

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Carlos Terán¹,
Carlos Jiménez²,
Carlos González³
Edgar Villaneda⁴

ABSTRACT

Title: Methodology for agroclimatic classification at La Mojana Region in Colombia with the Geographic Information System ARC/Info®

A methodology for agroclimatic classification was developed in La Mojana region of Colombia using the Geographic Information System ARC/Info. Data considering the temporal variation of climate at different locations, as well as temporal changes in soils and cover vegetation of La Mojana were used for this purpose. Processing of data was performed using both, Cluster Analysis and the principal component analysis (PCA). The information collected was incorporated into the ARC/Info program, by means of the algorithm named "inverse system weighted interpolation". Based on two leading maps which describe 87,2% of the variation in precipitation during two decades, a geographic matrix was developed applying the PCA technique, and selecting those components which exhibited the greatest variability. The final classification for the most representative regions of La Mojana was performed using Cluster Analysis.

Key words: agroclimatic classification, principal component analysis, Geographic Information System (GIS), La Mojana, Colombia

1. Programa Nacional de Manejo Integrado de Suelos y Aguas, CORPOICA, C.I. Tibaitatá, A.A. 240142-Las Palmas, Santa Fe de Bogotá, e-mail: cteran@corpoica.org.co; 2. Tesis para optar al título de Ingeniero Agrícola; 3. Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Ciudad Universitaria, sede Bogotá, e-mail: carlosg@ingenieria.ingsala.unal.edu.co; 4. Programa Nacional de Manejo Integrado de Suelos y Aguas, CORPOICA, C.I. Tibaitatá, A.A. 240142-Las Palmas, Santa Fe de Bogotá, e-mail: evillaneda@corpoica.org.co.

Metodología para la zonificación agroclimática de la región de La Mojana mediante el sistema de información geográfica ARC/Info®

RESUMEN

El estudio desarrolló una metodología objetiva de zonificación agroclimática mediante el uso del sistema de información geográfica (SIG) ARC/Info®. Se consideró la variación espacio-temporal de los elementos climáticos y espaciales del suelo y la vegetación pre-valetientes en la región de La Mojana (Colombia), para lo cual se empleó la información de 30 estaciones pluviométricas, una estación pluviográfica y 13 estaciones climáticas; para el procesamiento de los datos se combinaron técnicas de agrupamiento estadístico-matemáticas (análisis de Cluster y de Componentes Principales).

Toda la información se desplegó en el sistema de información geográfica ARC/Info®, con celdas de 250 x 250 m² (6.25 ha), y se interpoló mediante el algoritmo denominado "distancia inversa ponderada" propuesto por Watson y Philip en 1985. La zonificación se efectuó teniendo en cuenta los excesos de precipitación derivados del balance hídrico y que se producen durante el período de lluvias; estos excesos se presentaron en las décadas 12 a 33. Con base en dos mapas, se creó una matriz geográfica en donde cada mapa representa la variación espacial de los excesos de precipitación en una década. A esta matriz se aplicó la técnica de Análisis de Componentes Principales (ACP), escogiéndose aquellos que presentaron la mayor variabilidad. Después, se aplicó el Análisis de Cluster usando el método de isocluster, para producir la zonificación final.

Palabras claves: zonificación agroclimática, análisis de componentes principales, sistemas de información geográfica (SIG,) La Mojana.

"El método, aunque sea indigesto y espeso, es más importante que los descubrimientos de la ciencia"
CARL SAGAN, 1995

INTRODUCCIÓN

EN EL MARCO del proyecto "Adaptabilidad de la producción agropecuaria sostenible en los ecosistemas de la región de La Mojana", desarrollado por CORPOICA y el Instituto Nacional de Adecuación de Tierras (INAT), y el cual busca la formulación de alternativas viables para la producción agropecuaria de dicha región, fue necesario articular un modelo que permitiera entender el comportamiento dinámico del agua como elemento primordial de los ecosistemas allí presentes.

Para la obtención de este modelo regional era preciso evaluar el comportamiento climático desde el punto de vista agrícola; sin embargo, los métodos tradicionales de clasificación climática no respondían a las necesidades planteadas, por el bajo nivel de detalle que arrojan sus resultados (debido a la homogeneidad climática de la región) y por la escala para la cual fueron diseñados. Por estas razones, con el objeto de

identificar las características agroclimáticas de la región y su relación suelo-agua-planta, se implementó la presente metodología, la cual arrojó resultados más detallados y cercanos a la realidad.

La importancia del alcance metodológico logrado, radica principalmente en la aplicación de los métodos de análisis para arreglos multivariados, como el Análisis de Componentes Principales (ACP) y de Cluster, para obtener una zonificación agroclimática más objetiva de la región de La Mojana. Dicha zonificación no dependió de rangos de parámetros preestablecidos u orientaciones subjetivas del evaluador, sino del análisis estadístico-matemático de la información agroclimática suministrada.

Otra ventaja del método desarrollado es que tiene en cuenta las relaciones ocultas entre elementos climáticos diversos. Al respecto, Williams y Masterton (1980) afirman que: "las relaciones espaciales climáticas pueden ser implícitas, como cuando los datos son dibujados y luego sobrepuestos en mapas que muestran la información topográfica". Y después: "la zonificación, al igual que el análisis de recursos agroclimá-

ticos, requiere la implementación de relaciones, sean o no reconocidas, entre el clima y la agricultura, y entre los climas de las áreas y sus puntos de observación” (Williams y Masterton, 1980; p. 50). Según estos autores, las principales aplicaciones de los análisis climáticos y su clasificación, necesariamente deben incluir mapas a fin de alcanzar una combinación subsecuente de los datos acerca del clima con otros tipos de información (suelos, vegetación, demografía y sistemas agrícolas).

Se ha considerado llevar a cabo una segunda etapa del estudio, en la cual se verificaría la adaptabilidad teórica de especies modales y potenciales, como demanda de la oferta climática caracterizada en esta primera parte. Dicha etapa iniciaría con la integración de la información agroclimática y los niveles de inundación de la región.

Consideraciones sobre los sistemas de clasificación agroclimática

Por lo general, las clasificaciones climáticas más usadas son definidas *a priori*, puesto que asignan valores obtenidos de las estaciones meteorológicas, para diferentes variables medibles, a una clase o categoría predeterminada; entre este tipo de clasificaciones se cuentan: De Martonne (1926), Köppen (1936), Thornthwaite (1948), Emberger (1955), Gaussen (1955), Thornthwaite y Mather (1955), Troll (1965) y Hargreaves (1971), entre otras. Estas clasificaciones subjetivas dependen excesivamente del criterio de cada autor.

Otro factor a considerar es la variación espacio-temporal de los elementos climáticos; según Grove (1980): “es reconocido que los elementos climáticos, especialmente en los trópicos, varían en cortas distancias, de acuerdo con la topografía y con otras condiciones, las cuales no siempre son fáciles de tener en cuenta” (Grove, 1980; p. 4). Ciertamente, la mayoría de los modelos actuales son modelos no espaciales, pues se basan en el concepto de que un valor medido representa un área homogénea alrededor del punto evaluado, lo cual no siempre es cierto para el caso de grandes variaciones climáticas o topográficas (Hashmani, García y Fontane, 1995).

El procedimiento propuesto en este trabajo busca definir una clasificación más objetiva que, mediante agrupamiento de los elementos climáticos según su naturaleza y afinidad, permita ordenar la región en grupos con un alto grado de asociación entre sus miembros; esta clasificación se obtiene utilizando técnicas estadístico-matemáticas de agrupamiento.

Comúnmente, los análisis de datos tratan de coleccionar la información a partir de muchas muestras cuyas características varían. Estos análisis tradicionales se fundamentan en una o dos variables simultáneas, si bien usualmente concurren más variables para las cuales es necesario descubrir sus relaciones; dicho análisis se denomina “análisis multivariado”. Los métodos multivariados más importantes son: el Análisis de Componentes Principales (ACP), el análisis de Cluster, el árbol de expansión mínima, el análisis discriminante y el análisis de correspondencia.

La utilidad de los métodos de análisis multivariado, con propósitos de clasificación y exploración de la información, se ha aplicado en varias ramas de la ciencia como la teledetección (Gillespie, 1992), la hidrología (Mallants y Feyen, 1990), los suelos, etc. Sobre este tipo de clasificación, Russell (1978) dice lo siguiente: “El análisis multivariado ha afectado la clasificación en varios campos científicos. Ha tenido un gran valor en el campo de la microbiología, donde las clasificaciones previas basadas en un gran número de criterios fueron insatisfactorias”; también afirma que: “los principales métodos de análisis multivariado que pueden ser usados en el estudio del clima son: 1) la clasificación usando medidas de similaridad (análisis de Cluster), y 2) la ordenación usando una variedad de análisis, incluido el ACP” (Russell, 1978; p. 49-50).

El análisis de cluster se ha implementado en Colombia para la zonificación de elementos climáticos como la precipitación y el brillo solar (Jaramillo y Chaves, 1996). El método de ACP ha sido aplicado en varios estudios climáticos, principalmente para zonificar la precipitación (Balsirwa, 1995; Mallants y Feyen, 1990; Gadgil y Joshi, 1980). En sentido estricto, el ACP no es un método para clasificar, sino una herramienta para sacar de un determinado grupo de datos la máxima información posible; los objetivos de un ACP son los siguientes: la reducción de la dimensionalidad, la determinación de combinaciones lineales de variables, la selección de características y de las variables más apropiadas, la visualización multidimensional de los datos, la identificación de variables subyacentes (correlacionadas) y la identificación de grupos de objetos o de errores. El objetivo de aplicar un ACP que con mayor frecuencia reporta la literatura, es el de agrupar una gran cantidad de variables en número menor a las originales. Otros nombres dados al ACP son: análisis de vectores principales (*eigen vector analysis*), funciones empíricas ortogonales y descomposición singular.

Descripción del área de estudio

La Región de La Mojana está localizada en la parte norte de Colombia. Tiene una extensión aproximada de 513.464 ha, de las cuales el 72% pertenece al departamento de Sucre, el 16% al departamento de Bolívar, el 10% al departamento de Córdoba y el 2% a Antioquia (Figura 1).

La región presenta forma de elipse; su eje mayor tiene una longitud aproximada de 119.5 km en dirección norte-sur, mientras el eje menor perpendicular tiene 71.5 km. Está ubicada entre las coordenadas 8° 00' y 9° 30' de latitud norte, y 75° 15' y 73° 45' de longitud oeste. El modelo digital de terreno de La Mojana, muestra que la altitud oscila entre 10 y 240 metros; la única zona donde se encuentran cerros es al sur, en Ayapel, con alturas cercanas a los 500 metros, mientras el resto de la región es completamente plano. El relieve de la superficie terrestre, así como las corrientes de agua, se proyectan de sur a norte (Figura 2).

Materiales y métodos

Uso de la metodología SIG para la zonificación agroclimática

Para formular la zonificación se utilizó información climática, de suelos (capacidad máxima de retención unitaria) y de usos del suelo (profundidad radical). Williams y Masterton (1980), en el marco de una reunión sobre clasificación climática realizada en Andhra Pradesh (India) en 1980, sostienen que: “...para este propósito es útil considerar tres categorías generales: zonificación climática, zonificación agroclimática y zonificación de recursos climáticos” (Williams y Masterton, 1980; p. 45-57). Aseguran que la segunda categoría se deriva de estudios que consideran variables de interés particular para la agricultura, por ejemplo: ciclos de cultivo o índices climáticos de humedad. Por esta razón, la presente metodología se considera como una clasificación agroclimática.

La información climática fue suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM); los registros se seleccionaron a partir de 44 estaciones que monitorean la región, las cuales corresponden a 30 estaciones pluviométricas, una pluviográfica, una sinóptica y 12 climatológicas. Las 44 estaciones iniciales se eligieron por presentar períodos comparables y ubicación representativos; entre ellas, 13 estaciones quedan dentro de la región y las demás se escogieron porque garantizan una mayor cobertura y evitan los efectos de borde. Dadas las mínimas variaciones topográficas dentro de la región, las estaciones se-

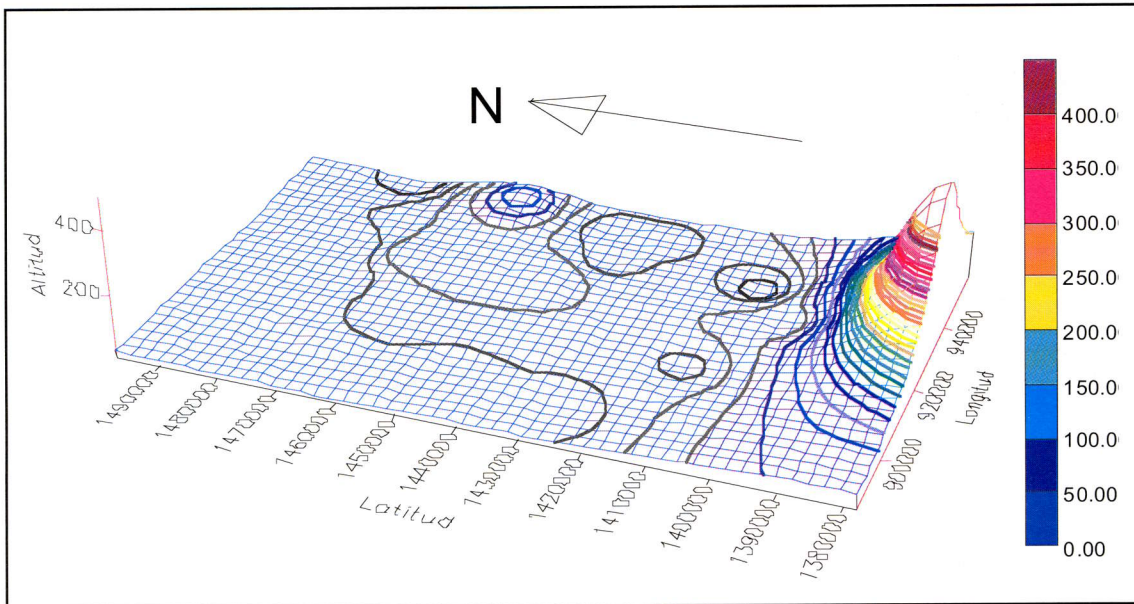


Figura 2. Modelo digital de terreno de la región de La Mojana.

leccionadas constituyen una red de monitoreo adecuada para el estudio.

Previamente a cualquier manipulación de la información, se realizó control de la calidad de los elementos climáticos estudiados. A esta información le fueron aplicadas pruebas de consistencia, homogeneidad y chequeo de valores atípicos (*outliers*) temporalmente. En este trabajo, el estudio de calidad de la información permitió escoger 32 estaciones con información de precipitación, 9 con temperatura media, 4 con velocidad del viento, 9 con humedad relativa y 6 con información de brillo solar.

La información climática para cada elemento se desplegó sobre el área de La Mojana usando el programa ARC/Info®. Las estaciones se localizaron convirtiendo sus

coordenadas geográficas en coordenadas planas, mediante el empleo de la proyección transversal Mercator y el elipsoide internacional.

Los datos climáticos se representaron espacialmente en el SIG usando el método de interpolación de distancia inversa ponderada (Watson y Philip, 1985). Los datos interpolados fueron: precipitación decadal con 75% de probabilidad de ocurrencia (dato obtenido a través del algoritmo de distribución de Gumbel o método de determinación de parámetros de momentos) proveniente de 33 estaciones; brillo solar total decadal de 6 estaciones; temperatura media decadal de 9 estaciones y velocidad decadal promedio del viento de 4 estaciones. Cada elemento climático se analizó de manera decadal, es decir, cada uno fue representado en 36 mapas.

250 x 250 m² (6.25 ha); para facilitar este proceso se diseñaron programas en AML (ARC Macro Lenguaje, ESRI, 1994), a fin de aplicar las funciones SIG y combinar los mapas.

Cálculo de la evapotranspiración potencial

Con la información espacio-temporal así obtenida, se determinó la evapotranspiración potencial para cada celda (de 6.25 ha) siguiendo el método de Penman-Monteith, el cual fue recomendado como la ecuación de referencia por un grupo de expertos consultores de la FAO (Allen *et al.*, 1989). La metodología para estimar la evapotranspiración potencial se presenta en la Figura 3; este valor fue calculado para cada celda mediante la ecuación básica de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1994):

$$ET_0 = \frac{0.408 * (Rn - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273} * U_2 * (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma * (1 + 0.34 * U_2)}$$

donde,

ET₀ = Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día)

Rn = Radiación neta (MJ/m²·día)

G = Flujo de calor del suelo (MJ/m²·día)

T = Temperatura media (°C)

U₂ = Velocidad del viento a dos metros de altura (m/seg)

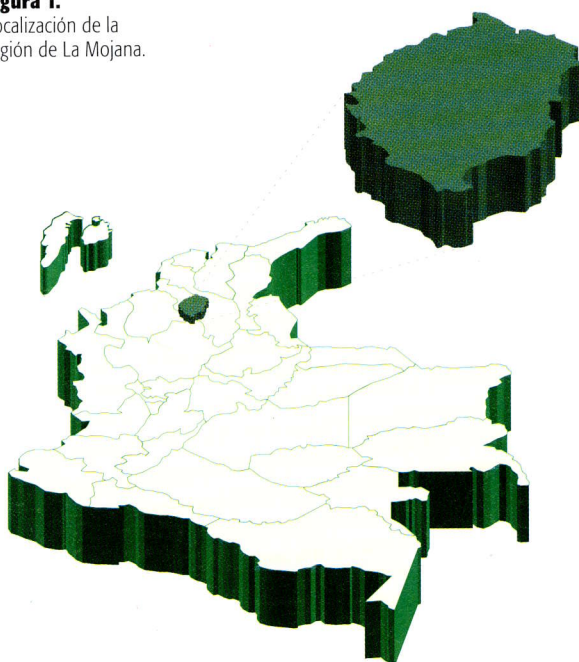
(e_a - e_d) = Déficit de presión de vapor (kPa)

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)

γ = Constante psicrométrica (kPa/°C)

900 = Factor de conversión

Figura 1. Localización de la región de La Mojana.



Procesamiento de la información mediante SIG

El procesamiento de la información bajo el SIG, consistió en evaluar de forma programada los diferentes modelos citados, valiéndose del módulo GRID (ESRI, 1994); las variables espaciales se representaron en capas independientes. El procedimiento u operación matemática se realizó en cada una de las celdas de

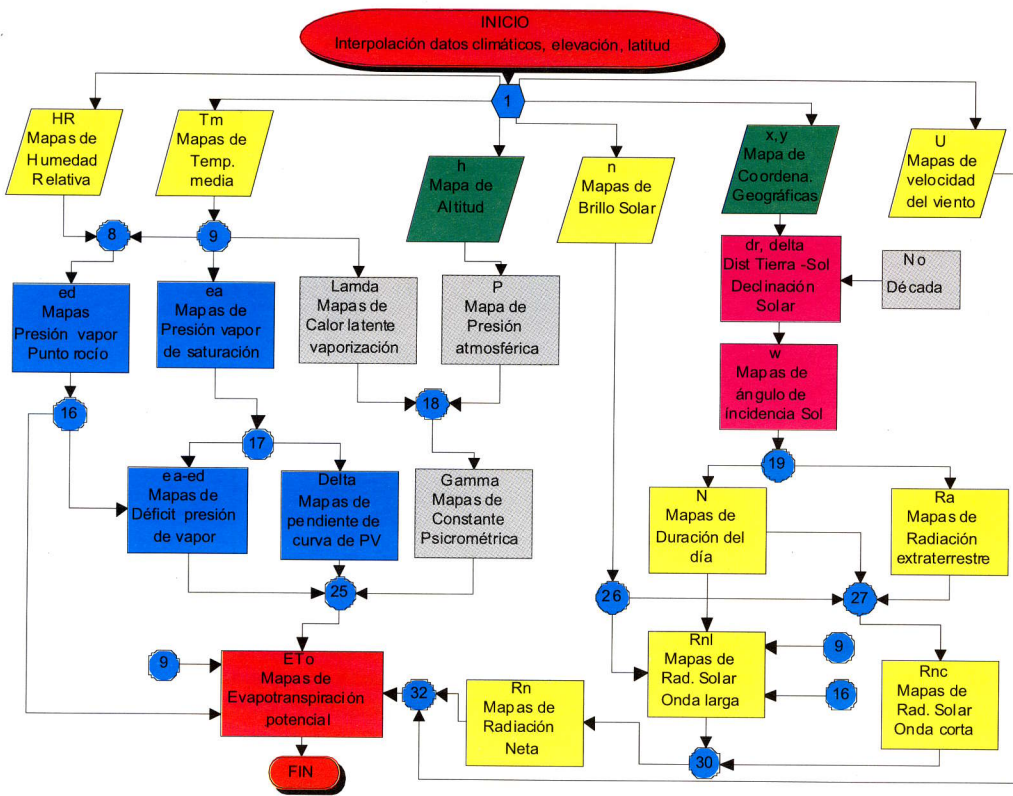


Figura 3. Metodología para estimar la evapotranspiración potencial.

Convenciones:

- Hr, humedad relativa (%);
- Tm, temperatura media (°C);
- h, altitud (msnm);
- n, brillo solar (h);
- U, velocidad del viento (m/seg);
- e_a, presión de vapor actual (kPa);
- e_s, presión de vapor de saturación (kPa);
- P, presión atmosférica (kPa);
- dr-delta, pendiente de la curva de presión de vapor (kPa);
- lamda, calor latente de vaporización (MJ/kg⁻¹);
- gamma, constante psicrométrica (kPa/°C⁻¹);
- Rnl, radiación solar de onda larga (MJ/m²d⁻¹);
- Rnc, radiación solar de onda corta (MJ/m²d⁻¹);
- Rn, radiación solar neta (MJ/m²d⁻¹);
- dr, distancia relativa de la Tierra al Sol (Adm);
- W, ángulo de incidencia de la luz solar (rad);
- Et_w, evapotranspiración potencial (mm/d⁻¹).

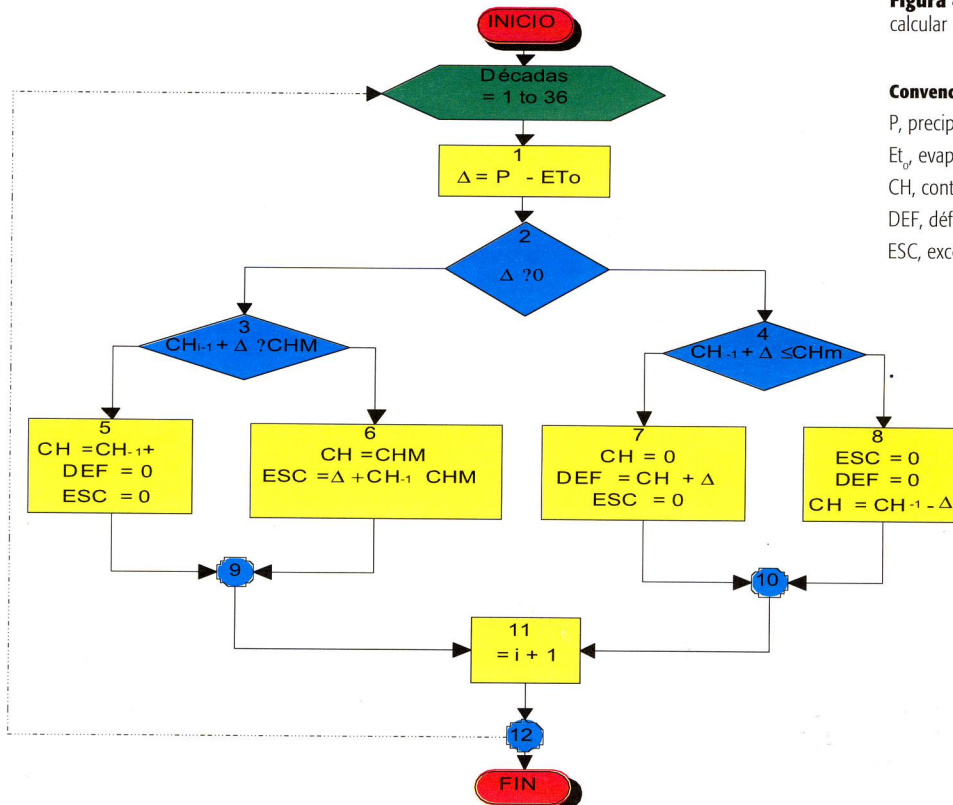


Figura 4. Metodología para calcular el balance hídrico.

Convenciones:

- P, precipitación;
- Et_w, evapotranspiración potencial;
- CH, contenido de humedad;
- DEF, déficit de precipitación;
- ESC, exceso de precipitación.

Cálculo del balance hídrico

Después de obtener 36 mapas sobre la evapotranspiración potencial total decadal, se realizó un balance hídrico simplificado (Martelo, 1995) siguiendo el algoritmo representado en la Figura 4; para ello se tomó en cuenta la información sobre profundidad radical y capacidad de retención unitaria del suelo. Los datos fisiográficos básicos sobre suelos, uso de suelo y cobertura vegetal, proceden de estudios recientes realizados por CORPOICA y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en la región, los cuales utilizaron técnicas de teledetección y de reconocimiento directo del área (Roveda y otros, 1997). La capacidad de retención unitaria de agua del suelo fue obtenida a partir de la fisiografía y las pruebas de campo realizadas en este estudio. Los valores de profundidad radical se lograron mediante generalización de las observaciones de campo y con base en el mapa sobre uso y cobertura de suelos.

La información vertida en mapas sobre la fisiografía, el uso y la cobertura del suelo (Roveda y otros, 1997) de la región fue obtenida en formato "vector", y se convirtió en formato "raster" utilizando celdas de 250 x 250 m² (6.25 ha). A partir de estos dos mapas se generó el mapa de capacidad de retención total de agua, por multiplicación vectorial de los mismos. Las entradas del balance hídrico consideradas fueron: la precipitación decadal con 75% de ocurrencia, la evapotranspiración potencial y la capacidad de retención total de agua (CRTA). El procedimiento seguido para calcular el balance hídrico se muestra en la Figura 4.

Como resultado del balance hídrico se obtuvieron 36 mapas de exceso, 36 mapas de déficit y 36 mapas de contenido de humedad (Terán y otros, 1998). Es importante resaltar que, en esta modalidad de cálculo del balance hídrico, se asume una serie de simplificaciones: no se consideran los movimientos laterales ni verticales del agua, es decir, se estima que no hay escurrimiento, percolación o ascenso capilar; la única entrada es la precipitación; el contenido de humedad del suelo para una década determinada está totalmente disponible para el período siguiente sin importar su cantidad.

Un punto importante para tener en cuenta en un balance hídrico, es el contenido de humedad de la década en la que se inicia el ciclo; en el presente trabajo se inició el ciclo en la década 30, por que en ella ocurre la máxima diferencia entre precipitación y evapotranspiración potencial. Luego se evaluó el balance a través de las 36 décadas tomando como contenido ini-

Tabla 1. Valores principales de la matriz de covarianza de las décadas según excesos hídricos en suelos de la región de La Mojana.

Componente	Valor Principal	Varianza (%)	Varianza Acumulada (%)
CP1	1304.41	78.51	78.51
CP2	144.85	8.72	87.23
CP3	66.23	3.99	91.22
CP4	37.41	2.25	93.47
CP5	24.73	1.49	94.96

cial de humedad la CRTA.

Resultados y discusión

La clasificación climática

Con los mapas de exceso de precipitación generados en el balance hídrico, se creó una matriz para las décadas 12 a 33, en las cuales ocurre el período de invierno. La escogencia de este período se debió a que en esas décadas se presentan los excesos mayores de cero (> 0), aspecto de gran relevancia en el comportamiento agroclimático de la región. Por otro lado, existe una limitante técnica del SIG para el trabajo con matrices, cuya información procede de más de 23 mapas para la realización del ACP. La ecuación lineal planteada en forma matricial se puede expresar de la siguiente forma:

$$C_{E_{i,j}} \cdot v = \lambda \cdot v$$

donde,

$C_{E_{i,j}}$ = matriz de covarianza de los excesos

$E_{i,j}$ = matriz de excesos de precipitación, donde i = valor o nivel del exceso en la celda i -ésima, ($i = 1, 2, \dots, 82, 155$);

j = mapa de excesos de la década j -ésima ($j = 12, 13, \dots, 33$)

v = matriz de vectores característicos

λ = valores característicos.

Debido a que los n valores característicos representan el 100% de la varianza de los excesos de precipitación (vectores característicos), es sencillo encontrar el porcentaje de la variación que representa cada uno. La Tabla 1 muestra los seis primeros valores principales de la matriz de covarianza en los mapas de excesos analizados.

Las nuevas variables obtenidas son mapas de excesos generados a partir de la combinación lineal de los vectores principales y los mapas incluidos en la matriz $E_{i,j}$. Esto se logra mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$NVM_{i,j,p} = \sum_{k=1}^n a_{kp} VM_{i,j,k}$$

donde,

$NVM_{i,j,p}$ = Nuevo valor en el mapa

para el componente p en la fila i y columna j ;

a_{kp} = Valor k en el vector principal p ;

$VM_{i,j,k}$ = Valor en el mapa k , para el pixel en la fila i columna j ;

n = Número de variables (mapas) entrados.

Obsérvese que se usa el ACP sin hacer ninguna suposición sobre la distribución y sin acudir a un modelo estadístico predeterminado. A partir del ACP se seleccionaron las dos primeras variables ortogonales resultantes de las combinaciones lineales de los excesos de precipitación para cada una de las décadas analizadas; éstas constituyeron una nueva matriz de información que explica el 87.23% de la variación espacio-temporal de los excesos. A estas dos variables se les aplicó un análisis de cluster mediante el método de isocluster (Richards, 1986). La mapeación de las zonas climáticamente homogéneas, se logró a partir del método de clasificación de máxima verosimilitud.

La Figura 5, muestra el mapa de la capacidad de retención total de agua (CRTA), obtenido de los mapas de profundidad radical, los aspectos físicos de los suelos y el mapa de fisiografía y suelos, después del proceso de transformación de formatos (vector a raster). Obsérvese que el mapa de CRTA indica el nivel de humedad de partida para la realización de los balances hídricos a través del ciclo anual.

La Figura 6 refleja la secuencia de mapas sobre exceso de precipitación obtenidos, los cuales corresponden a las décadas 12 a 33. Se puede apreciar su variación a través del año; los valores en rojo significan cero y los demás colores representan la presencia de excesos en la zona. El exceso hídrico aumenta de sur a norte, aunque luego se reduce en sentido contrario.

Finalmente, para la determinación del número de grupos, se tuvieron en cuenta la conjugación de los conceptos de distancia euclidiana entre cada uno de los grupos y el área de la zona climática. La Figura 7 representa la zonificación definitiva caracterizadas según sus excesos hídricos. En éstas se pueden identificar de manera diferencial, además de los excesos, la precipita-

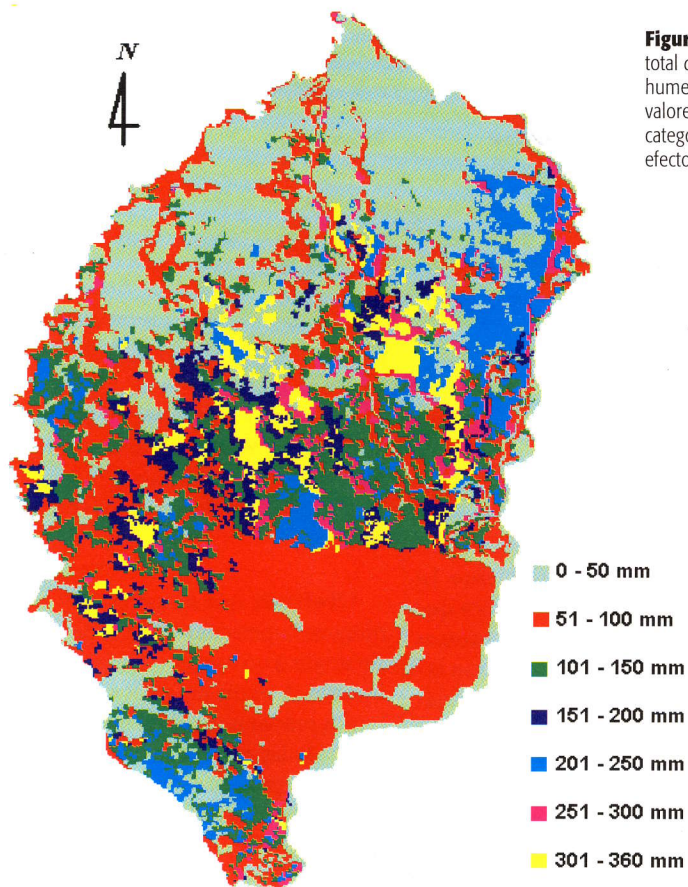
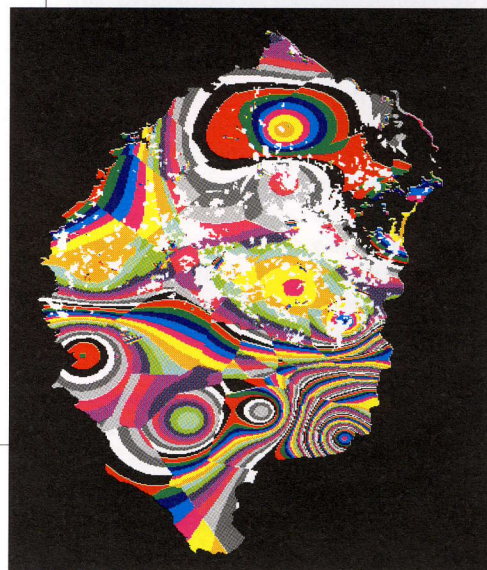


Figura 5. Mapa de capacidad total de retención de humedad. Los rangos de valores se resumieron en siete categorías mostradas para efectos de su presentación.

Figura 6. Mapa de evolución de los excesos hídricos del suelo a través de diferentes décadas del año.

El mapa superior muestra el detalle de los excesos ocurridos en la década 25 (en rojo, los valores cero).



E12
Abr 3



E13
May 1



E14
May 2



E15
May 3



E16
Jun 1



E17
Jun 2



E18
Jun 3



E19
Jul 1



E20
Jul 2



E21
Jul 3



E22
Ago 1



E23
Ago 2



E24
Ago 3



E25
Sep 1



E26
Sep 2



E27
Sep 3



E28
Oct 1



E29
Oct 2



E30
Oct 3



E31
Nov 1



E32
Nov 2



E33
Nov 3

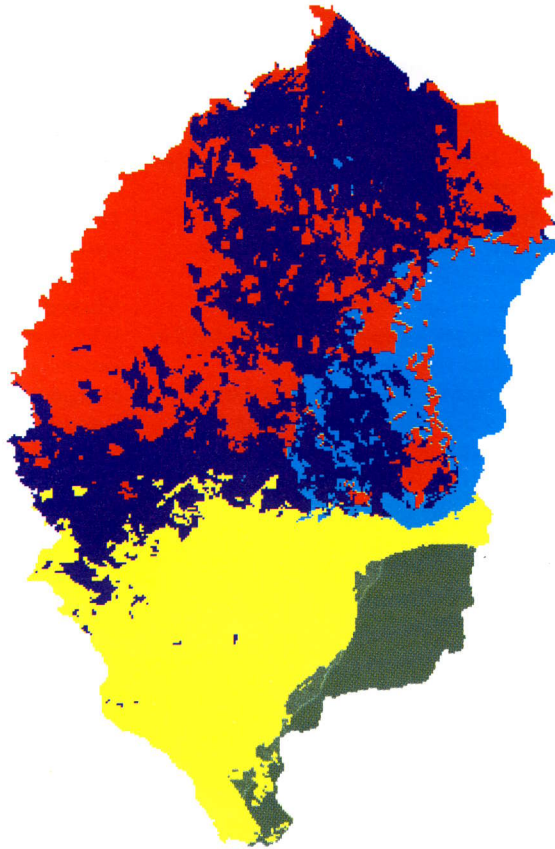







Figura 7.
Mapa de la
zonificación
agroclimática
de la región
de La Mojana.

Leyenda:

<p>Zona 1.</p> 	<p>Area: 123.587 ha. Precipitación: 1797 - 2815 mm/año. Excesos: 0 - 252 mm/año Vegetación predominante: Arbustiva abierta (Segundo nivel: Arbustiva medianamente densa) Subpaisaje predominante: Basines (Segundo nivel: Diques, Basines y Napas).</p>	<p>P(75%): 747 -1335 mm/año Temperaturas: 28°C (93.3% del área) Evapotranspiración: 1197 - 1261 mm/año</p>
<p>Zona 2.</p> 	<p>Area: 172.381 ha. Precipitación: 1916 - 3027 mm/año. Excesos: 206 - 570 mm/año Vegetación predominante: Arbórea o Bosque Natural (Segundo nivel: Arbustiva abierta) Subpaisaje predominante: Cuerpos de agua (Segundo nivel: Basines)</p>	<p>P(75%): 963 - 1651 mm/año Temperatura media: 28°C (84.4% del área) Evapotranspiración: 1163 - 1261 mm/año</p>
<p>Zona 3.</p> 	<p>Area: 51.175 ha. Precipitación: 2331 - 3335 mm/año. Excesos: 189 - 691 mm/año. Vegetación predominante: Arbustiva medianamente densa (Segundo nivel: Tierras Agropecuarias) Subpaisaje predominante: Basin (Segundo nivel: Dique orillar y orillares)</p>	<p>P(75%): 1104 - 1618 mm/año Temperaturas: 28°C (100% del área) Evapotranspiración: 1225 - 1260 mm/año</p>
<p>Zona 4.</p> 	<p>Area: 117.081 ha. Precipitación: 2571 - 4109 mm/año. Excesos: 504 - 1197 mm/año. Vegetación predominante: Tierras agropecuarias. Subpaisaje predominante: Brazos deltáicos (Segundo nivel: Dique basines y napas)</p>	<p>P(75%): 1277 - 2180 mm/año Rango de temperaturas: 27 (51.8% del área) Evapotranspiración: 1159 - 1259 mm/año</p>
<p>Zona 5.</p> 	<p>Area: 35.075 ha Precipitación: 3493 - 4697 mm/año. Excesos: 1035 - 1939 mm/año. Vegetación predominante: Tierras agropecuarias. (Segundo nivel: Arbustiva medianamente densa) Subpaisaje predominante: Diques Basines y Napas</p>	<p>P(75%): 1909 - 2788 mm/año. Rango de temperaturas: 28°C (87% del área) Evapotranspiración: 1205 - 1255 mm/año</p>

ción, el tipo de vegetación y el tipo de suelo; los demás elementos climáticos no aparecen substancialmente diferentes.

Es importante resaltar que la evaluación de excesos de precipitación, con base en la cual se determinaron las áreas agroclimáticas, no considera los excesos provenientes de otras fuentes (escorrentía o suministros de otras cuencas). Dichos excesos se integrarán al estudio en una fase posterior por medio de su intersección con el mapa de zonas de inundación.

Se conoce que la franja inundable de la región de La Mojana corresponde a la zona norte, puesto que es la zona más baja y allí confluyen todos los excesos provenientes, tanto de la precipitación, como de la escorrentía superficial y otros excesos externos (ríos, etc.). En contraposición con los excesos hídricos superficiales, que enmascaran lo que ocurre en la "Cuenca Mojana", la zonificación agroclimática demuestra que los excesos de precipitación aumentan de norte a sur como consecuencia de las

condiciones de clima y suelo imperantes en la región.

Conclusiones

La metodología usada en este trabajo, a diferencia de otras frecuentemente empleadas, utiliza herramientas matemático-estadísticas que permiten obtener una zonificación agroclimática más certera y objetiva; en razón de la estructura del proceso metodológico descrito, la introducción de concepciones previas se ve mi-

estadísticas que permiten obtener una zonificación agroclimática más certera y objetiva; en razón de la estructura del proceso metodológico descrito, la introducción de concepciones previas se ve minimizada por la estricta secuencia de las técnicas utilizadas. La ventaja del método expuesto radica en que no requiere de rangos preconcebidos ni de la intervención subjetiva del investigador.

La variabilidad de los diferentes parámetros considerados en el proceso de zonificación (como los suelos, la vegetación y el clima), logra su expresión en el estudio a través de los usos espacial (mapas) y temporal (décadas) del SIG. La formulación de un modelo de zonificación coherente facilita la implementación de algoritmos y combinaciones que permiten lograr un análisis espacio-temporal con resultados que se aproximan más a la realidad, así como proyecciones de resultados a través del tiempo y el espacio.

El mejor conocimiento de la agroclimatología de la región de La Mojana, por el detalle logrado para cada zona, ayuda a comprender de manera más precisa las condiciones imperantes y facilita la planificación con miras a optimizar el uso de los recursos naturales en las actividades agropecuarias.

A partir del mapa de zonificación agroclimática, y su combinación con el mapa de zonas de inundación, se determinarán las zonas con limitantes para usos agropecuarios desde el punto de vista biofísico. Un futuro proceso de evaluación de las especies cultivables actuales y potenciales, hará posible establecer las ventajas y desventajas de dichos cultivos con relación al agroclima, a fin de recomendar nuevos cultivos y detectar usos inapropiados de la tierra.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio hace parte del proyecto "Adaptabilidad de la producción agropecuaria sostenible en los ecosistemas de la región de La Mojana", financiado por el Convenio CORPOICA-INAT (Nº 262/94).

BIBLIOGRAFÍA

Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A. and Pereira, L.S. 1994. An update for the definition of reference evapotranspiration. ICID Bulletin 43 (2): 1-34.

—. 1994. An update for the calculation of reference evapotranspiration. ICID Bulletin 43 (2): 35-92.

Allen, R.G., Jensen, M.E., Wright, J.L. and Burman, R.D. 1989. Operational Estimates of

reference Evapotranspiration. Agron. J. 81: 650-652.

Basalirwa, C.P.K. 1995. Delineation of Uganda into climatological rainfall zones using the method of principal component analysis. International Journal of Climatology 15(10): 1161-1177.

Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W. 1998. Hidrología Aplicada. McGraw-Hill, Santa Fe de Bogotá, 584 pp.

De Martonne, E. 1926. Une nouvelle fonction climatologique: l'indice d'aridité. La Météorologie 68: 449-458.

Emberger, L. 1955. Une classification biogéographique des climats. Recueil des travaux des laboratoires des botanique, géologie et zoologie de la Faculté des Sciences de l'Université de Montpellier, Serie botanique 7: 3-45.

ESRI. 1994. ARC Macro Language: Developing ARC/Info menus and macros with AML. Manual del usuario.

ESRI. 1994. ARC/Info data management: concepts, data models, database design and storage. Manual del usuario.

Gadgil, S. and Joshi, N.V. 1980. Use of principal component analysis in rational classification of climates. In: International Crops Research Institute for Semi-Arid Tropics (ICRISAT). *Climatic Classification: A Consultants' Meeting*, p. 17-26.

Gausson, H. 1955. Les climats analogues a l'échelle du monde. Comptes Rendus. Hebdomadaire des Seances de L'Academie d'Agriculture de France 41.

Gillespie, D.T. 1992. Markov processes: an introduction for physical scientists. Harcourt Brace Jovanovich Academic Press, Boston, 565 pp.

Grove, A.T. 1980. Climatic Classification: Concepts for Dry Tropical Environments. p. 2-5. In: Climatic Classification: A Consultants' Meeting. International Crops Research Institute for Semi-Arid Tropics (ICRISAT), p. 2-5.

Hargreaves, G.H. 1971. Precipitation dependability and potential for agricultural production in northeast Brazil. Publication 74-D-159, EMBRAPA and Utah State University, USA, 123 pp.

Hashmi, M.A., García, L.A. and Fontane, D.G. 1995. Spatial Estimation of Regional Crop Evapotranspiration. Transactions of the ASAE 35(5): 1345-1351.

Jaramillo, R. y Chávez, C. 1996. Distribución de la precipitación en Colombia: uso de la conglomeración estadística. CENICAFÉ. Sin publicar.

Köppen, W. 1936. Das geographische System der Klimate. In: W. Köppen y R. Geider (Ed.), *Handbuch der Klimatologie*, Gebrüder Bornträger, vol 1, Berlin.

Mallants, D. and Feyen, J. 1980. Defining Homogeneous Precipitation Regions by Means

of Principal Components Analysis. Journal of Applied Meteorology 29(9): 892-900.

Martelo, M.T. 1995. El balance hídrico. En: CIDIAT, *Cursillo regional de trabajos prácticos sobre técnicas agrometeorológicas en la agricultura operativa de América Latina*. 80 pp.

Richards, J.A. 1986. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Springer-Verlag, New York, 240 pp.

Roveda, G.L., Salvatierra, J., Carrillo, H. y Vilaneda, E. 1997. Análisis multitemporal de la biosfera con el uso de sensores remotos y sistemas de información geográfica (SIG) en la región de La Mojana. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA)-Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Informes técnicos.

Rusell, J.S. 1978. Classification of climate and the potential usefulness of pattern analysis techniques in agroclimatological research. In: ICRISAT, *Agroclimatological Research Needs of the Semi-Arid Tropics*. Hyderabad, India, p. 47-56.

Thorntwaite, C.W. 1948. An Approach towards a rational classification of climate. Geographical Review 38: 55-94.

Thorntwaite, C.W. and Mather, T.R. 1955. The water balance. Publications in climatology. Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, Centerton, N.J. 8(1): 104 pp.

Terán, C.H., Villaneda, V.E., De Almeida, L. y Jiménez, C. 1996. Análisis agroclimático de la región de La Mojana. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA). C.I. Tibaitatá, Mosquera (Cundinamarca), Informes técnicos de avance, 80 pp.

Troll, C. 1965. Seasonal climates of the earth. p. 28. In: E. Rodenwalt and H. Jusatz (Ed.), *World Maps of Climatology*. Springer-Verlag, Berlin, 350 pp.

Turc, L. and Lecert, h. 1972. Indice Climatique de Potentialité Agricole. Science du Sol 2: 814-102.

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

Williams, G.D. and Masterton, J. 1980. Climatic Classification, agroclimatic resource assessment, and possibilities for application in the Semi-Arid tropics. p. 45-57. In: International Crops Research Institute for Semi-Arid Tropics (ICRISAT). *Climatic Classification: A Consultant's Meeting*, p. 45-57.