño presenta dos regiones climáticas de acuerdo a la clasificación propuesta por Thornthwaite: Muy húmeda en la zona Norte y como súper húmeda en zona Sur Occidental ambas con deficiencia pequeña o nula (HA), clima cálido (TA) y concentración térmica normal (CA).

Las fechas de inicio de criterio 1 pueden ser buena guía para iniciar labores como fertilización y preparación del terreno (subsulado, héroles), presentó valores similares al criterio 2, el primero con tendencia (Sur Occidente rumbo Norte), segundo (Sur Oriente rumbo Norte), el criterio 3 varía en función a la ausencia de precipitación (Norte), sin embargo los inicios más tardíos de estación de crecimiento los presentó el 3 pues estos inicios tienen los menores riesgo de someter a la plantación a estrés en fase vegetativa por lo que sería recomendable utilizarlo para el establecimiento de nuevas plantaciones y de igual forma para la programación de resiembra o ajuste de la plantación utilizando riego ya que el régimen de precipitación no alcanza a satisfacerlas. Las estaciones ubicadas al Noroccidente de la zona de estudio presentaron mayor probabilidad de periodos secos para las diferentes duraciones evaluadas y por ende los valores más bajos de EC son para estas estaciones.

Las condiciones climáticas en la región Urabá se encuentran en los rangos adecuados para un óptimo desarrollo del banano en escenario húmedo, presenta reducciones en rendimiento menores al 2%; sin embargo, se pueden presentar épocas de déficit de agua en escenario normal y seco en donde se hace necesario la utilización de riego suplementario indicando que la distribución de la precipitación no satisface las exigencia de la evapotranspiración del cultivo porque presentó reducciones en rendimiento de 15 y 30 % con siembra en verano y 3-10% con siembra en fecha óptima (después de que las lluvias lleve el suelo a capacidad de campo) en escenario normal y seco respectivamente, los valores más altos de reducción y requerimientos están al Nororiente, con valores de 500, 300 ,150 mm escenario seco, normal y húmedo respectivamente, por lo tanto en el futuro las necesidades de riego serán aumentadas hasta en 50% debido a los escenarios simulados, son mayores para siembras realizadas en enero que a partir del seis de abril (Inicio de lluvias). El CROPWAT es en una herramienta para identificar: la cantidad a regar, optimizar los recursos hídricos y maximizar los rendimientos, así mismo la ecuación de productividad da un conocimiento preciso del consumo de agua del cultivo y su respuesta al riego, para los beneficios y los riesgos inherentes a las decisiones de gestión de este.

)