ARTICULO CIENTÍFICO

Metodología objetiva para la zonificación agroclimática de la región de La Mojana usando el sistema de información geográfica ARC / INFO® [1]

César Terán Ch.[2],
Carlos Jiménez[3],
Carlos González[4],
Edgar Villaneda[5]

ABSTRACT

Objective methodology for agroclimatic classification at La Mojana Region in Colombia with the Geography Information System ARC/INFO®

The tools provided by the Geography Information System GIS ARC/INFO® are used to develop an objective climatic classification at La Mojana Region in Colombia (South America). A Principal Component Analysis (PCA) is applied to the temporal (decade) variation of excess water obtained from a regional water balance. The entire region was divided in cells of 5.25 ha and to each one of them was applied the water balance, hence the decade excess water was obtained. It was found that the entire region can be adequately represented as linear combination of two leading maps (Eigen vectors) representing 87.23% of the variation. Natural groups from the region can thus be identified by a cluster analysis of the two leading maps obtained from the principal component analysis. These types of clustering provide an objective classification of the Mojana Region in Colombia.

Key Words: Climatic classification, Principal Component Analysis, Geography Information System (GIS). La Mojana (Colombia).

RESUMEN

Se presenta una metodología objetiva para realizar la zonificación agroclimática de la región de La Mojana, usando el sistema de información geográfica ARC/INFO® y empleando la combinación de técnicas de agrupamiento estadístico/matemáticas, conocidas como análisis de Cluster y de componentes principales, teniendo en cuenta la variación espacio/temporal de los elementos climáticos y espaciales del suelo y la vegetación. Este estudio se realizó sobre la Región de La Mojana, en Colombia, para lo cual se empleó la información de 30 estaciones pluviométricas, 1 pluviográfica y 13 estaciones climáticas. Toda la información se desplegó en el sistema de información geográfica ARC/INFO® con celdas de 250 x 250 m² (6.25 ha), esta información 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 que se obtienen 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 los 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 le aplicó el método de los componentes principales, escogiéndose los que representaban la mayor variabilidad. Después, se aplicó el análisis de Cluster usando el método de isocluster, produciéndose una zonificación final que se presenta en un mapa con su leyenda correspondiente.

Palabras claves: Zonificación agroclimática, Análisis de Componentes Principales, Sistemas de Información Geográfica SIG, La Mojana.

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

Introducción

En el marco del proyecto "Adaptabilidad agropecuaria sostenible de los ecosistemas de la región de La Mojana" orientado por Corpoica y el Instituto Nacional de Adecuación de Tierras (Inat) a la formulación de soluciones en la producción agropecuaria de la región, fue necesario articular un modelo que permitiera entender el comportamiento dinámico del agua como elemento primordial de los ecosistemas presentes.

Para la obtención de este modelo regional era necesaria la evaluación del clima desde el punto de vista agrícola, sin embargo, los métodos divisivos de clasificación climática no respondían a las necesidades, por el nivel de detalle que arrojan sus resultados debido a la homogeneidad climática de la región y de la escala para la cual fueron diseñados dichos métodos. Por esta razón, para la identificación de las características agroclimáticas de la región y su relación suelo-agua-planta, se implementó la presente metodología que 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 de arreglos multivariados como el Análisis de Componentes Principales (ACP) y Cluster para la obtención de una zonificación agroclimática más objetiva de la región de La Mojana. Dicha zonificación no dependió de rangos de parámetros preestablecidos u

1. Este proyecto fue planeado y realizado por Corpoica. El procesamiento de la información se llevó a cabo en el laboratorio SIG de la Red Nacional de Conservación de Suelos y Aguas, Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, el cual fué donado por la Embajada del Gobierno Japonés.

2. Programa Nacional de Manejo Integrado de Suelos y Aguas, Corpoica, Apartado Aéreo 240142 Las Palmas, Santafé de Bogotá, Colombia. cteran@corpoica.org.co

3. Tesis, requisito parcial para acceder al título de Ingeniero Agrícola.

4. Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Ciudad Universitaria, Santafé de Bogotá, Colombia , Profesor Asociado. carlosg@ing.unal.edu.co

5. Programa Nacional de Manejo Integrado de Suelos y Aguas, Corpoica, Apartado Aéreo 240142 Las Palmas, Santafé de Bogotá, Colombia. evillaneda@corpoica.org.co

orientaciones subjetivas del evaluador, sino del análisis estadístico / matemático de la información agroclimática suministrada.

Otra ventaja del método es que en él se tienen en cuenta relaciones ocultas de elementos climáticos. "Las relaciones espaciales climáticas pueden ser implícitas, como cuando los datos son dibujados y luego sobrepuestos en mapas que muestran la información topográfica." (Williams y Masterton, 1980, p 50).

La zonificación, al igual que el análisis de recursos agroclimáticos, 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 análisis climáticos y clasificación incluyen mapas, con el objeto de alcanzar una combinación subsecuente de datos acerca del clima con otros tipos de datos como la información sobre suelos, vegetación, demografía y sistemas agrícolas.

Se ha considerado una segunda etapa del estudio en donde se verifica la adaptabilidad teórica de especies modales y potenciales como demanda de la oferta climática caracterizada en esta primera parte. Dicha etapa se inicia con la integración de la información agroclimática y los niveles de inundación de la región.

Consideraciones generales sobre los sistemas de clasificación

En general, las clasificaciones climáticas usadas son aquellas definidas a priori, puesto que tratan de asignar a una clase o categoría, los valores obtenidos de las estaciones meteorológicas para las diferentes variables medibles, De Martonne (1926), Köppen (1936), Thornthwaite (1948), Emberger (1955), Gaussen (1955), Thornthwaite y Mather (1955), Troll (1965), Hargreaves (1971), entre otras. Estas clasificaciones dependen del autor, convirtiéndose en clasificaciones subjetivas.

Otro factor para considerar a la hora de clasificar es la variación espacio/temporal de los elementos climáticos, según Grove (1980, p.4) *es reconocido que los elementos climáticos, especialmente en los trópicos, varían en cortas distancias, de acuerdo a la topografía, y a otras condiciones, las cuales no siempre son fáciles de tener en cuenta.*

La mayoría de los modelos actuales son modelos no espaciales. Estos modelos están basados en el concepto de que un valor medido representa un área homogénea alrededor del punto medido, lo cual no es cierto en el caso de grandes variaciones climáticas o topográficas. (Hashmani, García y Fontane, 1995, p. 1345).

El procedimiento empleado en este trabajo, busca realizar una clasificación más objetiva, teniendo en cuenta un agrupamiento que depende de la naturaleza de los elementos climáticos, con los cuales la región pueda ser ordenada en grupos naturales, donde el grado de asociación sea alto entre miembros de un mismo grupo. Esta clasificación se logra utilizando técnicas estadístico / matemáticas de agrupamiento.

Comúnmente el análisis de datos trata de examinar una colección de éstos sobre muchas muestras, donde las características varían. Los análisis tradicionales están basados en una o dos variables al tiempo, pero usualmente existen más variables y es necesario descubrir sus relaciones, a lo cual se denomina análisis multivariado. Los métodos multivariados son: Análisis de Componentes Principales (ACP), análisis de Cluster, árbol de expansión mínima, análisis discriminante y análisis de correspondencia, entre los más importantes.

La utilización del análisis multivariado y el empleo de estos métodos con propósitos de clasificación y exploración de la información han sido aplicados en varias ramas de la ciencia como, la teledetección (Gillespie,1992, p. 481), la hidrología (Mallants, D. y Feyen, J. 1990), los suelos, etc. Sobre clasificación Russell (1978, p. 49) dice lo siguiente: *El análisis multivariado ha afectado la clasificación en varios campos científicos. Esta ha tenido un gran valor en el campo de la microbiología, donde clasificaciones previas basadas en un gran número de criterios fueron insatisfactorias.*

Según Russell (1978, p. 50), *los principales métodos de análisis multivariado que pueden ser usados en el estudio del clima son: 1) clasificación usando medidas de similaridad (análisis de Cluster) y 2) ordenación usando una variedad de análisis, incluido ACP.*

El análisis de *Cluster* se ha implementado en Colombia para 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 la precipitación (Basalirwa, C.P.K. 1995); (Mallants, D. y Feyen, J, 1990) y (Gadgil y Joshi, 1980), entre otros.

El ACP no es un método de clasificar propiamente, sino una herramienta para sacar de un determinado grupo de datos, la máxima información posible. Los objetivos de un ACP son los siguientes: Reducción de la dimensionalidad, la determinación de combinaciones lineales de variables, selección de características, selección de las variables más apropiadas, visualización multidimensional de los datos, identificación de variables subyacentes (correlacionadas), identificación de grupos de objetos o de errores.

El objetivo de los ACP más reportado en la literatura es el de simplificar 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 (ver Figura 1). 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.

La región presenta una forma de elipse donde el eje mayor tiene una extensión de 119.5 Km aproximadamente, con dirección norte sur y el eje menor perpendicular, tiene 71.5 Km. Está ubicada entre las coordenadas, 8°00' y 9°30' de latitud norte y los 75°15' y 73°45' de longitud oeste. El modelo digital de terreno de la Región de La Mojana (ver Figura 2.), muestra que la altitud oscila entre los 10 y los 240 metros. La única zona donde se encuentran cerros es al sur de La Mojana, en Ayapel con alturas cercanas a los 500 metros, el resto de la región es completamente plana. Tanto el relieve de la superficie, como sus aguas se proyectan de sur a norte.

Materiales y Métodos

Metodología / SIG para la Zonificación Agroclimática

Para realizar la zonificación se utilizó información climática, de suelos (capacidad máxima de retención unitaria) y de uso del suelo (profundidad radical).

Williams G.D.V. y Masterton M.J., en el marco de la reunión sobre clasificación climática realizada en Andhra Pradesh (India) en 1980, sostuvieron que: "*...para estos propósitos es útil considerar 3 categorías generales: Zonificación Climática, Zonificación Agroclimática y Zonificación de Recursos Climáticos*". La segunda categoría, aseguran, se obtiene de estudios "*de variables derivadas de interés particular para la agricultura, por ejemplo: ciclos de cultivo o índices climáticos de humedad*". Por esta razón se considera ésta una clasificación agroclimática.

La información climática fue adquirida del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). De los registros suministrados se seleccionaron 44 estaciones sobre la región, las cuales corresponden a 30 estaciones pluviométricas, 1 pluviográfica, 1 sinóptica y 12 climatológicas.

Las 44 estaciones iniciales usadas, fueron elegidas por presentar períodos comparables y ubicación representativa en la región. De éstas, 13 estaciones quedan dentro de la región; las demás se escogieron porque garantizan una mayor cobertura y para evitar los efectos de borde. Dadas las mínimas variaciones topográficas, dentro de la región dichas estaciones representan una red adecuada para el estudio.

Previo a cualquier manipulación de la información, se realizó un control de la calidad de los elementos climáticos estudiados. A la información le fueron aplicadas pruebas de consistencia, homogeneidad y chequeo de valores atípicos (outliers) temporalmente.

El estudio de calidad de la información permitió usar para el presente trabajo, 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.

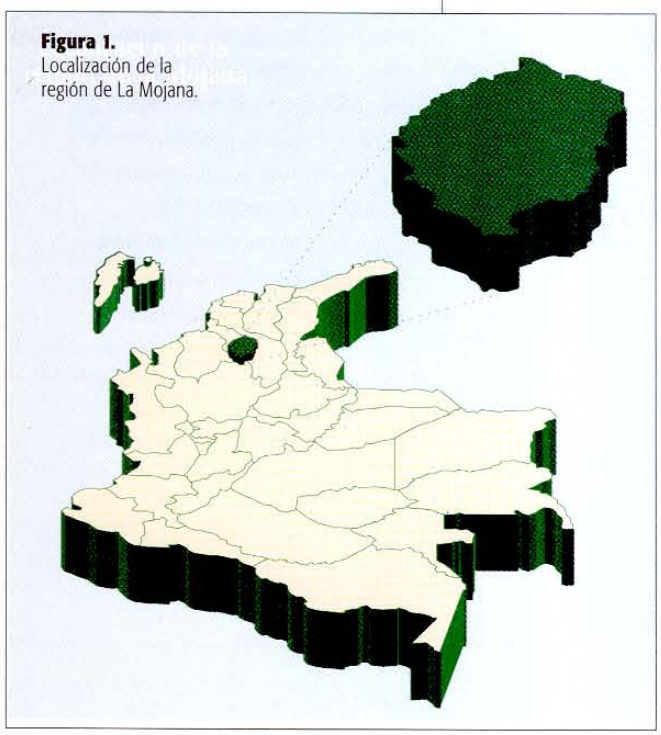


Figura 1. Localización de la región de La Mojana.

La información climática para cada elemento se desplegó sobre el área de La Mojana usando ARC/INFO®. Las estaciones fueron ubicadas usando sus coordenadas geográficas, y éstas fueron convertidas a coordenadas planas usando la proyección Transversal Mercator y el elipsoide Internacional.

Los datos climáticos fueron espacialmente representados en el SIG usando el método de interpolación de distancia inversa ponderada (Watson, y Philip, 1985).

Los datos interpolados empleados fueron: precipitación decadal con el 75% de probabilidad de ocurrencia usando el algoritmo de distribución Gumbel/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 la velocidad del viento promedia decadal de 4 estaciones.

Cada elemento climático fue analizado en forma decadal, es decir, cada uno fue representado en 36 mapas.

Procesamiento de la Información Usando SIG.

El procesamiento de la información en el SIG consistió en evaluar en forma programada los diferentes modelos explicados mediante el 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 250 x 250 m² (6.25 ha).

Para facilitar este proceso, se diseñaron programas en AML (ARC Macro Language (ESRI, 1994)), para aplicar las funciones SIG y combinar los mapas.

Cálculo de la evapotranspiración potencial

Con la información espacio/temporal

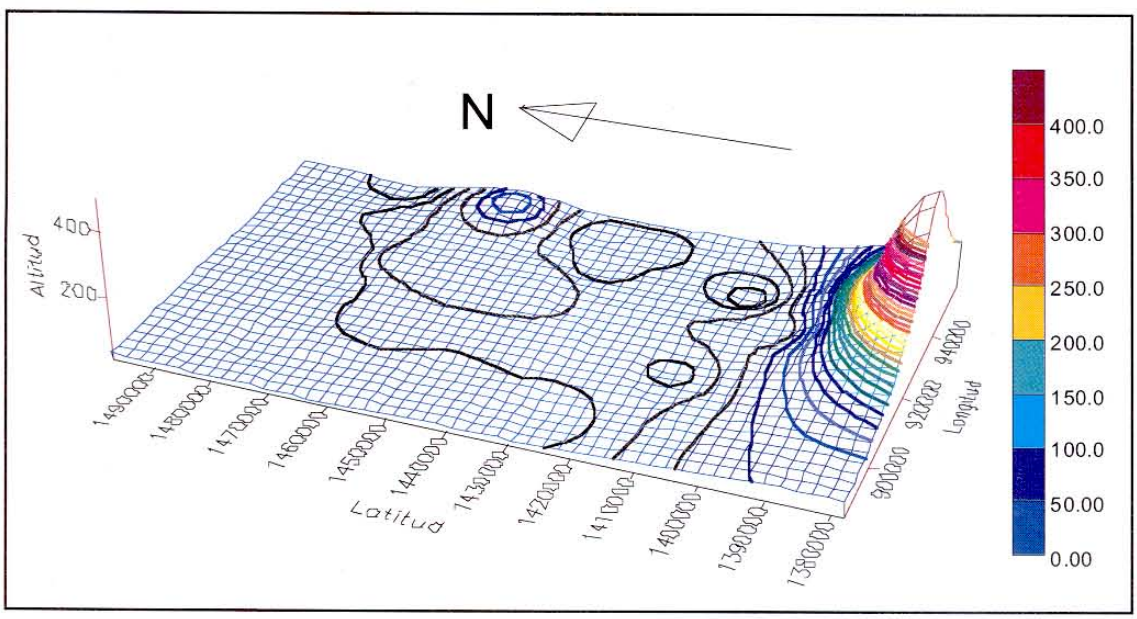


Figura 2. Modelo digital de terreno de la región de La Mojana.

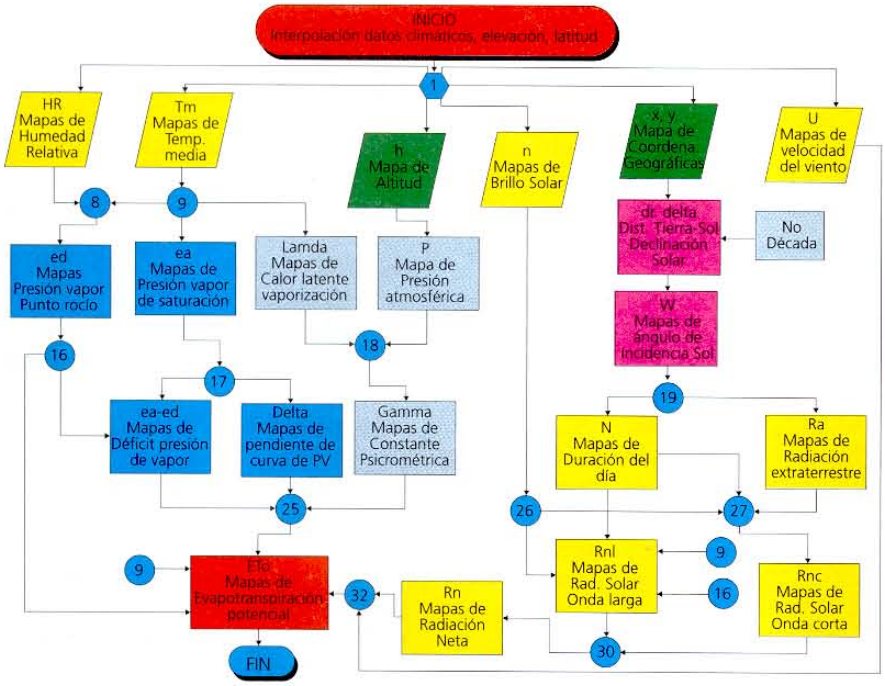


Figura 3. Metodología de estimación de la evapotranspiración

CONVENCIONES

Hr, Humedad Relativa (%).
Tm, Temperatura media, (°C).
h, Altitud (msnm).
n, Brillo solar (h).
U, Velocidad del viento (m/s).
$e_{d'}$ Presión de vapor actual. (kPa).
$e_{a,}$ Presión de vapor de saturación (kPa).
P, Presión atmosférica (kPa).
Delta, Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa).
Lamda, Calor latente de vaporización ($MJkg^{-1}$).
Gamma, Constante psicrométrica ($kPa°C^{-1}$).
Rnl, Radiación solar de onda larga ($MJm^{-2}d^{-1}$).
Rnc. Radiación solar de onda corta ($MJm^{-2}d^{-1}$).
Rn, Radiación solar neta ($MJm^{-2}d^{-1}$).
dr, distancia relativa de la tierra al sol (Adm) .
W, Angulo de incidencia del sol (rad).
Eto, Evapotranspiración potencial (mmd^{-1}).

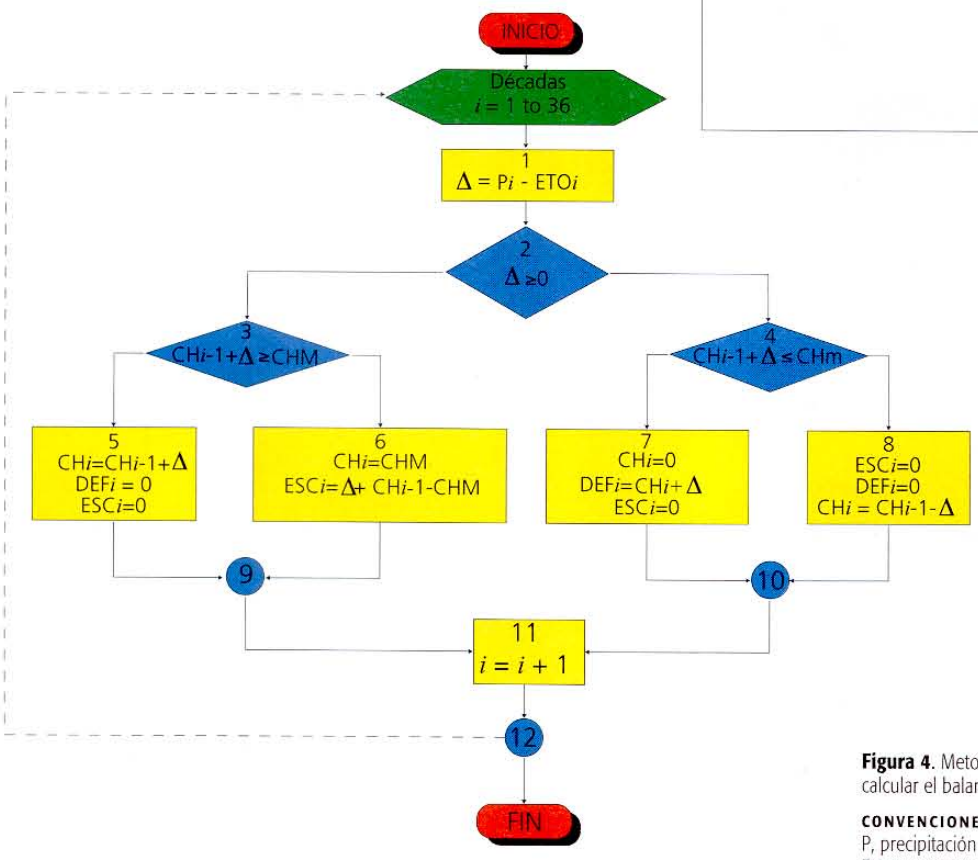


Figura 4. Metodología para calcular el balance hídrico

CONVENCIONES

P, precipitación
Eto, evapotranspiración potencial
CH, contenido de humedad
DEF, déficit
ESC, excesos de precipitación.

obtenida se determinó la evapotranspiración potencial para cada celda de 6.25 ha siguiendo el método de Penman-Monteith (Allen *et al.* 1989) que fue recomendado como la ecuación de referencia por el grupo de expertos consultores de la FAO (Allen *et al.* 1994). La metodología seguida para estimar la evapotranspiración potencial se presenta en la Figura 3.

La evapotranspiración fue calculada para cada celda. La ecuación básica de Penman-Monteith, la cual describe Allen *et al.* (1994) es la siguiente:

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

Donde:

Et_o = 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]

U_2 = Velocidad del viento a dos metros de altura [m/s]

$(e_a\text{-}e_d)$ = 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.

Cálculo del Balance Hídrico

Después de tener 36 mapas sobre evapotranspiración potencial total decadal, se realizó un balance hídrico simplificado (Martelo, 1995) Figura 4, teniendo en cuenta la información de profundidad radical y capacidad de retención unitaria del suelo.

Los datos sobre suelos, uso de suelo y cobertura vegetal, proceden de estudios recientes de fisiografía, suelos y cobertura vegetal, realizados por Corpoica y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en la región, utilizando teledetección y reconocimiento directo del área. (Roveda, G. y León J. *et al.*, 1997, *Informe Técnico, Corpoica*).

La capacidad de retención unitaria de agua del suelo fue obtenida a partir de la fisiografía y de pruebas de campo realizadas en este estudio. Los valores de profundidad radical fueron propuestos a partir de la generalización de observaciones de campo y con base en el mapa sobre uso y cobertura de suelos.

La información en forma de mapas sobre Fisiografía y Uso y cobertura del suelo (Roveda, G. y León, J. *et al.*, 1997) de la región, fue obtenida en formato vector, estos se convirtieron a formato raster, utilizando celdas de 250 x 250 m² (6.25 ha). A partir de estos dos mapas se generó el de capacidad de retención total de agua, el cual consistió en una multiplicación vectorial de los mismos.

Las entradas del balance hídrico fueron: Precipitación decadal con el 75% de ocurrencia, la evapotranspiración potencial y la capacidad de retención total de agua (CRTA). El procedimiento del cálculo del balance hídrico se muestra en la Figura 4.

Del resultado del balance hídrico se obtuvieron 36 mapas de excesos, 36 mapas de déficit y 36 mapas de contenido de humedad. (Terán, C. *et al.* 1998, *Informe Técnico, Corpoica*).

Es importante resaltar que en este modo de cálculo de balance hídrico, se asume en principio, una serie de simplificaciones: No se consideran movimientos laterales, ni verticales del agua, es decir, 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 presentarse en ella la máxima diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial. Luego se evaluó el balance a través de las 36 décadas tomando como contenido inicial de humedad la CRTA.

Resultados y Discusión

La Clasificación Climática

Con los mapas de excesos de precipitación generados en el balance hídrico se creó una matriz de las décadas 12 a la 33, en las cuales se encuentra el período de invierno. La escogencia de este período, se debió a que en estas décadas se presentan los excesos mayores de cero, aspecto que tiene 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:

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

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,..,82.155);*

j=mapa de excesos de la década j-ésima (j=12,13,...,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 de 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:

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

Donde:

$NVM_{i,j,p}$= Nuevo valor en el mapa para el componente p en la fila i y columna j.

$a_{k,p}$= 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

Tabla 1. Valores principales de la matriz de covarianza de las décadas de excesos en el suelo 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
CP6	15.13	0.91	95.87

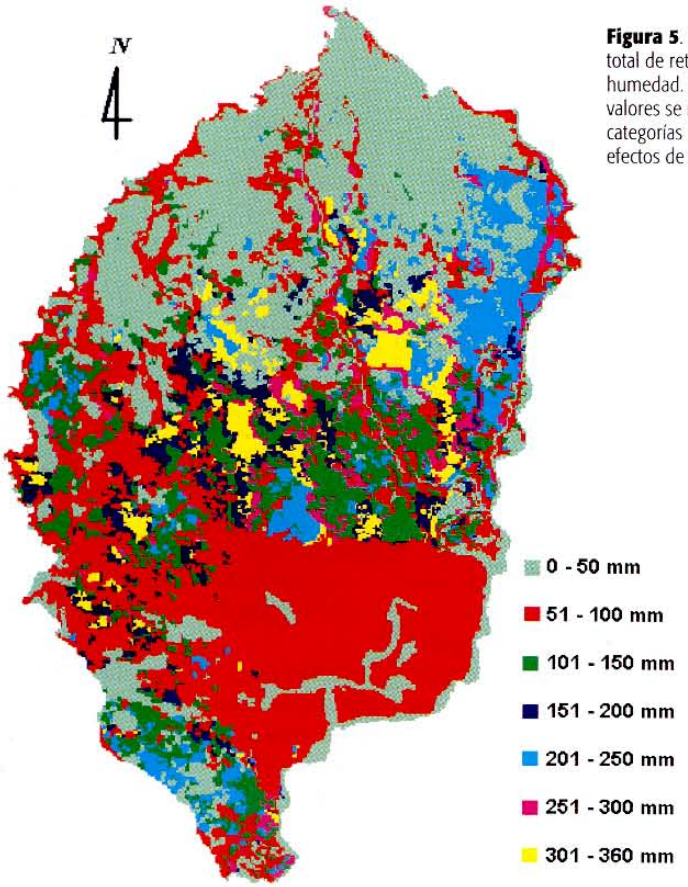
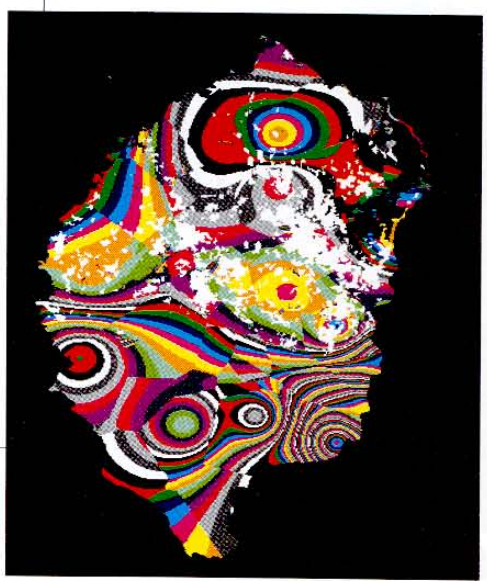
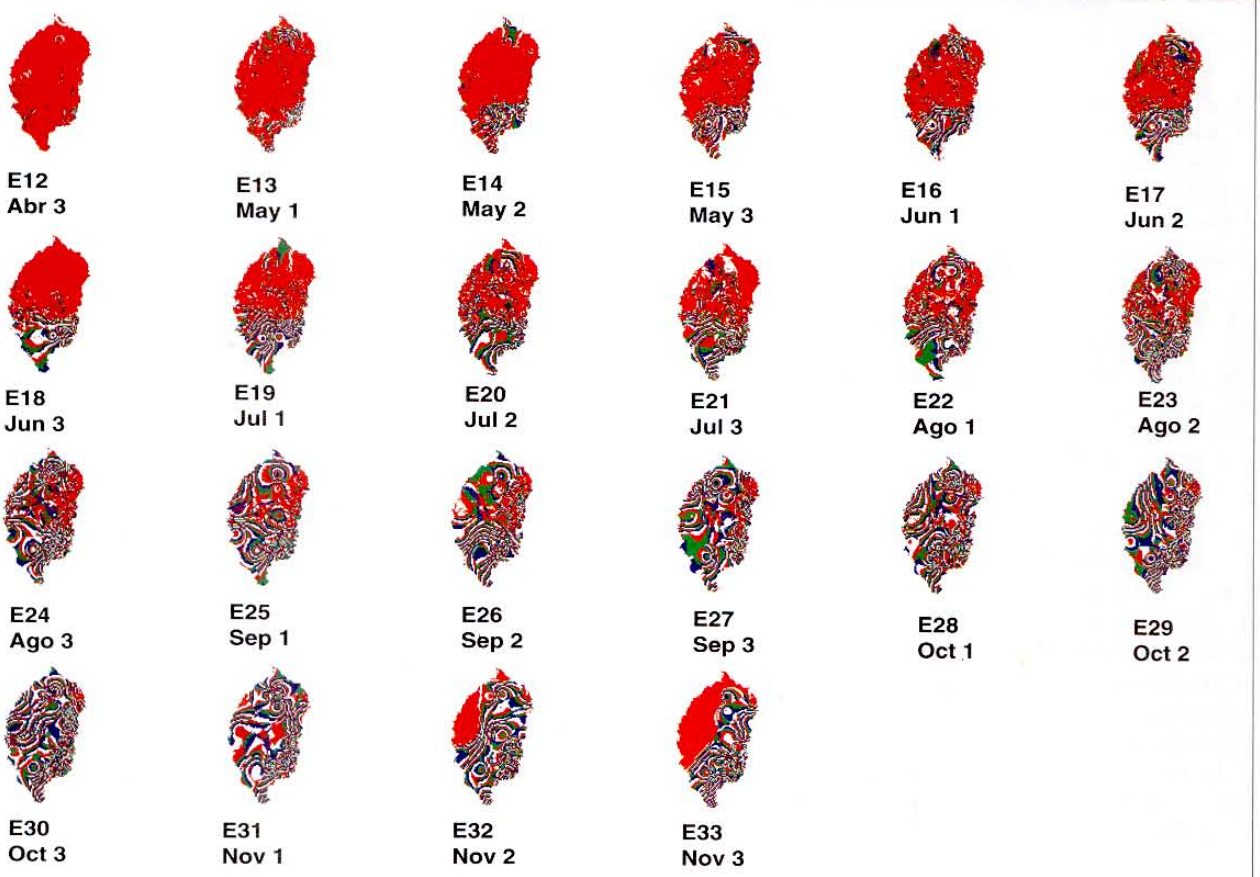


Figura 5. Mapa de capacidad total de retención de humedad. Los rangos de valores se resumieron en siete categorías mostradas para efectos de su presentación.

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).





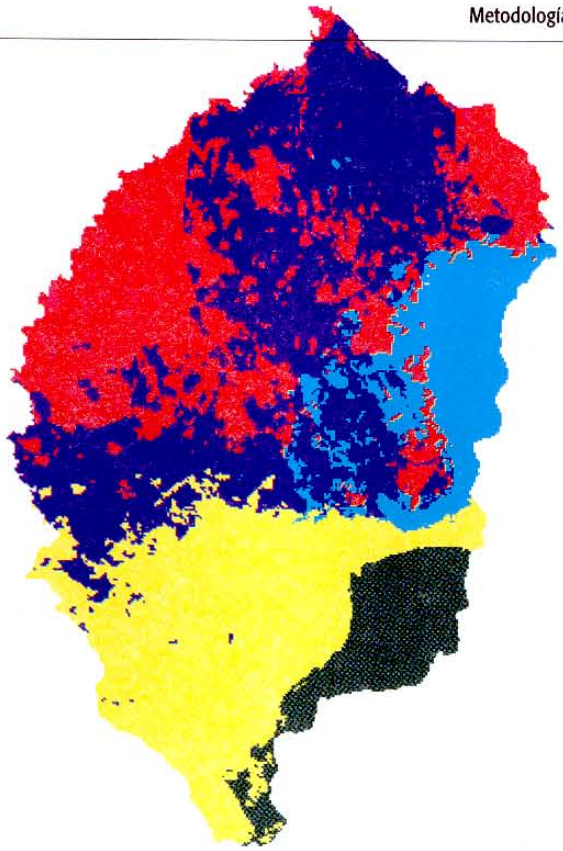


Figura 7. Mapa de la zonificación agroclimática de la región de La Mojana.

Leyenda:

Zona 1. Area: 123.587 ha. P(75%): 747 -1335 mm/año
Precipitación: 1797 - 2815 mm/año. Temperaturas: 28 °C (93.3% del área)
Excesos: 0 - 252 mm/año Evapotranspiración:1197 - 1261 mm/año
Vegetación predominante: Arbustiva abierta (Segundo nivel: Arbustiva medianamente densa)
Subpaisaje predominante: Basines (Segundo nivel: Diques, Basines y Napas).

Zona 2. Area: 172.381 ha. P(75%): 963 - 1651 mm/año
Precipitación: 1916 - 3027 mm/año. Temperatura media: 28 °C (84.4% del área)
Excesos: 206 - 570 mm/año. Evapotranspiración: 1163 - 1261 mm/año
Vegetación predominante: Arbórea o Bosque Natural (Segundo nivel: Arbustiva abierta)
Subpaisaje predominante: Cuerpos de agua (Segundo nivel: Basines)

Zona 3. Area: 51.175 ha. P(75%): 1104 - 1618 mm/año
Precipitación: 2331 - 3335 mm/año. Temperaturas: 28 °C (100% del área)
Excesos: 189 - 691 mm/año. Evapotranspiración: 1225 - 1260 mm/año
Vegetación predominante: Arbustiva medianamente densa (Segundo nivel: Tierras Agropecuarias)
Subpaisaje predominante: Basin (Segundo nivel: Dique orillar y orillares)

Zona 4. Area: 117.081 ha. P(75%): 1277 - 2180 mm/año
Precipitación: 2571 - 4109 mm/año. Rango de temperaturas: 27 (51.8% del área)
Excesos: 504 - 1197 mm/año. Evapotranspiración: 1159 - 1259 mm/año
Vegetación predominante: Tierras agropecuarias.
Subpaisaje predominante: Brazos deltáicos (Segundo nivel: Dique basines y napas)

Zona 5. Area: 35.075 ha P(75%): 1909 - 2788 mm/año.
Precipitación: 3493 - 4697 mm/año. Rango de temperaturas: 28 °C (87% del área)
Excesos: 1035 - 1939 mm/año. Evapotranspiración: 1205 - 1255 mm/año
Vegetación predominante: Tierras agropecuarias. (Segundo nivel: Arbustiva medianamente densa)
Subpaisaje predominante: Diques Basines y Napas

o sin acudir a un modelo estadístico determinado.

A partir del ACP se seleccionaron las dos primeras variables ortogonales resultado de las combinaciones lineales de los excesos de precipitación de cada una de las décadas analizadas, las cuales 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 el análisis de Cluster con el método de Isocluster (Richards, 1986). La mapificación de las zonas climáticamente homogéneas se logró a partir del método de clasificación de máxima verosimilitud.

La Figura 5, muestra el mapa sobre la capacidad de retención total de agua (CRTA), obtenido a partir de los mapas de profundidad radical y los aspectos de física de suelos y el mapa de fisiografía y suelos después del proceso de transformación de formato 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 muestra la secuencia de los mapas sobre excesos de precipitación, que corresponde a las décadas 12 a 33 en las cuales se puede apreciar su variación a través del año, los valores en rojo corresponden a cero y los demás colores representan presencia de excesos en la zona; obsérvese cómo va aumentando el exceso hídrico de sur a norte para luego iniciar su retirada en sentido contrario.

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 después de realizado el ACP y de Cluster, del cual se obtuvieron cinco zonas caracterizadas por sus excesos hídricos. En estas zonas se identifican de forma diferencial además de los excesos, la precipitación, el tipo de vegetación y el tipo de suelo, los demás elementos climáticos no resultan substancialmente diferentes.

Es importante resaltar que la evaluación de excesos de precipitación, con base

en la cual se determinan las áreas agroclimáticas, no considera los excesos provenientes de otras fuentes (escorrentía o suministros de otras cuencas). Dichos excesos se integran al estudio en un paso posterior por medio de su intersección con el mapa de zonas de inundación.

Es conocido que la franja que se inunda en la región de La Mojana es la zona norte, puesto que es la parte más baja y allí confluyen todos los excesos provenientes tanto de precipitación como de escorrentía superficial y excesos externos (ríos, etc.). En contraposición a los excesos hídricos superficiales, que enmascaran lo que ocurre en la "cuenca Mojana", la zonificación agroclimática muestra que debido a las condiciones de clima y suelo imperantes en la región, los excesos de precipitación aumentan de norte a sur.

Conclusiones

La metodología usada en este trabajo, a diferencia de las comúnmente empleadas, utiliza herramientas matemático/estadísticas que permiten obtener una zonificación agroclimática más objetiva, puesto que debido a la estructura del proceso, la introducción de concepciones previas es minimizada por la orientación estricta de las técnicas utilizadas. Es decir, la ventaja del método radica en que no requiere de rangos preconcebidos o de la intervención subjetiva del autor.

La variabilidad espacial de los diferentes parámetros usados durante el proceso, tales como suelos, vegetación y clima, es introducida en el estudio mediante el uso del sistema de información geográfico de forma espacial (mapas) y temporal (décadas), facilitando la implementación de los algoritmos y combinaciones, lo cual permite lograr un análisis espacio/temporal que produce resultados más cercanos a la realidad, además de la modelación del proceso; de tal forma que se pueden hacer proyecciones sobre resultados a través del tiempo y del espacio.

El conocimiento de la agroclimatología alcanzado de la región de La Mojana y el detalle logrado de cada zona obtenida, ayuda a entender en forma más detallada, las condiciones reinantes y facilita la planificación con miras a la optimización del uso de los recursos naturales en las actividades agropecuarias.

A partir del mapa de zonificación agroclimática y la combinación con el mapa de zonas de inundación, se determinarán regiones con limitantes agropecuarias desde el punto de vista biofísico y después de un proceso de optimización de especies se determinarán ventajas y desventajas de cultivos potenciales y actuales relativas al agroclima, con el fin de detectar nuevos cultivos posibles o también el uso inapropiado 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. En: ICID Bulletin. Vol. 43, Nº 2; p. 1-34.

— 1994. An update for the Calculation of reference evapotranspiration. En: ICID Bulletin. Vol. 43, Nº 2; p. 35-92.

Allen, R.G., Jensen, M.E., Wright, J.L., and Burman, R.D. 1989. Operational Estimates of reference Evapotranspiration. Agron. J., Vol. 81, p 650-652.

Basalirwa, C.P.K. 1995. Delineation of Uganda into climatological rainfall zones using the method of principal component analysis. En: International Journal of Climatology. Dept of Meteorology, Univ of Nairobi, PO Box 30197, Nairobi, Kenya 15(10), pp 1161-1177.

Chow, V. T. Maidment, D. R. y Mays, L.W. 1998. Hidrología Aplicada. Santafé de Bogotá, McGraw-Hill, 584 p.

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

Emberger, L. 1955. Une classification biogéographique des climats. Recueil des travaux des laboratories des botanique, géologie et zoologie de la Faculté des Sciences de l'Université de Montpellier (Serie botanique, no. 7): 3-45

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

— **1994. Arc/info** data management: concepts, data models, database desing and storage. Manual del usuario ESRI.

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

Gaussen, H. 1955. *Les climats analoques a l'echelle du monde.* Comptes Rendus. Hebdomadarais des Seances de L'Academie d' Agriculture de France. Vol. 41.

Gillespie, Daniel T. 1992. *Markov processes; an introduction for physical scientists.* Boston: Academic Press, Harcourt Brace Jovanovich, 565 p.

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

Hargreaves, G.H. 1971. *Precipitation dependability and potential for agricultural production in northeast Brazil.* Publication nº 74-D-159, EMBRAPA and Utah State University (USA). 123 p.p.

Hashmi M:A., L:A. García, D:G: Fontane. 1995. *Spatial Estimation of*

Regional Crop Evapotranspiration. Transactions of the ASAE . Vol. 35, Nº 5. p 1345-1351

Jaramillo, R. y C. Chávez. 1996. *Distribución de la Precipitación en Colombia: Uso de la Conglomeración estadística.* **Cenicafé.** Sin publicar.

Köppen, W. 1936. *Das geographische System der Klimate.* En: Handbuch der Klimatologie, Vol. 1, Parte C., ed. W. Köppen y R. Geider. Berlin: Gebrüder Bornträger.

Mallants, D. y Feyen, J. 1990. *Defining Homogeneous Precipitation Regions by Means of Principal Components Analysis.* Journal of Applied Meteorology, Vol. 29, Nº 9. p. 892-900

Martelo, M.T. 1995. *El Balance Hídrico.* En: Cursillo Regional de trabajos prácticos sobre técnicas agrometeorológicas en la agricultura operativa de América Latina. CIDIAT.

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

Roveda, G. León, J. Salvatierra, C. Carrillo, H. Villaneda, 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. 1997.

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

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

Thornthwaite, C.W., y Mather, T.R. 1955. *The water balance.* Publications in climatology, Vol. 8, Nº 1. Drexel Institute of Tecnology, Laboratory of Climatology, Centerton, N.J. 104 p.p.

Terán CH., C.A., Villaneda V., E., De Almeida L., y Jiménez R., C.h. 1996. *Análisis agroclimático de la región de La Mojana.* Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA). C.I. Tibaitatá. Mosquera. Informes Técnicos de Avance.

Troll, C. 1965. *Seasonal climates of the earth.* Page 28, en: World Maps of Climatology. Ed. E. Rodenwalt y H. Jusatz. Berlin: Springer-Verlag.

Turc, L., y Lecert, H. 1972. *Indice Climatique de Potentialité Agricole. Science du Sol* **2:814-102.**

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

Williams V, G.D y Masterton, Joan. 1980. *Climatic Classification, agroclimatic resource assessment, and possibilities for application in the Semi-Arid tropics.* En: Climatic Classification : A Consultants' Meeting. p. 45-57.