

# Desarrollo de un indicador para valorar la disponibilidad potencial distribuida de recursos hídricos a partir de variables geomorfométricas

*Development of an indicator to assess the distributed potential availability of water resources from geomorphometric variables*

Abarca Oscar<sup>1</sup> y Bernabé P. Miguel A.<sup>2</sup>

*Recibido: marzo 2010 / Aceptado: junio 2010*

## Resumen

Se desarrolla un índice hídrico para la valoración de la disponibilidad de recursos hídricos en áreas con limitada información. El índice se basa en variables geomorfométricas derivadas de un MDE satelital, en información disponible en la cartografía básica y en registros climáticos comunes. Se desarrolló el procedimiento en el estado Aragua-Venezuela, a partir de cuatro componentes: el excedente anual de humedad del suelo, derivado del balance hídrico regional, la acumulación de flujo, el índice topográfico de humedad y la densidad de cuerpos de agua. Se encontró que estos componentes son buenos predictores del escurrimiento medio anual en la zona, ajustándose a un modelo de regresión múltiple con  $R^2$  de 0,89. Los valores obtenidos del índice hídrico para el territorio estatal se ajustan a la realidad de la distribución de sus recursos hídricos. Este índice puede ser utilizado para sustituir procedimientos subjetivos de valoración, basados en juicios de expertos, para la aplicación en la planificación del aprovechamiento de los recursos de aguas y tierras, así como en la estimación de la disponibilidad de recursos hídricos para la implementación masiva del impuesto territorial.

**Palabras clave:** Indicador; índice hídrico; recursos hídricos; geomorfometría; Venezuela.

## Abstract

A Water Index for assessment of water availability in areas with limited information was developed. The index is based on geomorphometric variables derived from a satellite DEM, on available basic cartography information, and common climate records. The procedure was developed in Aragua State, Venezuela, from four components: the Annual Excess Soil Moisture, derived from the regional water balance, Flow Accumulation, Topographic Wetness Index and Water Bodies Density. It was found that these components are good predictors of Average Annual Runoff in the area, according to a multiple regression model with  $R^2$  of 0.89. The index values obtained from Aragua state fit the reality of the distribution of water resources. This index can be used to replace subjective assessment procedures based

1 Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Instituto de Ingeniería Agrícola, Núcleo Maracay, Maracay-Venezuela. Correo electrónico: abarcaosig@agr.ucv.ve; abarcaosig@gmail.com

2 Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía, Campus Sur, Madrid-España. Correo electrónico: ma.bernabe@upm.es

on expert opinions, for use in planning the utilization of water resources and land, as well as in the estimation of water availability for mass deployment of the land taxation.

**Key words:** Indicator; water index; water resources; geomorphometry; Venezuela.

## 1. Introducción

La valoración tributaria de las tierras rurales en Venezuela está basada en el potencial productivo de los predios y éste a su vez se determina por la Vocación de Uso de la Tierra. La Ley de Tierras y Desarrollo Agrario (LTDA) y su reglamento (Asamblea Nacional de la República Bolivariana de Venezuela [ANRBV], 2005; República Bolivariana de Venezuela [RBV], 2005) definen la Vocación de Uso como la interacción de factores físicos (Capacidad de Uso de la Tierra, Requerimientos Agroecológicos de los Cultivos y Disponibilidad de Recursos Hídricos) con factores socio-económicos (Disponibilidad de Insumos, Servicios e Infraestructura) y factores políticos (Planes Agrícolas). Todos estos componentes requieren una base de información a un nivel de detalle apropiado para la implementación del procedimiento de tributación.

El componente Disponibilidad de Recursos Hídricos implica el inventario y cuantificación de las fuentes de agua disponibles al nivel de las unidades de producción, para la determinación de la superficie regable o susceptible de regar (área bajo cota de agua). Los recursos hídricos a considerar comprenden la disponibilidad neta de agua superficial susceptible de aprovechar, la capacidad neta de almacenamiento con fines de riego en

obras de embalse, el rendimiento neto de acuíferos y el rendimiento de la red de pozos subterráneos. La evaluación y cuantificación de la distribución espacial y temporal de estos elementos, así como sus posibilidades de aprovechamiento, requieren un registro sistemático e ininterrumpido de información hidrológica y climatológica que solo se ha realizado en algunos sectores del país, en los que se han desarrollado proyectos de riego y saneamiento. De acuerdo a cifras de la FAO (2010), Venezuela tiene un potencial de irrigación de 1.700.000 ha, de las cuales están equipadas para riego unas 570.219. Es principalmente en esta zona donde se han realizado la mayor parte de los estudios sobre disponibilidad de recursos hídricos del país. El resto de tierras agrícolas, que comprenden más de 34 millones de ha, solo al norte del Orinoco (Marín, 1999), tiene una muy limitada disponibilidad de estudios básicos que permitan evaluar apropiadamente su vocación agrícola, planificar su aprovechamiento e implementar mecanismos de gestión de tierras como el impuesto predial.

Ante la carencia de información adecuada para valorar la disponibilidad de recursos hídricos, tanto en su fuente puntual, como en el espacio bidimensional distribuido de aprovechamiento, esta investigación se propone como objetivo desarrollar un índice estimador (índice hídrico), basado en atributos geomor-

fométricos que pueden ser derivados de un Modelo Digital de Elevación (MDE) satelital, de información disponible en la cartografía básica y del balance hídrico regional, estimado a partir de la información climatológica disponible.

## 2. Métodos y materiales

Para lograr el objetivo propuesto se desarrolló la siguiente secuencia metodológica:

- Selección del área de estudio.
- Obtención de un MDE satelital como fuente básica para la derivación de los atributos geomorfométricos a integrar en el índice. Se seleccionó el MDE derivado de imágenes de radar de la Misión Topográfica Shuttle (SRTM). Esta etapa implica el preprocesamiento del MDE.
- Generación de variables geomorfométricas a partir del MDE y de la información ambiental disponible.
- Elaboración del balance hídrico regional, a partir de la información topo-climatológica del área de estudio.
- Construcción del índice hídrico mediante la integración de las variables geomorfométricas de tipo hidrológico y topo-climatológico seleccionadas.
- Validación preliminar del índice a través de la interpretación visual de su aplicación y mediante la evaluación de su relación con parámetros hidrológicos cuantitativos, disponibles para la región de estudio y su área de influencia.

Se emplearon los siguientes recursos para el desarrollo de la investigación:

- MDE derivado de las imágenes de radar de la Misión Topográfica del Transbordador Endeavour (Shuttle Radar Topography Mission-SRTM) de febrero del 2000. Se utilizan 4 imágenes con un tamaño de 1°x1° cada una, que cubren desde las coordenadas 9° a 11° de latitud Norte y 66° a 68° de longitud Oeste. Estas imágenes tienen una resolución de 3" de arco (90 m), una exactitud de 20 m en horizontal y de 16 m en vertical y fueron obtenidas de la NASA (2009).
- Ortofotos digitales del estado Aragua de fecha 1995 y 1998. Se emplean 91 ortofotos con un tamaño de 7.5' x 5' de arco y 2.5 m de resolución.
- Cartas topográficas en papel a escalas 1:25 000 (93 hojas de 7.5' x 5' de arco) y 1:100 000 (11 hojas de 30' x 20' de arco).
- Datos promedios mensuales de las series históricas de precipitación, evaporación y temperatura disponibles para la red de estaciones climáticas del estado Aragua y estados vecinos (MINAMB, 2008).
- Software: Se emplearon los siguientes programas informáticos para el desarrollo de la investigación:
  - **Saga 2.0.4** (Cimmery, 2007). Se utiliza para derivar, a partir del MDE, las variables geomorfométricas consideradas en el modelo.
  - **ArcGIS 9.3** (Licencia 37104210-Universidad Politécnica de Madrid). Se emplea para digitalizar la capa vectorial de la red hidrográfica, así como

para derivar de ésta un modelo de elevación digital, a partir de estadística focal, con fines de desarrollar la variable densidad de cuerpos de agua.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Área de estudio

El área de estudio comprende al estado Aragua, región administrativa ubicada en el centro norte de Venezuela y que ocupa una superficie de 7.212,88 km<sup>2</sup>. Se extiende entre los 9°15' y 10°32' de latitud Norte y 66°32' y 67°52' de longitud Oeste (WGS84). De acuerdo con Sucre (2003), esta región se divide en cinco zonas eco-geográficas (Figura 1).

##### *Valles marinos de la cordillera de la Costa*

Se ubican al norte del estado, en la vertiente norte de la serranía del Litoral, y sus aguas drenan en sentido S-N hasta desembocar en el mar Caribe. Forman parte del sistema fisiográfico de la serranía del Litoral, pero son separados de este por su relieve plano característico y por su importancia socio-económica en el estado.

##### *Serranía del Litoral*

La serranía del Litoral se ubica al norte del área de estudio y tiene un trazado paralelo a la línea costera. En conjunto con la serranía del Interior forma la cordillera de la Costa, que es un ramal de la cordillera de Los Andes. Las dos serranías se bifurcan en el macizo de Nirgua, estado Yaracuy, al occidente del área de estudio.

Desde allí ambas se extienden en dirección O-E.

##### *Serranía del Interior*

Se ubica al sur de la serranía del Litoral, constituyendo la mitad meridional de la cordillera de la Costa. Entre ambas estructuras flanquean los llamados Valles de Aragua, controlados por el sistema de fallas de La Victoria. Esta serranía, en el tramo de Aragua tiene un relieve bastante disectado aunque es menos imponente que la del Litoral.

##### *Depresión del lago de Valencia*

Se ubica entre las serranías del Litoral y del Interior. Es una cuenca endorreica que colecta las aguas que descienden de las dos serranías, entre ellas las del río Aragua que en su cauce bajo recorre el estado en dirección E-O, formando, conjuntamente con la planicie lacustrina, los Valles de Aragua.

##### *Llanos Centrales*

Se extienden al sur del estado, desde el piedemonte de la vertiente sur de la serranía del Interior, conformando una fisiografía de altiplanicie. Es la zona más extensa y despoblada del estado.

#### 3.2 Modelo Digital de Elevación (MDE)

Se construyó un mosaico con las cuatro imágenes SRTM del área. Sólo el 0,01% del mosaico tenía celdas sin datos, las cuales se rellenaron con el algoritmo de interpolación (Spline) del Sistema de Información Geográfica (SIG) SAGA. Las imágenes originales utilizadas corres-

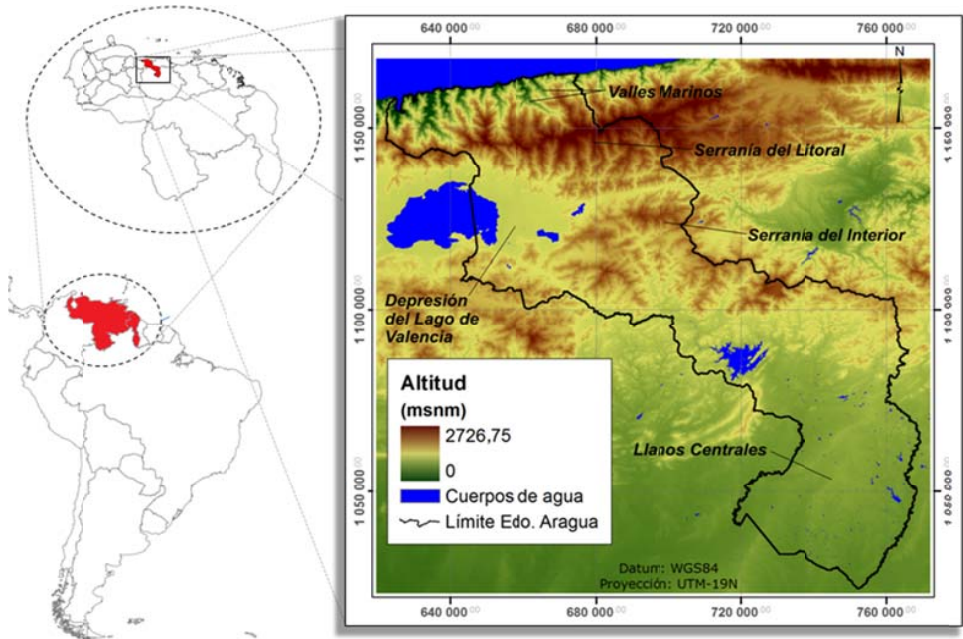


Figura 1. Ubicación del área de estudio y sus zonas eco-geográficas, estado Aragua-Venezuela

ponden a la versión 2.1 (NASA, 2009), las cuales han sido post-procesadas antes de su liberación para la eliminación de ruido (picos y depresiones falsos), nivelación de cuerpos de agua y definición de líneas de costa (Figura 1).

### 3.3 Variables geomorfométricas relacionadas con la producción de agua

Se estudió el fundamento conceptual de los algoritmos geomorfométricos vinculados con la producción potencial de agua y se seleccionaron las variables: Excedente Hídrico Anual (EXC), derivada del balance hídrico regional, Acumulación de Flujo (A) e Índice Topográfico de Humedad (TWI), como estimadoras de la

disponibilidad de recursos hídricos. Para considerar la localización espacial de las posibles fuentes de agua superficial se generó una variable a partir de la red hidrológica superficial, a la que se denominó Densidad de Cuerpos de Agua (DCA). Estos cuatro componentes se integraron en el Índice Hídrico (IH).

#### 3.3.1 Excedente Hídrico Anual (EXC) - Balance Hídrico Regional

Con esta variable se pretende tomar en cuenta los orígenes del flujo de escorrentía. Esta capa es un producto del balance Precipitación/Evapotranspiración, después de saturar la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo. Su valor en cada celda es una representación simplificada del ciclo hidrológico local

que transmite una idea de la distribución espacial del escurrimiento excedentario, susceptible de aprovecharse con fines de riego. Dada la limitada disponibilidad de información edafoclimática e hidrológica se utiliza un procedimiento simplificado para obtener una aproximación a la distribución espacial de los déficits y excedentes de agua en el suelo, asumiendo las siguientes premisas:

- La variabilidad espacial del suelo se puede representar con un valor empírico de capacidad de almacenamiento que equivalga al valor promedio de toda la zona en estudio. Los suelos de la serranía del Litoral y de la serranía del Interior, incluyendo solum y horizontes saprolíticos subyacentes, alcanzan frecuentemente los 100-150 cm de espesor. En los valles marinos de la cordillera de la Costa, en la depresión del lago de Valencia y en los llanos centrales la profundidad de los suelos es mayor (Sucre, 2003). Adoptando un valor promedio de profundidad radicular efectiva de 50 cm, con texturas variables entre Franco-Arenosas, Francas y Franco-Arcillosas, se puede asumir una tensión de retención a Capacidad de Campo de 30% del contenido volumétrico de agua en el suelo (15 cm) y una tensión de retención a Punto de Marchitez Permanente de 10% (5 cm), (Grassi, 2000), con lo que un valor de 10 cm se puede considerar adecuado como capacidad máxima de almacenamiento de humedad, ante la falta de información distribuida de este parámetro.

- No se consideran los aportes y pérdidas por percolación profunda, flujos superficiales y subterráneos, trasvases, obras de captación, etc.
- Dado que la precipitación promedio mensual más baja del registro histórico disponible corresponde al mes de marzo (18,1 mm), se asume que en ese mes el almacenamiento de humedad en el suelo es cero y se comienza el cálculo del balance en el mes de abril.

Para la obtención de la variable Precipitación Anual se elaboró un mapa de puntos con los valores anuales promedio de precipitación en la red de estaciones climáticas del estado Aragua, así como de los estados vecinos cercanos (Carabobo, Yaracuy, Guárico, Miranda, Vargas y Distrito Capital), (Figura 2). Este mapa se interpoló a una malla raster con la resolución empleada en las variables geomorfológicas (28,5 m), mediante el algoritmo Kriging Ordinario (Burrough and McDonnell, 2005), implementado por SAGA (Cimmery, 2007). Para esta interpolación se elaboró el semi-variógrama mostrado en la figura 3, el cual alcanza una meseta de 175.000 mm<sup>2</sup> a una distancia de 75.000 m, con un modelo de ajuste esférico. El procedimiento se repitió para todos los meses del año.

La variable Evaporación Anual se obtuvo ajustando un modelo lineal múltiple con las variables Altitud, Precipitación y Temperatura (para las estaciones disponibles). El modelo anual obtenido tiene un R<sup>2</sup> de 79,56% (p=9E-8) y la siguiente expresión:

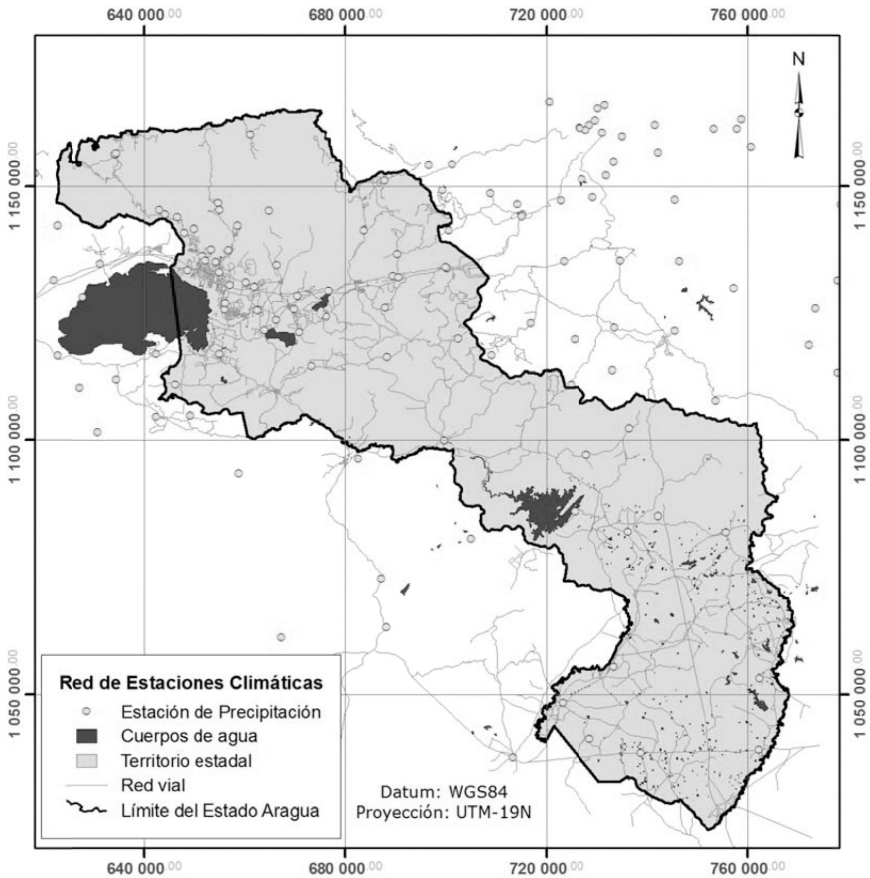


Figura 2. Red de estaciones climáticas del área de estudio y estados vecinos

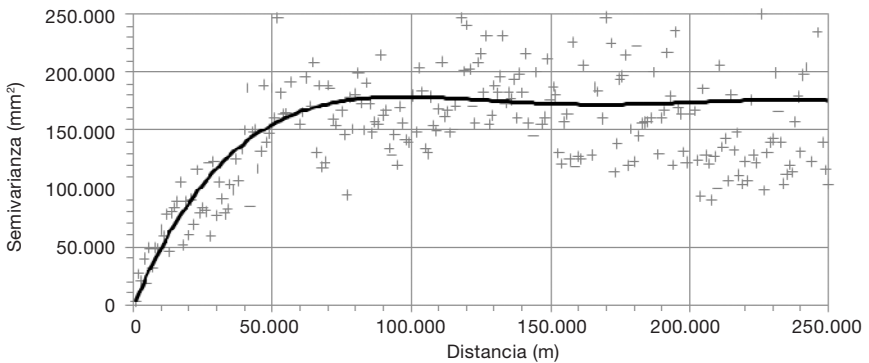


Figura 3. Semivariograma para la precipitación media anual. Red de estaciones climáticas del estado Aragón y estados vecinos



$$E_v = -3595,5404 - 0,0527 * Pr + 212,8292 * T + 0,7382 * MDE$$

El procedimiento se repitió para todos los meses del año.

Ante la falta de información climática para aplicar métodos más precisos, se estimó la evapotranspiración de referencia (ETO) a partir del coeficiente del tanque evapométrico, el cual, para las condiciones promedio de HR, velocidad del viento y vegetación, de las estaciones climáticas evaluadas, adopta un valor de 0,80 (FAO, 2006). Este factor ajusta la variable Evaporación, para obtener la variable Evapotranspiración.

El balance hídrico se obtuvo a partir de las variables Precipitación y Evapotranspiración, aplicando el siguiente algoritmo:

$$Disp_{(i)} = Pr_{(i)} + Alm_{(i-1)} - ETP_{(i)}$$

Si:  $0 \leq Disp_{(i)} \leq Tope$ , entonces:  $ETR_{(i)} = ETP_{(i)}$

$$Alm_{(i-1)} = Disp_{(i)} - ETR_{(i)}$$

$$Def_{(i)} = 0$$

$$Exc_{(i)} = 0$$

Si:  $Disp_{(i)} < 0$ , entonces:  $ETR_{(i)} = Pr_{(i)} + Alm_{(i-1)}$

$$Alm_{(i)} = 0$$

$$Def_{(i)} = ETP_{(i)} - ETR_{(i)}$$

$$Exc_{(i)} = 0$$

Si:  $Disp_{(i)} > Tope$ , entonces:  $ETR_{(i)} = ETP_{(i)}$

$$Alm_{(i)} = Tope$$

$$Exc_{(i)} = Disp_{(i)} - Alm_{(i)}$$

$$Def_{(i)} = 0$$

Donde:

$Disp_{(i)}$  disponibilidad de agua total promedio en el mes  $i$ ,

$Pr_{(i)}$  precipitación promedio del mes  $i$ ,

$Alm_{(i)}$  almacenamiento promedio de agua en el suelo durante el mes  $i$ ,

$ETP_{(i)}$  evapotranspiración potencial promedio del mes  $i$ ,

$ETR_{(i)}$  evapotranspiración real promedio del mes  $i$ ,

$Def_{(i)}$  déficit de humedad promedio en el suelo durante el mes  $i$ ,

$Exc_{(i)}$  excedente de humedad promedio en el suelo durante el mes  $i$ ,

$Tope$  capacidad máxima de almacenamiento de humedad del suelo, cuyo valor adoptado es de 10 cm.

$$\sum_{i=1}^{12} Exc_{(i)} = \sum_{i=1}^{12} Pr_{(i)} - \sum_{i=1}^{12} ETR_{(i)} \quad (i)$$

En la figura 4 se presenta la variable Excedente Hídrico Anual, derivada del balance hídrico, y en la figura 5 la distribución mensual de esta variable.

### 3.3.2 Acumulación de Flujo(A)

La acumulación de flujo es la superficie que recolecta todo el flujo recibido aguas arriba de un punto de interés y lo transita por dicho punto. Es una superficie proyectada sobre el plano horizontal y en un mapa raster se obtiene sumando todas las celdas que contribuyen con flujo a la celda de interés, situada aguas abajo, y multiplicando por la superficie de cada celda. La expresión correspondiente es (Burrough and McDonnell, 2005):

$$A_i = A + \sum_{i=1}^k (A_{d_i} d_i)$$



Donde:

$A_i$  área de captación acumulada para la celda central  $i$  en una ventana móvil de cálculo de  $n \times n$  celdas en una imagen raster,  $A$  área de captación de la celda central (proveniente del cálculo de  $A_i$  en la ventana móvil previa),

$A_{di}$  área de captación de la celda vecina  $i$  ubicada aguas abajo de la celda central,  $d_i$  fracción de flujo que drena de la celda central a la celda vecina  $i$ , obtenida con algún algoritmo de flujo, en este caso el MFD o FDS (Quinn *et al.*, 1991; Freeman, 1991).

Con esta variable se toma en consideración la variabilidad local de escurrimiento superficial y subterráneo, como consecuencia de los cambios en el tamaño de las cuencas hidrográficas que acumulan la superficie de escurrimiento potencial. En la figura 6 se muestra el resultado de la aplicación del algoritmo en el área de estudio.

### 3.3.3 Índice Topográfico de Humedad (TWI)

Es una variable que define la tendencia de una celda a acumular agua (Gruber

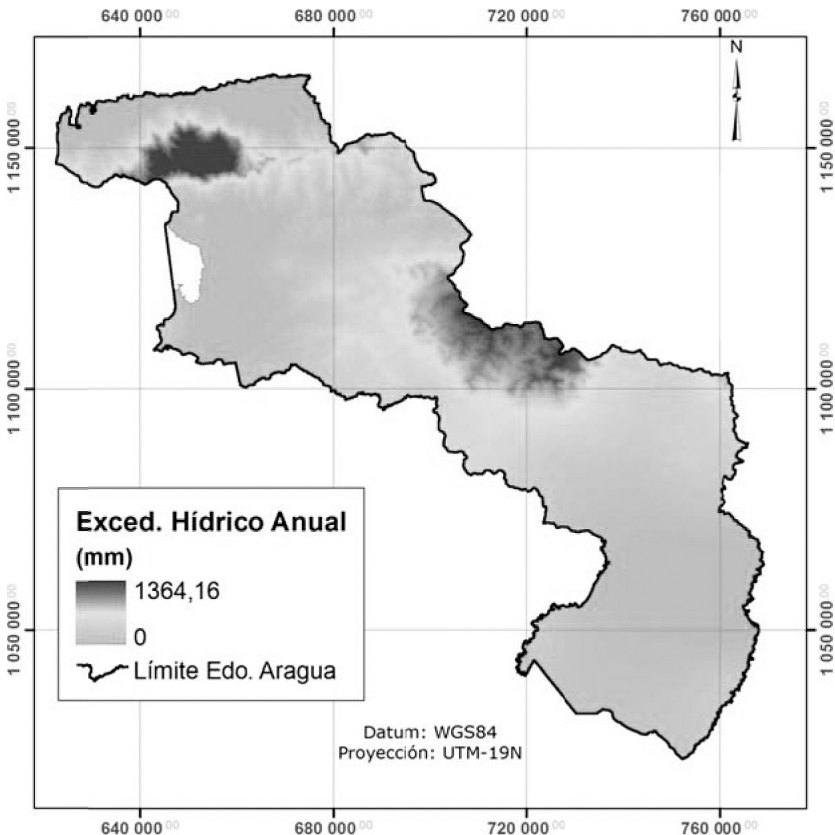


Figura 4. Excedente Hídrico Anual

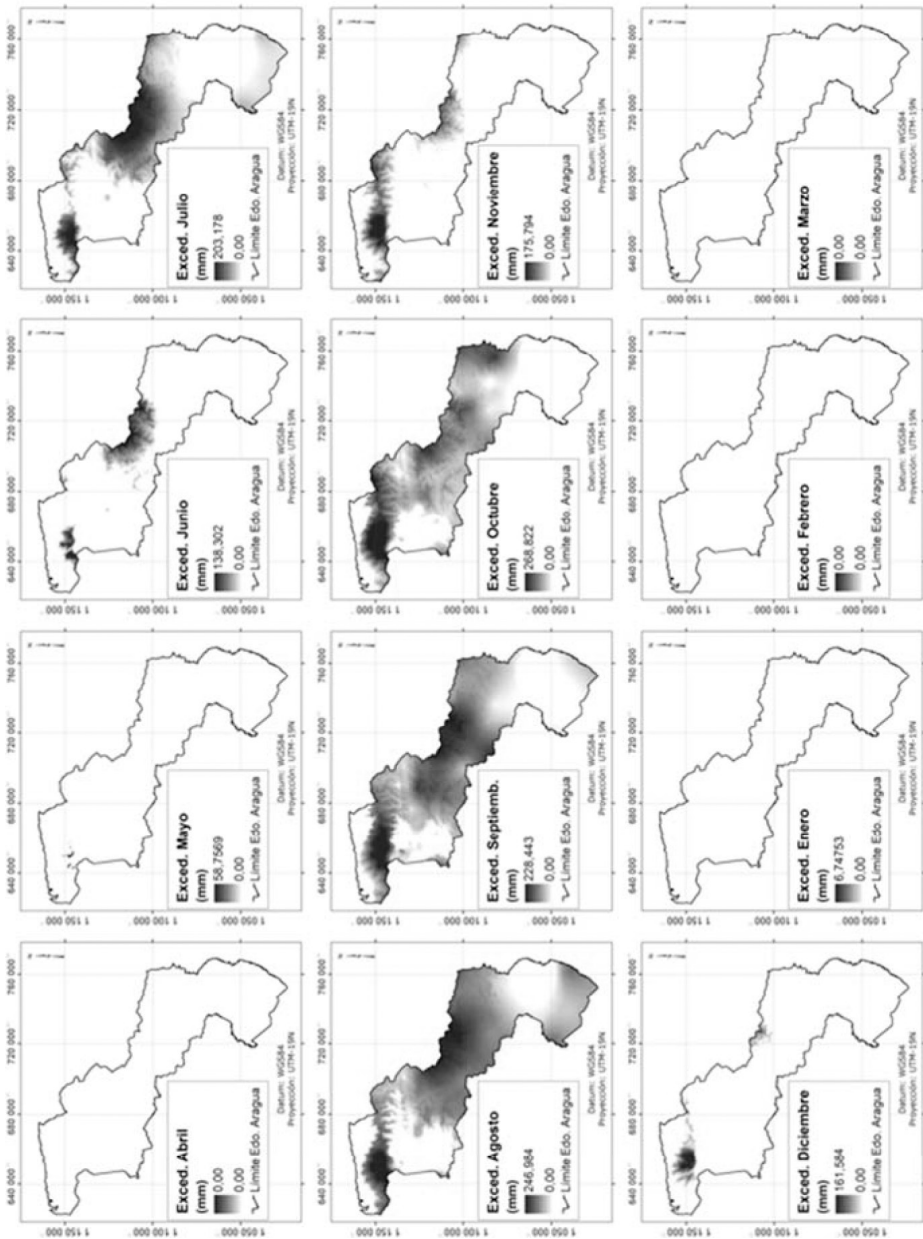


Figura 5. Excedente Hídrico Mensual

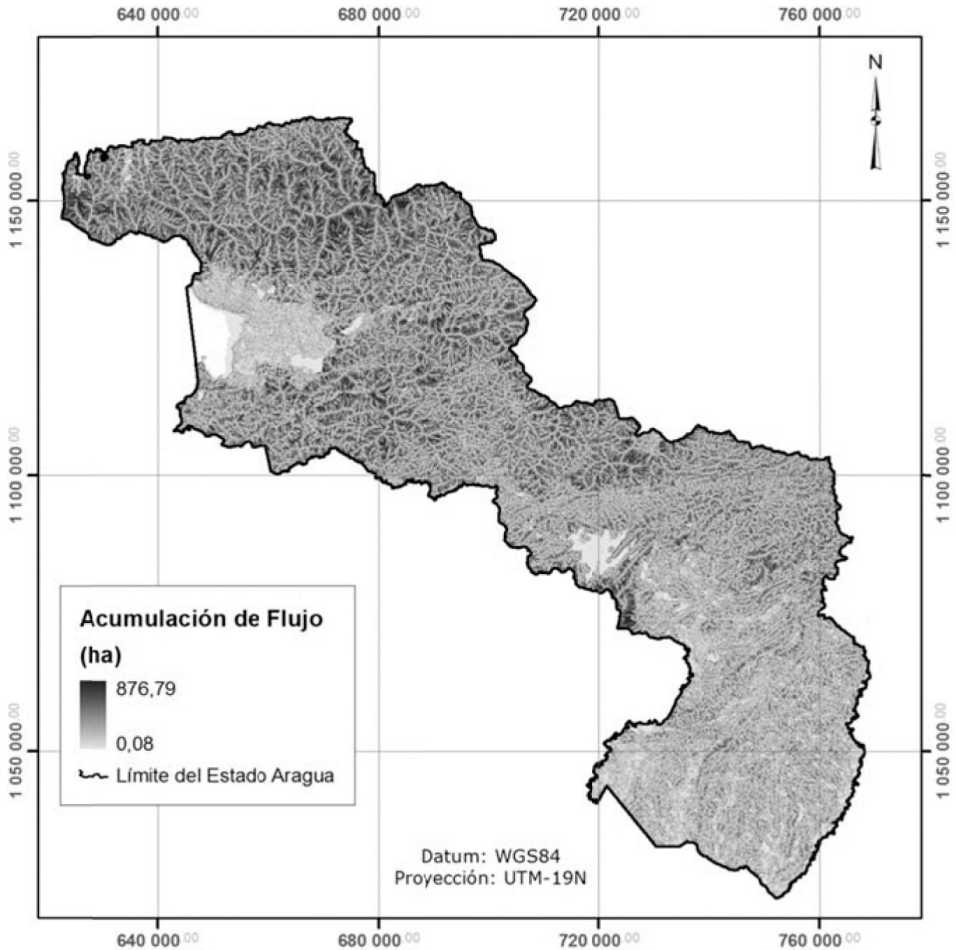


Figura 6. Acumulación de flujo (ha)

and Peckham, 2009). Está relacionada con la humedad del suelo y refleja la tendencia de éste a generar escorrentía, ya que áreas con mayor valor del índice, como producto de su configuración topográfica y edáfica, son más proclives a generar escorrentía derivada de la precipitación (Abarca y Bernabé, 2008; Olaya, 2006). Este índice se calcula mediante la siguiente expresión (Beven y Kirkby, 1979):

$$TWI = Ln \left[ \frac{A}{\tan(\beta)} \right]$$

Donde:

- A Acumulación de Flujo,
- $\beta$  pendiente local (derivada del MDE, algoritmo de Zevenbergen and Thorne [1987]).

En la figura 7 se muestra el resultado de la aplicación del algoritmo.

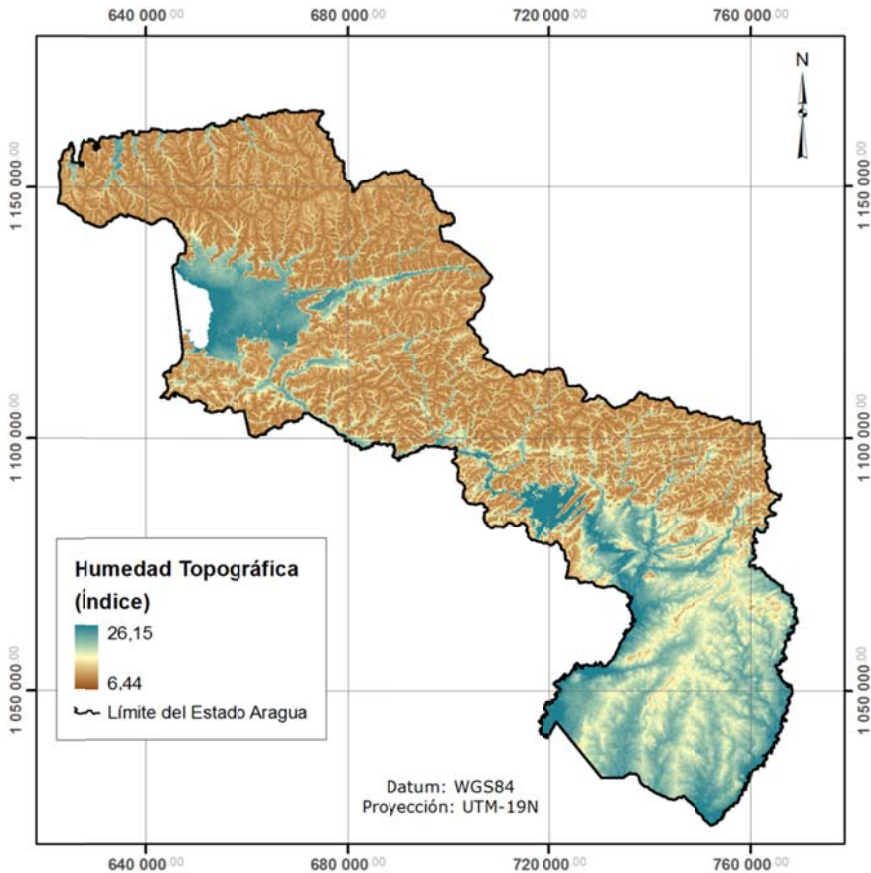


Figura 7. Índice Topográfico de Humedad

### 3.3.4 Densidad de Cuerpos de Agua (DCA)

Con esta variable se toma en cuenta la posición espacial de las celdas, en relación con la hidrografía, y su potencial para el aprovechamiento del recurso hídrico superficial. Para obtener esta variable se sigue el siguiente procedimiento:

- Se extrae la red de drenaje del MDE, utilizando como umbral de inicio un área aportante ( $A$ ) mayor de 50 ha.

Este criterio produjo una red bastante similar a la red representada en la cartografía básica 1:100 000. En este procedimiento se emplea el algoritmo D8 (O'Callaghan and Mark, 1984).

- Se digitalizan los polígonos de agua superficiales (lagos, embalses, lagunas y prestamos), incluyendo aquellos ubicados en los estados vecinos.
- Se integran la red de drenaje y los polígonos de agua en una capa Booleana (0 = sin cuerpos de agua, 1 = con

cuerpos de agua). Se calcula una capa de distancias, medidas desde la capa Booleana de cuerpos de agua.

- Se extrae la distancia existente entre los cuerpos de agua y la celda más alejada sin cuerpos de agua (este valor resultó en 5,7 km para el área de estudio). Esta distancia constituye el radio de búsqueda que se debe usar en la ventana móvil de cálculo para el siguiente paso del proceso.
- Se calcula, para cada celda de la imagen Booleana Cuerpos de Agua, la sumatoria de celdas correspondientes a cuerpos de agua (celdas con valor 1) dentro de la ventana móvil circular, con el radio de búsqueda obtenido. Para este fin se utiliza la herramienta Estadística Focal del software ArcGIS (Figura 8). Las celdas que tengan mayor valor de la sumatoria, tendrán mayor cantidad de celdas que repre-

sentan cuerpos de agua en su área de influencia (5.7 km).

La variable Densidad de Cuerpos de Agua, así obtenida (Figura 9), toma en cuenta la cantidad de cuerpos de agua que existen por unidad de referencia superficial circular. Para este componente del Índice Hídrico, se está asumiendo el criterio de que las unidades de producción agrícola (celdas) que tengan mayor cantidad de cuerpos de agua en su territorio de influencia, tendrán una mayor disponibilidad potencial de este recurso superficial.

### 3.4 Índice Hídrico (IH)

Cada uno de los cuatro componentes descritos se re-escalaron entre 0 y 1, mediante la expresión:

$$I_{Nuevo} = Min_{Nuevo} + \left[ \frac{I_{Viejo} - Min_{Viejo}}{Rango_{Viejo}} \right] * Rango_{Nuevo}$$

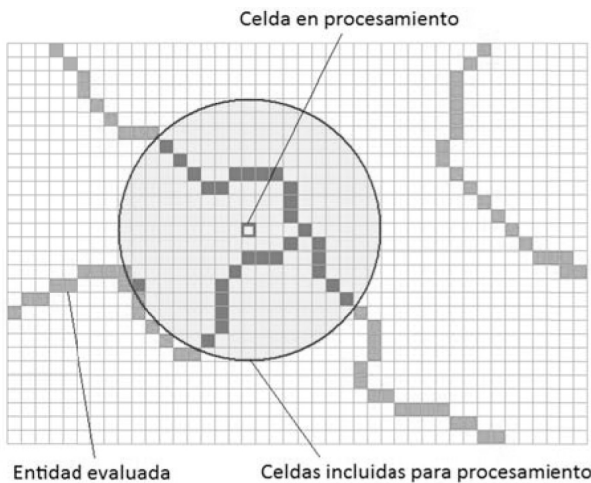


Figura 8. Procedimiento de cálculo para obtener la Densidad de Cuerpos de Agua

Donde:

$I_{Nuevo}$  nuevo valor del índice (componente del índice) escalado entre 0 y 1,

$I_{Viejo}$  valor del índice en su escala original,

$Min_{Nuevo} = 0$ ,

$Min_{Viejo}$  mínimo valor del índice en su escala original,

$Rango_{Nuevo} = 1 - 0 = 1$ ,

$Rango_{Viejo}$  rango entre el máximo y el mínimo valor del índice en su escala original.

El Índice Hídrico (IH) se obtiene integrando los cuatro componentes, por lo que puede tomar valores entre 0 y 4. El resultado también se re-escala entre 0 y 1. El valor 0 representa las celdas que tienen disponibilidad nula del recurso hídrico y el valor 1 la máxima disponibilidad, en el ámbito de la región de estudio (Figura 10).

$$IH = EXC + A + TWI + DCA$$

### 3.5 Validación del Índice Hídrico (IH)

#### 3.5.1 Interpretación visual

El Índice Hídrico, generado como un estimador de la disponibilidad de recursos hídricos a nivel regional, permitió producir un mapa que se ajusta a la distribución de los recursos hídricos del estado (Figura 10). Los valores más altos del índice corresponden a las zonas que efectivamente reciben mayores aportes hídricos, bien sean superficiales, subterráneos o meteorológicos.

Al norte del mapa se identifica la zona de bosque húmedo (selva nublada) del Parque Nacional Henri Pittier, donde se producen los mayores registros de preci-

pitación del estado a lo largo del año. Lo mismo ocurre en la zona montañosa de Tiara-San Casimiro en el centro-oriente del estado. Las zonas cubiertas por grandes cuerpos de agua, como lagos y embalses, también producen los valores más elevados del índice. Las adyacencias del lago de Valencia, del embalse Taiguai-guay y del embalse Suata, en la depresión del Lago, y del embalse Camatagua, al sur, son las zonas donde se desarrolla la mayor actividad agrícola bajo riego del estado y donde se producen los mayores rendimientos agrícolas (Figuras 9 y 10).

Los valles de los ríos son también destacados con valores altos y moderadamente altos del Índice Hídrico. Se destacan los valles marinos de la vertiente norte de la serranía del Litoral, conformados por los ríos San Miguel, Ocumare, Cata, quebrada Guarapito, Aroa, Grande, Chuao y quebrada Cepe. En la vertiente sur, el índice destaca en los valles de los ríos más importantes y sus tributarios, entre otros el Limón, Güey, Maracay, Caño Colorado, Pedregal, Guayabita, Paya, Aragua y Tuy. Al centro del estado, en la vertiente sur de la serranía del Interior se observan los valles de los ríos Tucutunemo, Pao, Caramacate, quebrada Hermana y Zuata, todos afluentes del río Guárico, el cual es regulado por el embalse Camatagua. Las aguas de este embalse son utilizadas principalmente para abastecimiento urbano, con la extracción de más de 70% de su caudal (entre 9 y 12 m<sup>3</sup>/s) para el abastecimiento de la ciudad de Caracas, aspecto que no es considerado en el Índice Hídrico. Al sur del estado, aguas abajo del embalse Camatagua, se



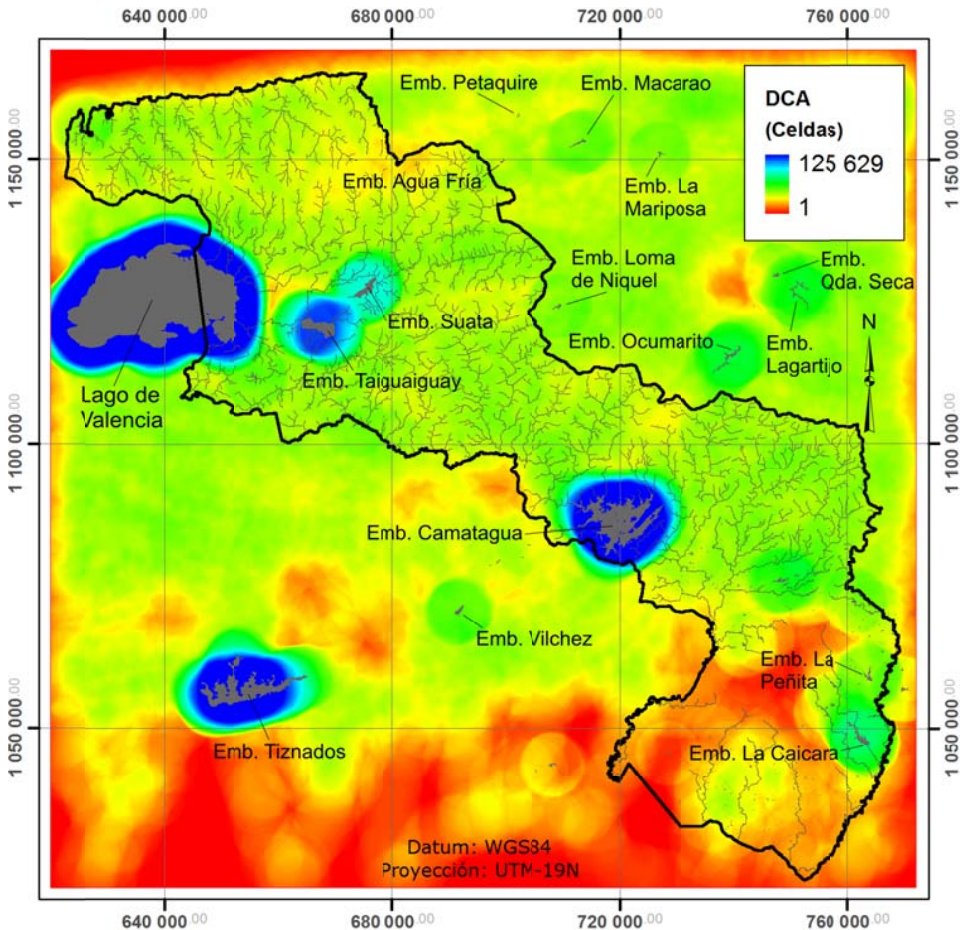


Figura 9. Densidad de Cuerpos de Agua (DCA) en un radio de búsqueda de 5,7 km. Los tonos azul intenso corresponden a las celdas con mayor concentración de cuerpos de agua, principalmente ubicadas alrededor de lagos y embalses. Los tonos verdes representan valores intermedios, generalmente ubicados alrededor de ríos y quebradas y las tonalidades rojas corresponden a zonas de baja a nula disponibilidad hídrica. El mar Caribe (no considerado como un cuerpo de agua potencialmente aprovechable) y el área exterior al polígono estatal son posteriormente excluidos del análisis mediante una capa máscara

destacan los valles de la quebrada Camatagüita y los ríos Cura, Tinapuey, Taguay, Guárico, caño Tacatinemo, caño Los Manires, caño Camoruco, quebrada Juajua, quebrada Caicara y río Memo.

En las zonas de menor índice hídrico confluye un bajo valor de Acumulación de Flujo, con elevadas Pendientes, lo que determina un bajo *TWI* y consecuentemente una baja tendencia a generar esco-



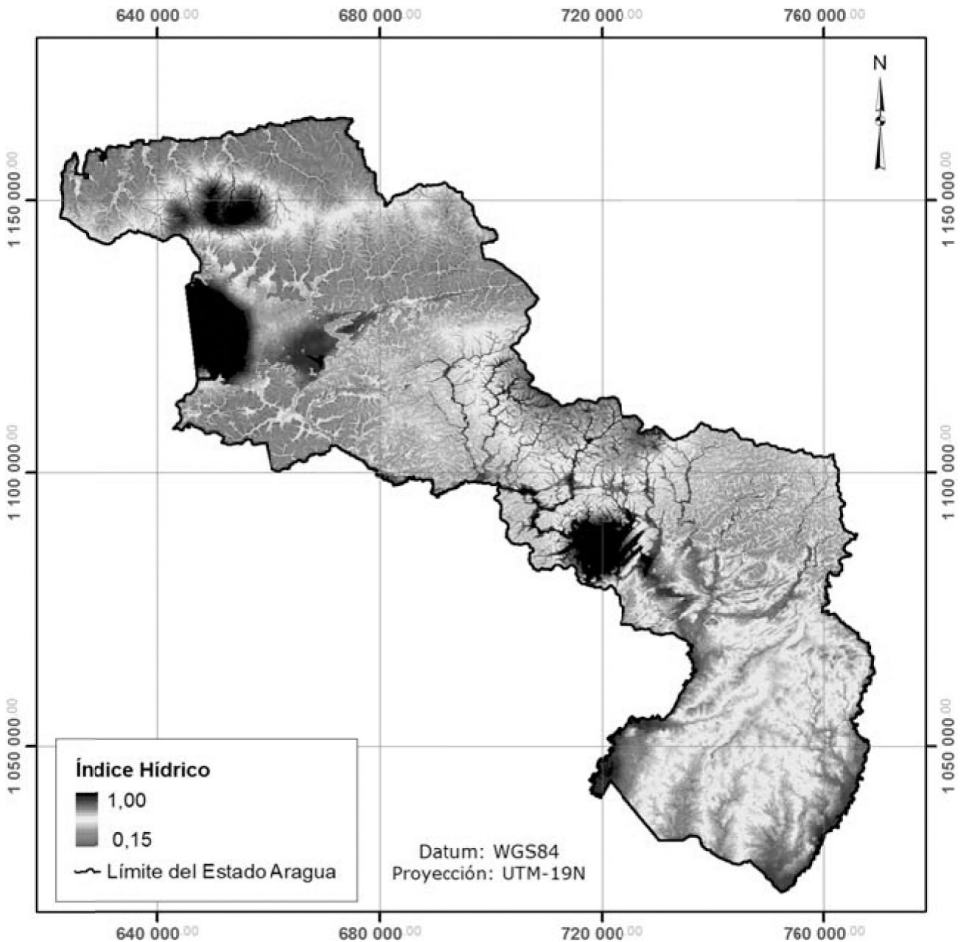


Figura 10. Índice Hídrico para la estimación de la disponibilidad potencial de recursos hídricos

rentía. Estas zonas corresponden principalmente con las laderas de las serranías del Litoral y del Interior. Otro sector con bajo Índice Hídrico se presenta en los llanos ondulados del sur del estado, como consecuencia de un bajo valor del Excedente Hídrico Anual, derivado de las bajas precipitaciones.

### 3.5.2 Vinculación de los componentes del Índice con el escurrimiento superficial

En la zona de estudio y estados vecinos se localiza una serie de embalses multipropósito (Figura 9) que disponen de información hidro-climática recolectada para la elaboración de los respectivos proyectos y para su operación. La información disponible de mayor relevancia

a fines de evaluar el Índice Hídrico y sus componentes es el Ecurrimiento Medio Anual (EMA), (Minamb, 2009; Abarca y Bernabé, 2008; Abarca, 1998). Se determinó la relación entre los cuatro componentes seleccionados para la construcción del Índice Hídrico con el EMA, en las cuencas de captación de estos embalses. Para ello se determinó la cuenca de escurrimiento de cada embalse, mediante el MDE, y se extrajo la sumatoria del valor de cada componente del índice en cada cuenca hidrográfica. Se seleccionó el estadístico suma, tomando en cuenta que el EMA corresponde a la totalización (suma) del flujo superficial proveniente de cada celda individual y que es descargado en el punto de salida de la cuenca, en promedio al año. Las características de los embalses y puntos de escurrimien-

to evaluados y el valor correspondiente a cada componente del índice se presentan en el cuadro 1.

A partir de los valores del cuadro 1 se determinó la correlación entre el EMA y las variables EXC, A, TWI y DCA, obteniéndose un  $R^2$  de 88,50% ( $p=0,0056$ ) con el siguiente modelo de regresión múltiple:

$$EMA = 1390,4371 + 194,3011 * Ln(EXC) + 78,3058 * Ln(A) - 297,266 * Ln(TWI) - 8,1824 - Ln(DCA)$$

Este ajuste determina que los componentes seleccionados para la confección del Índice Hídrico son buenos predictores del Ecurrimiento Medio Anual en las cuencas hidrográficas evaluadas y por lo tanto buenos estimadores de la disponibilidad de recursos hídricos en la región.

**Cuadro 1. Caracterización del Índice Hídrico en obras de embalse del área de estudio**

Cuenca	Embalse (Sitio aforo)	Superf. vaso (ha)	Superf. cuenca (ha)	Ecurrimiento Medio Anual		Componente del Índice Hídrico (Suma de celdas)			
				Hm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /s	EXC	A	TWI	DCA
Río Guárico	Camatagua	7 648,35	2 185,00	390,50	12,38	13 826,44	87 923,37	262 266,16	54 091,21
Río Lagartijo	Lagartijo	451,00	302,00	138,44	4,39	5 422,18	58 613,99	109 288,55	22 901,45
Río Ocumarito	Ocumarito	75,00	132,00	55,50	1,76	788 819,38	7 444 648,50	32 620 956,00	13 429 863,00
Río Petaquire	Petaquire	18,50	34,20	8,99	0,29	200 375,55	871 891,38	3 970 524,00	889 340,06
Río Macarao	Macarao	46,00	94,00	12,61	0,40	42 878,55	459 439,94	1 600 240,38	335 492,47
Río Aragua	Suata	849,80	198,00	22,60	0,72	5 764,21	187 237,00	474 665,56	85 075,93
Lago de Valencia	Taiguaiquay	2 033,99	198,00	19,69	0,62	15 267,48	534 137,56	1 237 694,38	234 582,20
Río Tiznados	Tiznados	7 428,00	1 490,00	428,89	13,60	54 775,34	1 445 815,63	3 343 997,00	664 749,31
Río Vilchez	Vilchez	143,00	62,50	9,78	0,31	68 575,89	1 749 652,50	4 978 153,00	1 446 711,75
Río El Limón	Estación Forestal	-	18,63	20,18	0,64	530 745,81	4 045 585,75	25 039 046,00	3 493 724,25
Río El Limón	Qda. El Manguito	-	7,60	7,01	0,22	30 077,15	134 555,33	1 407 214,75	211 058,64

Fuente: MINAMB (2009); Abarca y Bernabé (2008)

## 4. Conclusiones

Se construyó un Índice Hídrico como estimador de la disponibilidad de recursos hídricos en áreas con fuentes limitadas de información, partiendo de variables geomorfológicas derivadas del MDE SRTM, libremente disponible en Internet, de variables cartográficas básicas y de registros climáticos comúnmente disponibles. Los componentes de este índice son buenos estimadores de la disponibilidad de recursos hídricos superficiales en la zona, dado que tienen un ajuste estadísticamente significativo con el Escurrimiento Medio Anual en cuencas hidrográficas seleccionadas del área. Esta herramienta se puede utilizar para sustituir procedimientos subjetivos de valoración basados en juicios de expertos, en la planificación del aprovechamiento de los recursos de aguas y tierra, así como en la estimación de la disponibilidad de recursos hídricos para la aplicación masiva del impuesto territorial.

El índice puede mejorar su capacidad predictiva si se incorporan componentes relativos al recurso hídrico subterráneo. La variable DCA toma en cuenta solo el componente superficial del escurrimiento, mientras que los componentes TWI, A y EXC están relacionados con la disponibilidad potencial de los dos tipos de recurso pero sin posibilidades de discernir entre ellos. Se pudiera integrar al índice un modelo de elevación (profundidad) de los acuíferos locales, si se dispusiera de registros piezométricos adecuados a la escala de evaluación, lo que aportaría una cuantificación del recurso. Así mis-

mo, se pudiera mejorar el balance hídrico regional, considerando una Capacidad de Almacenamiento de Humedad en el Suelo real, basada en mediciones de campo y tomando en cuenta su variabilidad espacial. Este balance además debe incorporar las extracciones para usos consuntivos agrícolas y no agrícolas y los aportes por trasvases de otras regiones. Para estas consideraciones se debe plantear el tratamiento de la información en unidades de análisis basadas en cuencas hidrográficas que posteriormente se pueden integrar en unidades regionales administrativas.

## 5. Referencias citadas

- ABARCA, O. 1998. *Metodología para la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la planificación del desarrollo físico agrícola*. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay-Venezuela. Trabajo de ascenso. 96 p. (Inédito).
- ABARCA, O. y M. BERNABÉ. 2008. *Desarrollo metodológico para la simulación hidrológica de caudales de estiaje con el SIG SEXTANTE. Mapping Interactivo, Nov/Dic (130)* [Online]. [Citado el 10/03/2009]. Disponible en: <[http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id\\_articulo=1534](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1534)>.
- ASAMBLEA NACIONAL DE LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA (ANRBV), 2005. *Ley de Reforma Parcial del Decreto N° 1546 con Fuerza de Ley de Tierras y Desarrollo Agrario*. Gaceta Oficial (N° 5771 Extraordinario, 18 de mayo de 2005). Imprenta Nacional. Caracas.

- BEVEN, K. and M. KIRKBY. 1979. *A physically based variable contributing area model of basin hydrology*. International Association of Hydrological Sciences: **Hydrological Sciences Bulletin**, 24 (1): 43-69.
- BURROUGH, P. and R. MCDONNELL. 2005. **Principles of Geographical Information Systems. Spatial Information Systems and Geostatistics**. Oxford University Press. Oxford. 333 p.
- CIMMERY, V. 2007. **User Guide for SAGA** (version 2.0) [On line]. [Citado el 11/02/2009]. Disponible en: <<http://www.saga-gis.org/en/index.html>>.
- FAO. 2006. **Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. Estudios FAO Riego y Drenaje N° 56. Roma. 298 p.
- FREEMAN, T. 1991. *Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid*. **Computer and Geosciences**, 17 (3): 413-422.
- GRASSI, C. 2000. **Diseño y operación del riego por superficie**. 2da edición. CI-DIAT. Mérida-Venezuela.
- GRUBER, S. and S. PECKHAM. 2009. Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology. En: T. Hengl y H. Reuter (Eds.), **Geomorphometry. Concepts, Software, Applications**. 171-194. Elsevier. Amsterdam-Oxford.
- MARÍN, R. 1999. **Disponibilidad de tierras agrícolas de Venezuela**. Fundación Polar. Caracas. 53 p.
- MINAMB. 2008. *Datos meteorológicos mensuales*. Ministerio del Ambiente. Caracas: Dirección de Hidrología, Meteorología y Oceanología.
- MINAMB. 2009. *Embalses de Venezuela* [On line]. Dirección General de Equipamiento Ambiental-Ministerio del Poder Popular para el Ambiente [Citado el 11/12/2009]. Disponible en: <[http://www.minamb.gov.ve/index.php?option=com\\_content&task=view&id=128&Itemid=102](http://www.minamb.gov.ve/index.php?option=com_content&task=view&id=128&Itemid=102)>.
- NASA. 2009. *Shuttle Radar Topography Mission* [On line]. [Citado el 20/01/2009]. Disponible en: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>.
- O'CALLAGHAN, J. and D. MARK. 1984. *The Extraction of Drainage networks from Digital Elevation Data*. **Computer Vision, Graphics and Image Processing**, 28: 323-344.
- OLAYA, V. 2006. **Fundamentos de Análisis Geográfico con SEXTANTE** [On line]. [Citado el 0/05/2007]. Disponible en: <<http://campusvirtual.unex.es/cala/cala/course/view.php?id=146>>.
- QUINN, P.; BEVEN, K.; CHEVALLIER, P. and O. PLANCHON. 1991. *The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models*. **Hydrological Processes**, 5: 59-79.
- REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA (RBV). 2005. *Reglamento Parcial del Decreto con Fuerza de Ley de Tierras y Desarrollo Agrario para la Determinación de la Vocación de Uso de la Tierra Rural*. Gaceta Oficial (N° 38.126, 14 de febrero de 2005). Decreto N° 3.463. Imprenta Nacional. Caracas.
- SUCRE, D. 2003. **Delimitación de Áreas Eco-geográficas del estado Aragua**. Papeles de FUNDACITE Aragua. Maracay-Venezuela. 76 p.
- ZEVENBERGEN, L. and C. THORNE. (1987). *Quantitative analysis of land surface topography*. **Earth Surface Processes and Landforms**, 12: 47-56.