

CALIBRACIÓN Y APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE ARIDEZ DE De Martonne PARA EL ANÁLISIS DEL DÉFICIT HÍDRICO COMO ESTIMADOR DE LA ARIDEZ Y DESERTIFICACIÓN EN ZONAS ÁRIDAS

Calibration and application of the De Martonne aridity index for the analysis of hydric deficit as an estimator of aridity and desertification in arid areas

G Mercado-Mancera, E Troyo-Diéguez ✉, A Aguirre-Gómez, B Murillo-Amador, LF Beltrán-Morales, JL García-Hernández

(ETD)(BMA)(LFBM) Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. La Paz, B.C.S. etroyo04@cibnor.mx
(GMM) Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Departamento de Ciencias Agrícolas, UNAM. Doctorante del Programa de Posgrado, CIBNOR, S.C. La Paz, B.C.S. gmancera@cibnor.mx
(AAG) Fac. de Estudios Superiores Cuautitlán, Depto. de Ciencias Agrícolas, UNAM. Cuautitlán, Edo. de Méx.
(JLGH) Facultad de Agricultura y Zootecnia, Universidad Juárez del Estado de Durango. Venecia, Dgo

Artículo recibido: 16 de junio de 2009, **aceptado:** 23 de marzo de 2010

RESUMEN. La modelación de la aridez y determinación del balance hidrológico son indispensables para la planeación del uso del recurso agua, principalmente en zonas con disponibilidad limitada. El objetivo del presente trabajo fue adaptar y calibrar el modelo de aridez hidroclimática de De Martonne mediante una modificación del mismo, para adecuarlo al estudio del balance hídrico en zonas áridas y semiáridas. Se efectuó un análisis numérico del Índice de Aridez [$A = 12pp/(t+10)$] para detectar su sensibilidad a gradientes de precipitación y temperatura, donde A es el Índice de Aridez de De Martonne, pp es la precipitación mensual y t es la temperatura media mensual. Mediante el método de mínimos cuadrados se eligió un modelo numérico de función polinomial donde X_1 es la temperatura media y X_2 es la precipitación mensual, de tal forma que satisface una función $A_{mod} = f(t, pp)$. La ecuación modificada fue ensayada y correlacionada empleando datos de estaciones climatológicas de las cuencas de La Paz y Comondú, Baja California Sur. Para el área de la estación La Paz se determinó un índice promedio mensual de 4.96, mientras que para Comondú fue 5.16. A partir de la calibración realizada se propone la función: $IDHA = 0,176012 + 0,101391 * pp$, donde $IDHA$ es el índice de disponibilidad hidro-ambiental y pp es la precipitación mensual, reflejando estrecha relación entre pp e $IDHA$ ($R^2 = 94.83\%$ y $r = 0.97$). La modificación al Índice de De Martonne fue numéricamente funcional, con alto potencial de aplicación en estudios hidrológicos de zonas áridas y semiáridas.

Palabras clave: Índice de aridez, índice hidro-ambiental, sequía, desertificación.

ABSTRACT. Modelling aridity and determining the hydrologic balance are necessary in the planning of the use of water resources, particularly in areas with limited water availability. The purpose of this study was to adapt and calibrate the hydroclimatic aridity model of De Martonne, modifying it to make it adequate for the study of the water balance in arid and semi-arid areas. A numerical analysis of the Aridity Index [$A = 12pp/(t + 10)$] was carried out in order to detect its sensitivity to rainfall and temperature gradients, where A is the Aridity Index of De Martonne, pp is the monthly rainfall, and t is the average monthly temperature. A least squares analysis was used to select a polynomial function numerical model where X_1 is the average temperature, X_2 is the monthly rainfall, and a $A_{mod} = f(t, pp)$ function is satisfied. The modified equation was assayed and correlated using data from weather stations located in the watersheds of La Paz and Comondú, Baja California Sur. La Paz presented a monthly average index of 4.96, and Comondú recorded a value of 5.16. The equation of the fitted model was $IDHA = 0,176012 + 0,101391 * pp$, where $IDHA$ is the hydro-environmental availability index and pp is the monthly rainfall, with $R^2 = 94.83\%$ and $r = 0.97$ indicating a close relationship between pp and $IDHA$. The modification applied to the De Martonne Index was numerically functional, with a high potential of application to hydrological studies of arid and semi-arid areas.

Key words: Aridity index, hydro-environmental index, drought, desertification.

INTRODUCCIÓN

El diagnóstico acertado de las sequías, la modelación de la aridez y la determinación del balance del agua, son indispensables para una adecuada planeación del recurso agua. Existen diversos métodos para detectar los intervalos de sequía, estimar la magnitud de la aridez y definir la ruta hidrológica en el balance del agua en cuencas, sin embargo, deben adaptarse y calibrarse en cada región (Abraham *et al.* 2006). La aridez es un concepto sinónimo de sequedad. Traduce la ausencia o escasa presencia de agua o bien de humedad en el aire y suelo. Los factores que la definen son complejos: escasez de precipitaciones, tanto en cantidad como en intensidad y regularidad, alta radiación solar, lo que origina altas temperaturas y una evapotranspiración superior al volumen de agua disponible, así como una baja humedad atmosférica, entre otros. La aridez aparece por la presencia de anticiclones estables o como efecto de la continentalidad, aunque en algunos casos es consecuencia de barreras montañosas, que impiden el paso o la llegada de corrientes de aire húmedo (Salinas-Zavala *et al.* 1998).

El cálculo de índices numéricos facilita el manejo del concepto de sequía y aridez, sobre todo en momentos de planeación y manejo de recursos naturales, principalmente del recurso agua. Para diferenciar los términos aridez y sequía, el primero se refiere a una condición hidro-climática permanente, en tanto que el segundo describe una disminución del valor normal de la precipitación para un periodo de tiempo dado. Así, las tierras áridas y semiáridas que disponen de menor disponibilidad hidro-ambiental, son más vulnerables al deterioro ambiental, causado por procesos naturales y también por actividades y procesos antropogénicos (Anónimo 1997; Sharma 1998). Al respecto, la desertificación como producto del sobrepastoreo y deforestación, entre otras actividades, es tema prioritario para México. Al tener un territorio predominantemente árido o semiárido, aproximadamente 70 % de la tierra debe considerarse vulnerable a la desertificación. De hecho, 64 % del suelo ya ha sido afectado por dicho proceso: "la cifra oficial sobre los suelos degradados en el país asciende a cerca de 125 460 475 ha" (SEMARNAT

2006).

Desde su origen, la desertificación ha sido asociada estrechamente a condiciones de aridez, motivo de un análisis sistematizado sobre sus características, causas y consecuencias, lo que proporciona un marco conceptual de carácter integral, que permite construir propuestas programáticas completas y utilitarias (Anónimo 1994). De acuerdo al Programa Ambiental de Naciones Unidas (Anónimo 1992), aquellas regiones donde la tasa anual del cociente Precipitación/Evapotranspiración es de 0.05 a 0.65, pueden considerarse vulnerables a la desertificación. En el marco de análisis de las variantes de índole metodológica, el uso de indicadores y puntos de referencia representa una opción que podría ser de suma utilidad para resolver las dificultades que eventualmente pueden presentar diferentes métodos disponibles. En este sentido, debe hacerse énfasis en la necesidad de que este tipo de datos sean referidos a un contexto amplio, principalmente desde el punto de vista geoclimático, dado por los sistemas integrales de evaluación (Abraham *et al.* 2006). Al respecto, se considera que los indicadores y puntos de referencia constituyen una herramienta de evaluación, entre otros aspectos utilitarios, además de que los efectos deben ser interpretados en una doble faz, científica y socioeconómica, dentro del contexto apropiado, considerando las características ecológicas, sociales, geográficas, económicas y culturales de la región de estudio (García 1986; Ciurana 2001).

En regiones agrícolas semiáridas como las cuencas de este estudio, la sequía, referida a desertificación, es un término subjetivo que designa un determinado periodo de años en los que un cultivo se convierte en una actividad poco rentable, e incluso improductiva. Bajo este proceso finalmente los cultivos fallan, o bien, como en el caso de los pastos, su productividad es disminuida significativamente. La sequía es una amenaza constante, un proceso natural que los habitantes rurales en regiones áridas deben enfrentar continuamente (Hillel & Rosenzweig 2002). La ocurrencia de una sequía es eventualmente en realidad una certeza, aunque paradójicamente su duración y severidad revisten una marcada incertidumbre, motivo de estudio por parte de climatólogos y geógrafos, entre otros especialis-

tas. Por su parte, la aridez es una característica persistente del paisaje, que denota insuficiencia hídrica (Matallo & Vasconcelos 2001). Durante una sequía, la degradación del ecosistema en forma de erosión del suelo y en pérdida de vegetación, ocurre a un ritmo acelerado (Hillel & Rosenzweig 2002). Al estudiar el proceso de desertificación, Li *et al.* (2006) observaron que el suelo disminuye su capacidad de retención de agua cuando el estado de degradación es mayor, asociado a una menor cobertura vegetal. La determinación del aporte y contribución de la variabilidad climática a la desertificación es compleja, toda vez que prácticamente es imposible separar los impactos de la sequía y la desertificación, dado que ambos procesos suceden de manera simultánea, frecuentemente la segunda a consecuencia de la primera (Nicholson *et al.* 1998).

Como caso notorio, las perspectivas climáticas en la naturaleza y las causas de la desecación del Sahara (Hulme 2001) son indicativas de la variabilidad del clima mundial, el cual ha sido modificado en las últimas décadas. Casos como el mencionado han motivado a la generación de nuevo conocimiento, incluyendo avances en la observación climática, desarrollo de sensores de alta tecnología y modelación matemática. Los conceptos actuales acerca de la estrecha relación entre el clima y la desertificación se engloban en dos categorías amplias: una que tiene que ver con los mecanismos internos de reacción y la otra cambios de circulación global relacionados a patrones en la temperatura superficial del mar (Herrmann & Hutchinson 2005). Al respecto, Salinas-Zavala *et al.* (1998), quienes estudiaron las condiciones de aridez de la región noroeste de México, utilizaron el índice de cobertura árida anual (ICAA); concluyeron que el ICAA presentó una correlación estadística significativa con la temperatura superficial del mar en el área de la corriente de California, explicando 32 % de su variabilidad. Troyo-Diéguez *et al.* (1990) resaltaron la importancia de la sensibilidad numérica que representa la evaluación de la aridez en regiones donde es baja o nula la precipitación, ilustrada mediante la aplicación del Índice de Budyko.

En este trabajo se expone los resultados de investigación sobre las tendencias de la disponibilidad

hidro-ambiental, estimada mediante un indicador de aridez modificado, en dos cuencas en el estado de Baja California Sur, las cuales representan cerca del 90 % del PIB del sector agropecuario estatal. Dicho indicador se construyó mediante la calibración y aplicación de un modelo hidro-climático resultante de una modificación realizada a la ecuación del Índice de Aridez de De Martonne, con la finalidad de adecuarlo al estudio del balance del agua en zonas áridas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El presente trabajo se realizó en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, ubicado 17 Km al oeste de la Cd. de La Paz, Baja California Sur, utilizando la serie de datos climáticos de 1978 a 2008, de las estaciones ubicadas en las cuencas de La Paz y Comondú, Baja California Sur (CONAGUA 2008). La localización geográfica de las estaciones se señala en la Tabla 1. El clima de la región varía de semiárido a árido, con vegetación de tipo sarcocaulé, matorral espinoso y algunas gramíneas. Los suelos son de textura franco-arenosa, en ambas cuencas. La agricultura en la región es de riego, con cultivos anuales (hortalizas y granos) y perennes (alfalfa y cítricos).

La hidrología de las cuencas de La Paz y Comondú se caracterizan por un marcado déficit hídrico; para un periodo anual la diferencia de la precipitación menos la evaporación se estima en un déficit de 2 203.5 mm y 1 801.2 mm, respectivamente, lo cual es un indicativo de la fragilidad de la condición hidrológica. Tal deficiencia obliga a la extracción de agua subterránea para la satisfacción de las necesidades de las diferentes actividades productivas (Mercado-Mancera 2006).

Análisis numérico y modelación

Para la estimación de la condición hídrica a partir del coeficiente de aridez, se aplicó el Índice de De Martonne (Ecuación 1) (Wang & Takahashi 1999):

Tabla 1. Coordenadas geográficas de estaciones climáticas en La Paz y Comondú, B.C.S.
Table 1. Geographical coordinates of weather stations in La Paz and Comondú, B.C.S.

Cuenca	Nombre de la Estación	Latitud	Longitud	Altura
LA PAZ	ALFREDO V. BONFIL.	24° 09'	110° 33'	78 msnm
LA PAZ	LA PAZ.	24° 08'	110° 20'	8 msnm
LA PAZ	OBSERVATORIO LA PAZ.	24° 07'	110° 19'	19 msnm
COMONDÚ	Cd. CONSTITUCIÓN.	25° 00'	111° 40'	45 msnm
COMONDÚ	Cd. INSURGENTES.	26° 05'	111° 55'	52 msnm
COMONDÚ	LEY FEDERAL DE AGUAS #5.	25° 12'	111° 33'	45 msnm
COMONDÚ	VILLA MORELOS.	24° 56'	111° 37'	56 msnm

$$A = \frac{12 pp}{t + 10} \quad (1)$$

Donde: A es el Índice de Aridez original de De Martonne, pp es la precipitación mensual en mm y t es la temperatura media mensual en °C.

A manera comparativa, la aridez de las cuencas estudiadas fue clasificada mediante la aplicación del modelo original de De Martonne; la tendencia mensual de A estimada para las cuencas en estudio se observa en la Figura 1.

Con la finalidad de alcanzar una mayor resolución del índice mencionado, se realizó un análisis numérico del mismo para detectar e incrementar su sensibilidad a un gradiente de valores de precipitación y temperatura. Como se observa en la Figura 1, la tendencia del Índice de aridez es numéricamente imperceptible para el período seco, tendencia caracterizada por valores muy bajos, toda vez que su resolución se enfoca numéricamente a la época húmeda.

Con el propósito de encontrar un ajuste apropiado a la ecuación de De Martonne, mediante el método de los mínimos cuadrados se eligió un modelo numérico alternativo que estuviese altamente correlacionado con el déficit hídrico y que a la vez fuese sensible a valores bajos de precipitación. El modelo elegido fue una función polinomial donde X_1 es la temperatura media mensual en °C, en tanto que X_2 es la precipitación mensual en mm, para la misma cuenca o zona de estudio, de tal forma que se satisfaga $A_{\text{mod}} = f(t, pp)$. El planteamiento surge ante la necesidad de contar con un índice que muestre un valor con mayor sensibilidad para la interpretación, cuya escala esté limitada de 0 a 10 unidades y sea aplicable a condiciones de precipita-

ción menor a 100 mm mensuales, característico de las zonas áridas. Dicho índice fue definido mediante la función (Ecuación 2):

$$IDHA = Ke \frac{12pp}{t + 10} \quad (2)$$

Donde: $IDHA$ es el Índice de Disponibilidad Hidroambiental, pp es la precipitación mensual en mm, t es la temperatura media mensual en °C y Ke es un coeficiente adimensional de ajuste de escala, con valor de 0.33.

A su vez, para complementar la condición hídrica se definió la siguiente relación (Ecuación 3):

$$IDDH = 10 - IDHA \quad (3)$$

Donde: $IDDH$ es el Índice de Déficit Hidroambiental.

El factor de ajuste Ke en la Ecuación 2 propuesto para modificar el Índice de De Martonne, fue establecido con valor de 0.33, dado que bajo las condiciones de aridez de la zona estudio, ajusta con mayor sensibilidad numérica a la variación de los periodos de sequía. Dichos cálculos se realizaron para cada estación climática analizada de manera individual y posteriormente en conjunto para cada cuenca. Para establecer la intensidad de asociación o efecto de la precipitación sobre la tendencia numérica del comportamiento del $IDHA$, se realizó un análisis de regresión lineal simple considerando a la precipitación como variable independiente y a $IDHA$ como variable dependiente, mediante el programa estadístico STATGRAPHICS 5.01 (Anónimo 2000). El estadístico Durbin-Watson (DW) se calculó para examinar los residuos con la finalidad de determinar si hay alguna correlación significativa ba-

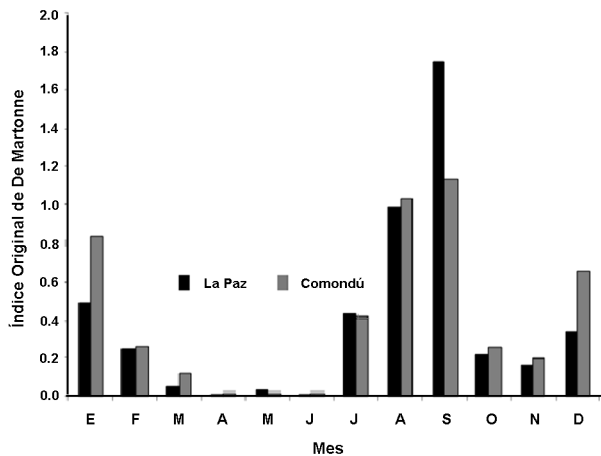


Figura 1. Promedios mensuales del índice de aridez original de De Martonne ($A=12pp/(t+10)$), para las cuencas de La Paz y Comondú, B.C.S.

Figure 1. Monthly averages of the original De Martonne aridity index ($A=12pp/(t+10)$) for the watersheds of La Paz and Comondú, B.C.S.

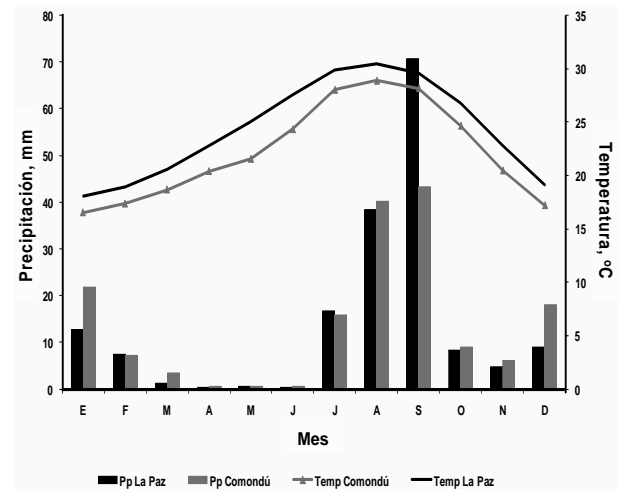


Figura 2. Tendencias de la precipitación y temperatura media en la cuenca de La Paz y Comondú, B.C.S. Pp= precipitación (mm); Temp= temperatura (°C).

Figure 2. Trends of rainfall and average temperature in the watershed of La Paz and Comondú, B.C.S. Pp= rainfall (mm); Temp= temperature (°C).

sada en el orden en el que se introdujeron los datos en el programa estadístico.

RESULTADOS

Análisis de tendencias hidroclimáticas

A partir de los resultados obtenidos, se observa que la cuenca de La Paz presenta temperatura y precipitación mayores que la cuenca de Comondú (Figura 2), con valores de precipitación de 170.2 y 166.2 mm anuales y temperaturas de 24.3 y 22.0 °C promedio anual, respectivamente.

La disponibilidad hidro-ambiental (*IDHA*) en las estaciones analizadas fue baja ($IDHA_{prom} = 1,6, n = 84$) con respecto al valor máximo posible ($IDHA = 10$), el cual representaría un estado de humedad óptima. La mayoría de los meses presentaron un déficit hidro-ambiental (*IDDH*) lo que motiva a diseñar estrategias para eficientizar el uso del agua extraída de los acuíferos de las regiones de estudio. Para el caso de la cuenca de La Paz (Figura 3), se observó un *IDHA* mayor que el *IDDH* en el mes de septiembre en las estaciones Observatorio La Paz ($IDHA = 10, IDDH = 0$) y Est. Climática La Paz ($IDHA = 6,25, IDDH = 3,75$).

Para los restantes 11 meses el *IDDH* fue cercano al valor máximo esperado ($IDDH = 10$), lo que evidencia la nula disponibilidad de humedad para la vegetación, incluyendo la de tipo sarcocaula que predomina en la región. La estación Alfredo V. Bonfil se encuentra a 30 km al norte de la ciudad de La Paz, en una zona más seca; debido a su cercanía a la sierra del Mechudo, muestra efectos derivados de sombra pluviométrica, disminuyendo en consecuencia la precipitación en la zona. Es importante señalar que la disminución de la precipitación hacia el norte de la península es una condición que se asocia a una mayor aridez en la península.

Por otra parte, la cuenca de Comondú (Figura 4) presentó valores de *IDHA* alrededor de 5% menor que la cuenca de La Paz, con valores numéricos de *IDHA* menores que el *IDDH* en todo el año. Para establecer la influencia de la precipitación sobre el comportamiento del *IDHA*, se realizó un análisis de regresión lineal simple considerando a la precipitación como variable independiente y al *IDHA* como variable dependiente, cuyos estadísticos se muestran en la Tabla 2, en tanto que el análisis de varianza correspondiente se detalla en la Tabla 3.

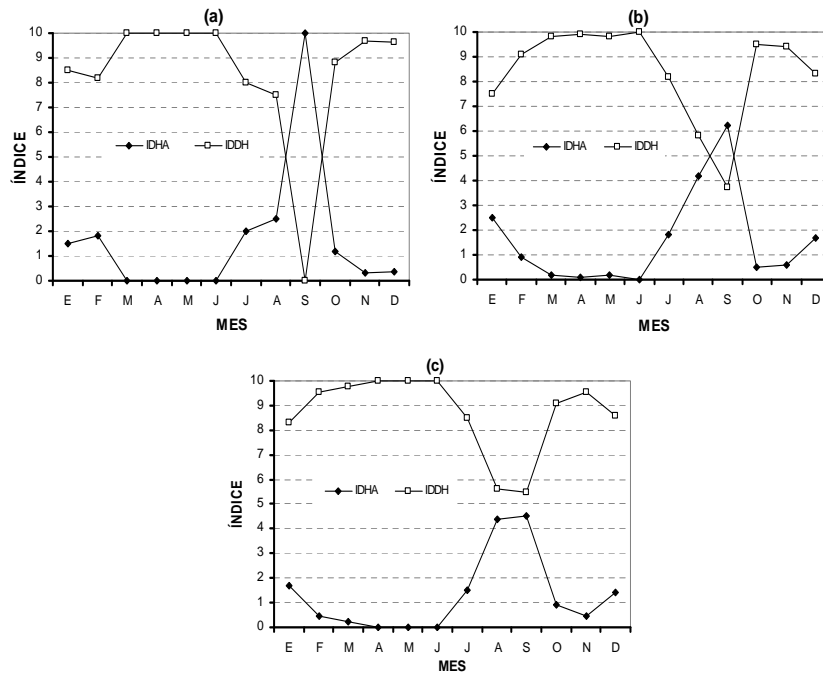


Figura 3. Promedios mensuales de IDHA e IDDH, para las estaciones de la cuenca de La Paz, B.C.S. a: Estación Observatorio La Paz. b: Estación climática La Paz. c: Estación climática Alfredo V. Bonfil.
Figure 3. Monthly averages of HEAI and HEDI for the stations in the watershed of La Paz, B.C.S. a: La Paz Observatory station. b: La Paz weather station. c: Alfredo V. Bonfil weather station.

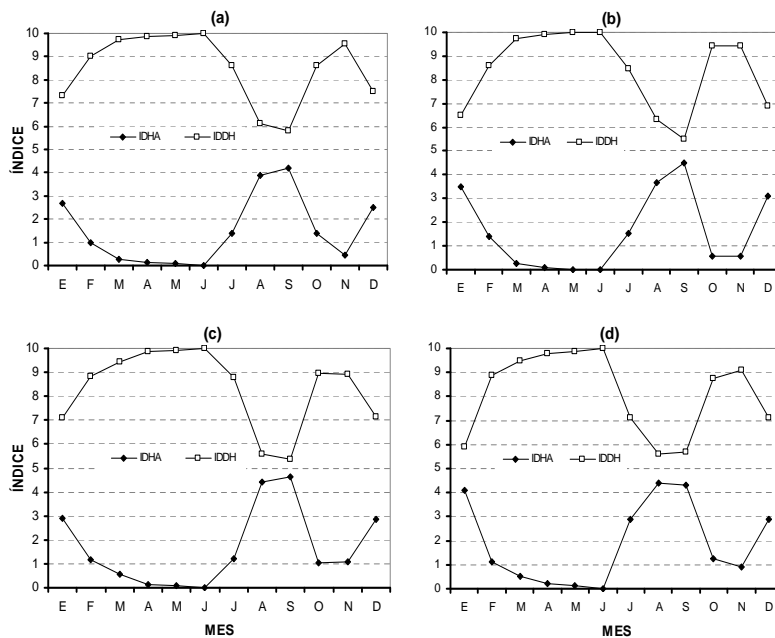


Figura 4. Promedios mensuales de IDHA e IDDH, para las estaciones de la cuenca de Comondú, B.C.S. a: Estación climática Cd. Constitución. b: Estación climática Cd. Insurgentes. c: Estación climática Villa Morelos. d: Estación climática Ley Federal de Aguas #5.
Figure 4. Monthly averages of HEAI and HEDI for the stations in the watershed of Comondú, B.C.S. a: Cd. Constitución weather station. b: Cd. Insurgentes weather station. c: Villa Morelos weather station. d: Ley Federal de Aguas #5 weather station.

Tabla 2. Análisis de Regresión - Modelo Lineal $Y = a + b * X$. La Paz-Comondú, B.C.S.
Table 2. Regression analysis - Lineal model $Y = a + b * X$. La Paz-Comondú, B.C.S.

Coeficientes Parámetro	Cuadrados Mínimos (Estimado)	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
Ordenada	0.176012	0.0587882	2994	0.0036
Pendiente	0.101391	0.00261374	38.7913	0

Nota: Variable dependiente: IDHA; Variable independiente: Precipitación.

Tabla 3. ANOVA para la relación numérica precipitación-IDHA. La Paz-Comondú, B.C.S.
Table 3. ANOVA for the rainfall-HEAI numerical relationship. La Paz-Comondú, B.C.S.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Coefficiente F	P-Valor
Modelo	267.653	1	267.6530	1504.77	0
Residuo	14.58530	82	0.1778700		
Total	282.238	83			

Coefficiente de Correlación = 0.973819 $R^2 = 94.8323\%$ R^2 (ajustado para gl) = 94.7692 %
Error estándar de estadístico = 0.421746 Error absoluto medio = 0.340855 Estadístico de
Durbin-Watson = 1.05588 (P=0.0000) Autocorrelación residual en Lag 1 = 0.434939

Ajuste lineal

Los resultados obtenidos confirman el ajuste significativo estimado por el modelo lineal, que describe la relación numérica entre el *IDHA* y la precipitación. La ecuación del modelo ajustado obtenida fue (Ecuación 4):

$$IDHA = 0,176012 + 0,101391 * Pp \quad (4)$$

Donde:

IDHA es el Índice de Disponibilidad Hidro-ambiental (adimensional) y *Pp* es la precipitación en mm.

Dado que el p-valor en el análisis de varianza (Tabla 3) fue menor a 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre *IDHA* y la precipitación para un nivel de confianza del 95.0%. El estadístico R^2 indicó que el modelo ajustado explica 94.83% de la variabilidad observada para *IDHA*. Por su parte, *r* (coeficiente de correlación) fue igual a 0.974, indicando una relación suficientemente alta entre ambas variables. Entre los estadísticos calculados, el error estándar de la estimación indica que la desviación estándar de los residuos fue 0.422, en tanto que el error absoluto medio de los residuos (MAE) fue 0.33; se acepta un intervalo de confianza de 95% para la correlación estimada, toda vez que el valor-p fue menor de 0.05. En la Figura 5 se

presenta el modelo de regresión lineal ajustado con las variables precipitación (*x*) y el índice *IDHA* (*y*). La Figura 6 muestra el balance entre el *IDHA* y el *IDDH* para la cuenca de La Paz, obtenidos a partir de las ecuaciones 3 y 4; se observa un ajuste satisfactorio del modelo propuesto, lo cual permite sugerir su empleo para otras localidades con condiciones similares con la finalidad de obtener el balance hidro-ambiental correspondiente. A su vez, para la cuenca de Comondú (Figura 7) se obtuvo una tendencia de ajuste similar a la obtenida en el análisis de la cuenca La Paz, lo cual corrobora la capacidad de resolución del modelo para adoptar el índice hidro-ambiental como índice de aridez. En la Tabla 4, se presentan los resultados promedio anual de los índices *IDHA* é *IDDH* para cada estación analizada, de las cuencas de La Paz y Comondú.

Al aplicar el índice original de De Martonne, en la Figura 8 se observa que sólo dos estaciones presentaron un índice de aridez menor de 5, Alfredo V. Bonfil y Villa Morelos, en la cuenca de La Paz y Comondú, respectivamente, por lo que se consideran como localidades hiper-áridas, lo que indica la severa limitación hidro-climática que las caracteriza restringiendo el desarrollo de actividades agrícolas y pecuarias sostenibles. Al aplicar dicho índice como estimador regional en la zona de estudio, se calculó un índice de aridez de 5.08.

Tabla 4. Índices de Disponibilidad y de Déficit Hidro-Ambiental, sin ajuste y ajustado mediante el modelo propuesto, considerando el promedio anual por estación climática.

Table 4. Hydro-Environmental Availability (HEAI) and Deficit Indices (HEDI), with and without adjustment, using the proposed model and considering the annual average per climatic station.

Estación	IDHA sin ajuste	IDHA ajustado	IDDH sin ajuste	IDDH ajustado
Observatorio La Paz (LAP*)	1.59	1.7	8.41	8.3
La Paz (LAP)	1.66	1.72	8.34	8.28
Alfredo V. Bonfil (LAP)	1.31	1.39	8.69	8.61
Medias: Municipio de La Paz		1.6		8.4
Cd. Constitución (COM*)	1.61	1.57	8.39	8.43
Cd. Insurgentes (COM)	1.66	1.57	8.34	8.43
Villa Morelos (COM)	1.51	1.47	8.49	8.53
Ley Federal de Aguas #5 (COM)	1.77	1.7	8.23	8.3
Medias: Municipio de Comondú		1.52		8.42

* LAP y COM: Cuencas ubicadas en los municipios de La Paz y Comondú, respectivamente.

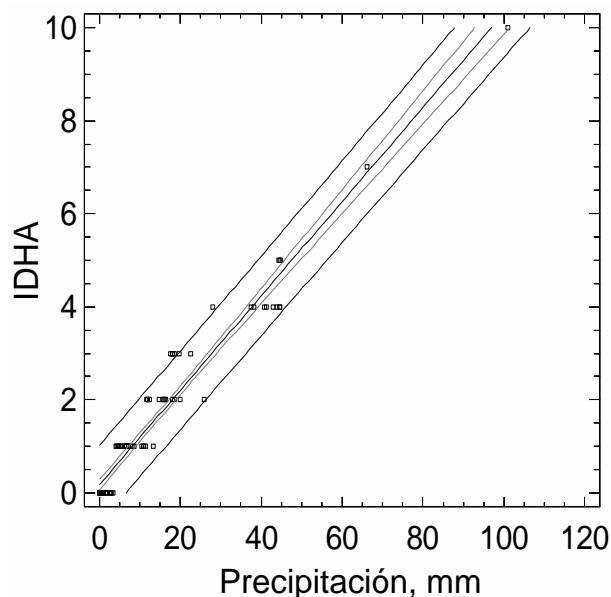


Figura 5. Modelo ajustado para la relación precipitación-IDHA, para La Paz y Comondú, B.C.S. $IDHA = 0,176012 + 0,101391 * Precipitación$.

Figure 5. Adjusted model for the rainfall-HEAI relationship, for La Paz and Comondú, B.C.S. $IDHA = 0,176012 + 0,101391 * Rainfall$.

DISCUSIÓN

Las tendencias de las variables precipitación y temperatura denotaron déficit hídrico y clima cálido, en ambas cuencas, aunque la precipitación presentó diferencias cuantitativas, principalmente en la lluvia

invernal. Mientras que en la cuenca La Paz el porcentaje de lluvia invernal es de 20.6 %, en Comondú es de 33.9 %. Sin embargo, ambas cuencas presentan su mayor porcentaje de lluvia anual en la época de verano, principalmente en los meses de agosto y septiembre, temporada de mayor frecuencia de tormentas tropicales en la región (Díaz *et al.* 2008). Con respecto al *IDHA* como estimador de disponibilidad hídrica, la cuenca de Comondú mostró un valor promedio de 1.6, en tanto que el valor del *IDDH* fue de 8.4 durante la mayor parte del año, lo que muestra el efecto de la mayor aridez que se expresa hacia el norte del estado de Baja California Sur. Lo anterior debe motivar a un mayor énfasis al manejo del recurso hídrico en condiciones áridas e hiperáridas; como señala Cardona *et al.* (2004), las condiciones de aridez y el manejo intensivo de la agricultura promueven la salinización del suelo y de los acuíferos en las zonas costeras del noroeste de México, como sucede en la cuenca de Sto. Domingo, en el Municipio de Comondú, Baja California Sur.

El índice de disponibilidad hidroambiental obtenido posibilita el uso de un indicador que se basa solo en temperatura y precipitación, variables que son comúnmente registradas en las estaciones climatológicas. No obstante, según Houston & Hartley (2003), las condiciones extremas de aridez conocidas como hiper-aridez, no se deben únicamente a la falta de precipitación (Pp); entre otros factores, también están relacionadas a la evapotranspiración

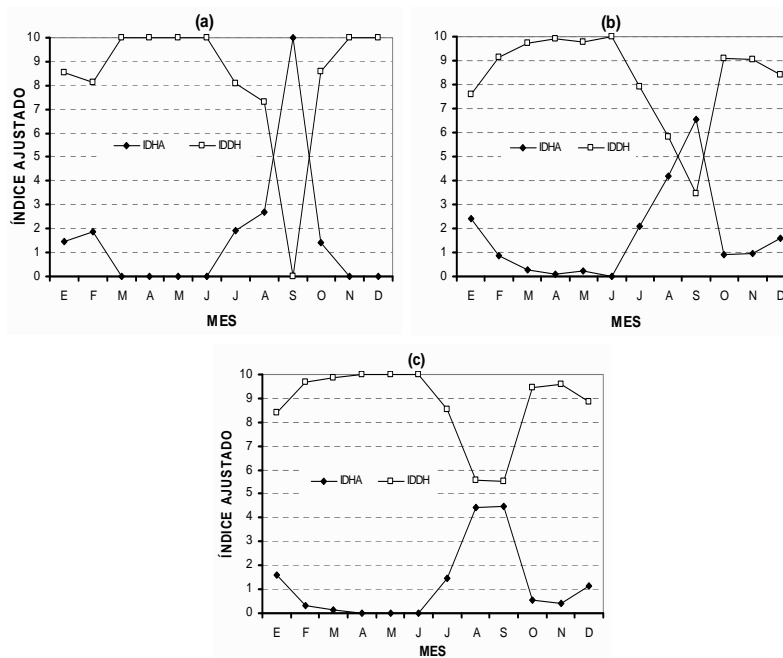


Figura 6. Promedio mensual de IDHA e IDDH ajustados, para las estaciones de la cuenca de La Paz, B.C.S. a: Estación Observatorio La Paz. b: Estación climática La Paz. c: Estación climática Alfredo V. Bonfil.

Figure 6. Monthly average for the adjusted HEAI and HEDI, for the stations in the watershed of La Paz, B.C.S. a: La Paz Observatory station. b: La Paz weather station. c: Alfredo V. Bonfil weather station.

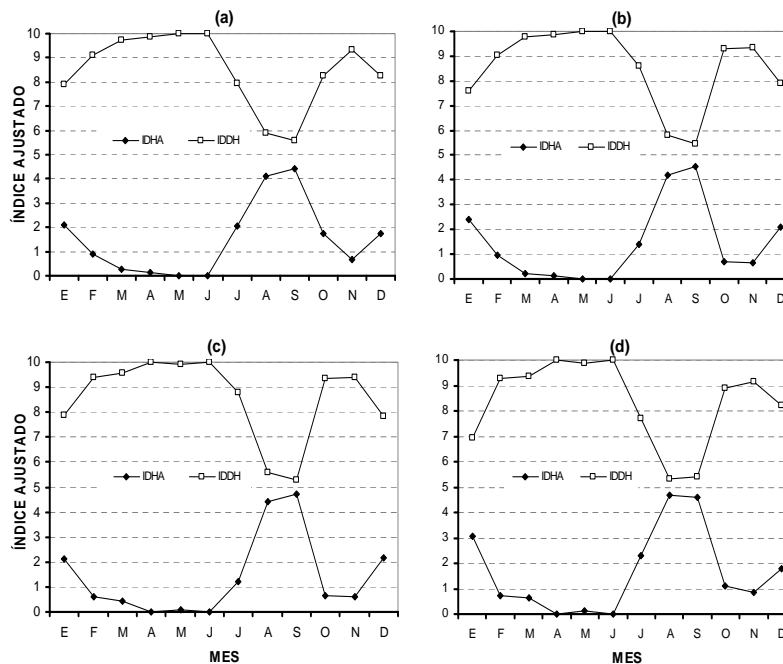


Figura 7. Promedio mensual de IDHA e IDDH ajustados, para las estaciones de la cuenca de Comondú, B.C.S. a: Estación climática Cd. Constitución. b: Estación climática Cd. Insurgentes. c: Estación climática Villa Morelos. d: Estación climática Ley Federal de Aguas #5.

Figure 7. Monthly average for the adjusted HEAI and HEDI, for the stations in the Comondú B.C.S. watershed. a: Cd. Constitución weather station. b: Cd. Insurgentes weather station. c: Villa Morelos weather station. d: Ley Federal de Aguas #5 weather station.

potencial (PET: tasa máxima de evapotranspiración en condiciones no deficitarias de humedad en el suelo) mediante la expresión Pp/PET , la cual genera otros modelos de naturaleza empírica, por lo que su desempeño varía entre localidades (Xu & Singh 2002), dificultándose su aplicación en zonas con escasa información hidroclimática, como sucede en las zonas de producción agropecuaria en Baja California Sur.

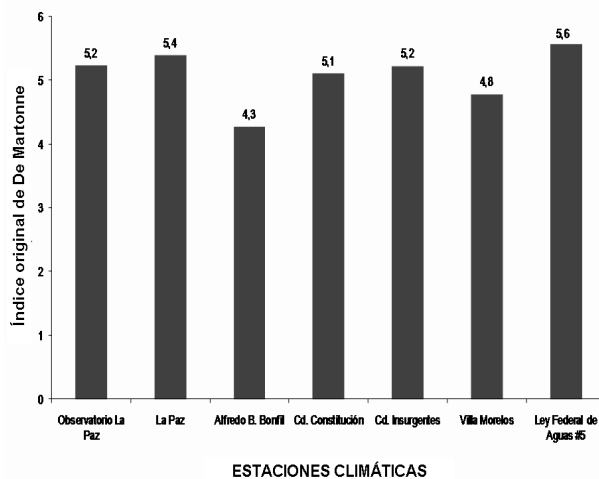


Figura 8. Valores del índice de aridez de acuerdo al índice original de De Martonne. La Paz-Comondú, B.C.S.

Figure 8. Values of the aridity index according to the original De Martonne Index. La Paz-Comondú, B.C.S.

Dentro de los modelos climáticos disponibles, destacan aquellos que requieren de variables cuya información sea accesible; en este contexto, Gay *et al.* (2006) encontraron que la temperatura es el factor climático más relevante para la producción de café, dado que responde de manera significativa a las tendencias estacionales de dicho factor. Además de la indisponibilidad de la información (Trezza 2008), algunos métodos requieren equipo especializado, altamente sofisticado y costoso, lo cual limita su aplicación al estudio de la variabilidad hidroclimática (Masoner *et al.* 2008).

El ajuste numéricamente significativo obtenido para el modelo propuesto *IDHA*, permite aplicarlo en aquellas regiones con condiciones climáticas semejantes a las de este estudio, requiriendo

únicamente de datos de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y precipitación (mm). Dichos modelos, *IDHA* e *IDDH*, aplicados al estudio del balance del agua detectaron un período húmedo, claramente definido para los meses de agosto y septiembre en la cuenca de La Paz. Se observó que el Índice de De Martonne original clasifica de manera general la aridez de las cuencas en estudio, sin diferenciar las variaciones dentro del período seco. Mediante la modificación propuesta y proponiendo una escala de 0 a 10 con fines comparativos, se obtuvo una descripción más indicativa de la aridez, al contrastar su resolución con la tendencia del déficit hídrico (Figuras 6 y 7). Según la clasificación de aridez de UNEP (Anónimo 1992) que define el índice de aridez como la relación Pp/PET , las zonas hiperáridas son aquellas donde $Pp/PET < 0,05$, en tanto que en las zonas húmedas $Pp/PET > 0,65$. Por su parte, el sistema de clasificación de la UNESCO (Anónimo 1979) establece que en las zonas hiperáridas $Pp/PET < 0,03$ y en las húmedas $Pp/PET > 0,75$. Ambos sistemas consideran las zonas intermedias entre dichas condiciones extremas, incluyendo las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas. Dicho indicador, cualquiera que sea su escala de interpretación, presenta la dificultad de uso en condiciones de aridez o sequía extrema; esto es, cuando $Pp = 0$, el estimador invariablemente produce un resultado nulo con escaso margen de interpretación, $Pp/PET = 0$, independientemente de las variaciones de la evapotranspiración. Por lo anterior, el uso de variables relacionadas con el déficit hídrico resulta más conveniente que el manejo de datos de evapotranspiración, que frecuentemente requieren de información adicional. En este sentido, en el marco del estudio de la variabilidad climática, el cálculo y uso de índices de aridez y del déficit hidro-ambiental, permitirá ampliar las herramientas en la lucha contra la sequía y desertificación (Herrmann & Hutchinson 2005), puesto que la disminución del recurso hídrico y el cambio de uso del suelo, principalmente en zonas áridas y semiáridas, generan perturbación en la vegetación y en la supervivencia de los diferentes organismos que se interrelacionan en los hábitats predominantes, incluyendo las especies de fauna silvestre (Fredrickson *et al.* 1998; Hillel & Rosenzweig 2002). Los

procesos de producción primaria, sean agropecuarios o forestales, están determinados por las condiciones climáticas, que aunadas a otros factores, determinan la sostenibilidad de los procesos (Herrmann & Hutchinson 2005). Es claro que las interacciones de los seres humanos con los recursos agua y suelo que han alcanzado niveles de sobreexplotación, han causado desertificación en áreas extensas (Sharma 1998). En este contexto, las cuencas de La Paz y de Comondú han sufrido el deterioro causado por sobreexplotación de los recursos naturales, incluyendo el agua y el cambio del uso del suelo. Por tal motivo, debe existir una planeación más efectiva en los sistemas de producción agropecuarios y forestales, así como en el uso y manejo del recurso hídrico, para disminuir el riesgo de degradación del ambiente (Herrmann & Hutchinson 2005; UN 1997; Chapela 2003).

De acuerdo con el modelo original de De Martonne, la cuenca La Paz, B.C.S. mostró un índice de aridez promedio de 4.96, en tanto que para el Observatorio La Paz, estación climática La Paz y Alfredo V. Bonfil, el índice fue de 5.22, 5.38 y 4.27, respectivamente. Para la cuenca de Comondú, el promedio fue de 5.16, mientras que para las estaciones de Cd. Constitución, Cd. Insurgentes, Villa Morelos y Ley Federal de Aguas #5 fue de 5.10, 5.22, 4.78 y 5.56, respectivamente. Según las tendencias analizadas, la ecuación del modelo ajustado para la determinación del índice de disponibilidad hidro-ambiental (Ecuación 4) evidencia una relación estrecha entre las variables precipitación e *IDHA*. Los resultados obtenidos corroboran la urgente necesidad de mejorar e incrementar las acciones tendientes a disminuir la sobreexplotación del recurso hídrico, que en estas cuencas se ha realizado en las últimas décadas, para satisfacer tanto las actividades agropecuarias como las necesidades asociadas a la demanda para el consumo humano (CONAGUA 2009). Lo anterior debe enfatizarse en zonas con climas árido y semiárido, donde los recursos hídricos son limitados y amenazados severamente por la sobreexplotación, por lo cual es esencial estimar los coeficientes de demanda de agua e indicadores con la mayor precisión posible (López-Urrea *et al.* 2006). Las cuencas de La Paz Comondú deben ser consideradas áreas prioritarias para la conservación y manejo sostenible del recurso

hídrico, al igual que otras cuencas del estado, debido a la escasa precipitación y alta evapotranspiración que se asocian a la aridez y semiaridez del estado.

Se concluye que la escasez de agua, en términos de aridez, refleja un marcado déficit hidrológico para once meses del año en la cuenca de La Paz, mientras que para la cuenca de Comondú el déficit hidro-ambiental prevalece todo el año. La modificación al Índice de De Martonne fue numéricamente funcional, con alto potencial de aplicación en estudios hidrológicos de zonas áridas y semiáridas, tendientes a entender los procesos hidrológicos relacionados y a participar eficazmente en la lucha contra la sequía y la desertificación ambiental.

Para el estudio de la escasez de agua y sus efectos consecuentes expresados en la aridez de una cuenca o región y eventualmente en el proceso de la desertificación, existe una gama de modelos disponibles basados en variables climáticas, edáficas, ambientales o en la interacción de algunos de ellos; además de lo anterior, algún tipo de estacionalidad extrema como las sequías o inundaciones puede ocurrir en diversas partes del mundo, tanto en los recursos hídricos como en su uso (Hanasaki *et al.* 2007). En su caso, Los indicadores climáticos que permiten determinar procesos de aridez y/o desertificación comúnmente se fundamentan en los volúmenes de precipitación y los regímenes de temperatura, así como en otros índices basados en precipitación, evaporación del agua en el suelo y la transpiración del agua por las plantas. Un índice climático propuesto por la Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación CLD (Vargas-Cuervo & Gómez 2003) y derivado de la clasificación de aridez de UNEP (Anónimo 1992), mencionada anteriormente, es representado por la relación precipitación/evapotranspiración (Ecuación 5):

$$ICD = P/ETP > 0,65 \quad (5)$$

Donde: *ICD* es el índice climático de desertificación, *P* es la precipitación en mm, *ETP* es la evapotranspiración en mm.

Sin embargo, el *ICD* de manera similar a la tendencia y resolución numérica del índice de aridez de De Martonne (Wang & Takahashi 1999),

muestra ser un indicador de humedad y no de desertificación, toda vez que su valor es directamente proporcional a la precipitación. Por lo anterior, su aplicación resulta en la obtención de valores de *ICD* que se incrementan de manera correlacionada a los aumentos en la precipitación, lo cual puede eventualmente generar interpretaciones ambiguas o sesgadas. Tal es el caso del valor crítico para *ICD* de 0.65, a partir del cual se debe interpretar que valores menores a dicha magnitud son indicadores de desertificación, lo cual no necesariamente se asocia a la respuesta numérica del modelo; lo anterior podría ocurrirle a un usuario no especializado, el cual podría interpretar dicha magnitud como un "nivel" o "intensidad" baja de desertificación.

Ningún esfuerzo por disminuir el proceso de desertificación del ambiente será en vano, toda vez que la formulación de nuevos métodos y modelos cuantitativos coadyuva a solventar la necesidad de armonizar la toma de decisiones con el perfil climático y geo-ambiental de cada región y sitio en particular, dentro de las acciones sustanciales de la sociedad. El estudio sobre la naturaleza de la desertificación no necesariamente implica que deba existir o no consenso acerca de los métodos para determinar el estatus de la desertificación; más bien debe centrarse en sus causas y consecuencias, si es irreversible o no y en la importancia de los aspectos socioeconómicos, entre otros (Verón *et al.* 2006).

Cabe resaltar que las acciones a llevar a cabo para actuar sobre los efectos más evidentes del problema, no son suficientes para prevenir las consecuencias devastadoras de las sequías y desertificación. Dentro de las contingencias y riesgos ambientales que revisten la mayor relevancia en la ac-

tualidad, el cambio climático es sin duda uno de los problemas principales que enfrenta el planeta. Así lo han confirmado los líderes mundiales en la Cumbre de Kyoto (Vargas-Cuervo & Gómez 2003), el cual es el resultado de una compleja interacción de fenómenos de la atmósfera, la litosfera, la hidrosfera y los cuerpos de hielo o glaciares como producto de fuerzas y agentes al interior del planeta y sobre su exterior, lo cual demanda el desarrollo y calibración de modelos meteorológicos e hidroclimáticos con mayor precisión y sensibilidad numérica.

La modificación del índice original de De Martonne a un Índice de Disponibilidad Hidro-ambiental (*IDHA*) muestra una tendencia numérica mejor asociada y correlacionada a los incrementos de la humedad ambiental generada por la precipitación, en tanto que el indicador complementario propuesto como el Índice de Déficit Hidro-ambiental (*IDDH*), muestra suficiente sensibilidad para reflejar con elevada correlación numérica las condiciones de aridez o desertificación que se cuantifican o evalúan en este tipo de estudios o investigaciones.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C., a la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM, al fondo sectorial CONACYT-SEP (Proyectos SEP-CONACYT Inv. Básica 2007 80431 y 82313 "Adecuación metodológica para la determinación de la huella hídrica y del grado de desertificación en cuencas de zonas áridas") y a la Comisión Nacional del Agua, Gerencia Local en Baja California Sur, el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

LITERATURA CITADA

- Abraham E, Montaña E, Torres L (2006) Desertificación e indicadores: posibilidades de medición integrada de fenómenos complejos. En: Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales. Vol. X, núm. 214, 01-06-2006. Univ. de Barcelona. ISSN: 1138-9788.
- Anónimo (1979) Map of the world distribution of arid regions. Man and Biosphere (MAB). Technical Notes 7. UNESCO. Paris, Francia. 1 Mapa-Memoria de Cálculos, Escala 1: 25 000 000. 54 pp.
- Anónimo (1992) World Atlas of Desertification. UNEP. Edward Arnold, Sevenoaks, UK. 69 pp.
- Anónimo (1994) Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación en Países con Sequía Seria o Desertificación, particularmente en África. UN. París, Francia. 24 pp.

- Anónimo (1997) Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación, III Reunión Regional para América Latina y el Caribe. UN - Programa Regional de Acción. Armonización de Políticas Públicas. Mecanoscrito. La Habana, Cuba. 23 pp.
- Anónimo (2000) Statgraphics 5.0. Stat. Graph. Syst., Plus-Ware. Product Help Line. Statgraphics Software Manual. STSC, Inc. Software Publishing Group, Manugistics, Inc. Rockville, Maryland, USA.
- Cardona A, Carrillo-Rivera JJ, Huizar-Alvarez, Graniel-Castro E (2004) Salinization in costal aquifers of arid zones: an example from San Domingo, Ba California Sur, México. *Environmental Geology* 45: 350-366.
- Chapela G (2003) Lucha contra la desertificación y lucha contra el calentamiento global. En <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/437/chapela.html>. Fecha de consulta: octubre de 2009.
- Ciurana ER (2001) Complejidad: Elementos para una definición. Instituto Internacional para el Pensamiento Complejo y Asociación para la pensée complexe. UNESCO. Paris, Francia. 25 pp.
- CONAGUA (2008) Base de datos de las estaciones climáticas del estado de Baja California Sur. Dirección Estatal de la Comisión Nacional del Agua. La Paz, BCS. Archivos digitales. Méx.
- CONAGUA (2009) Estudio para la Recuperación del Acuífero del Valle de Santo Domingo. Dirección Estatal de la Comisión Nacional del Agua. La Paz, BCS. México.
- Díaz SC, Salinas-Zavala CA, Hernández-Vázquez S (2008) Variability of rainfall from tropical cyclones in northwestern México and its relation to SOI and PDO. *Atmósfera* 21(2): 213-223.
- Fredrickson EL, Havstad KM, Rick E, Hyder P (1998) Perspectives on desertification: south-western United States. *Journal of Arid Environments* 39: 191-207.
- García R (1986) Conceptos Básicos para el Estudio de Sistemas Complejos. In Leff, E. (coord.), *Los problemas del conocimiento y la perspectiva ambiental del desarrollo*. Edit. México Siglo XXI. México. 243 pp.
- Gay C, Estrada F, Conde C, Eakin H, Villers L (2006) Potencial impacts of climate change on agriculture: a case of study of coffee production in Veracruz, México. *Climatic Change* 79: 259-288.
- Hanasaki N, Kanae S, Oki T, Shirakawa N (2007) An integrated model for the assessment of global water resources - Part 2: Anthropogenic activities modules and assessments. *Hydrology and Earth Systems Sciences Discuss.* 4: 3583-3626
- Herrmann SM, Hutchinson CF (2005) The changing contexts of the desertification debate. *Journal of Arid Environments* 63: 538-555.
- Hillel D, Rosenzweig C (2002) Desertification in relation to climate variability and change. *Advances in Agronomy* 77: 1-44.
- Houston J, Hartley AJ (2003) The central andean west-slope rainshadow and its potencial contribution to the origino f hyper-aridity in the Atacama Desert. *International Journal of Climatology* 23: 1453-1464.
- Hulme M (2001) Climatic perspectives on Sahelian desiccation: 1973-1998. *Global Environmental Change* 11: 19-29.
- Li XR, Jia XH, Dong GR (2006) Influence of desertification on vegetation pattern variations in the cold semi-arid grasslands of Qinghai-Tibet Plateau, North-west China. *Journal of Arid Environments* 64: 505-522.
- López-Urrea R, Santa-Olalla FM, Fabeiro C, Moratalla A (2006) An evaluation of two hourly reference evapotranspiration equations for semiarid conditions. *Agricultural Water Management* 86: 277-282.
- Masoner JR, Stannard DI, Christenson SC (2208) Differences in evaporation between a floating pan and Class A Pan on land. *Journal of the American Water Resources Association* 44(3): 552-561.

- Matallo H, Vasconcelos R (2001) Estimación de pérdidas económicas provocadas por procesos de desertificación en la región del Semiárido del Nordeste. Desertificación. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura 'UNESCO'. Brasilia, Brasil. 26 pp.
- Mercado-Mancera G (2006) Evapotranspiración y déficit hídrico en un agostadero representativo de matorral sarcocaula en La Paz, Baja California Sur. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. La Paz, B.C.S. México. 85 pp.
- Nicholson SE, Tucker CJ, Ba MB (1998) Desertification, drought, and surface vegetation: an example from the West African Sahel. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79: 815-829.
- Salinas-Zavala CA, Lluch-Cota SE, Hernández-Vázquez S, Lluch-Cota DB (1998) La aridez en el noroeste de México. Un análisis de su variabilidad espacial y temporal. *Atmósfera* 2(1): 29-44.
- Sharma KD (1998) The hydrological indicators of desertification. *Journal of Arid Environments* 39(2): 121-132.
- SEMARNAT (2006) Plan Estatal de Educación, Capacitación y Comunicación Ambiental para el Desarrollo Sustentable de Baja California Sur. México. Delegación Federal de la SEMARNAT en Baja California Sur. La Paz, México. 170 pp.
- Trezza R (2008) Estimación de evapotranspiración de referencia a nivel mensual en Venezuela. ¿Cuál método utilizar?. *Biagro* 20(2): 89-95.
- Troyo-Diéguez E, De Lachica-Bonilla F, Fernández-Zayas JL (1990) A simple aridity equation for agricultural purposes in marginal zones. *Journal of Arid Environments* 19: 353-362.
- Vargas-Cuervo G, Gómez CE (2003) La desertificación en Colombia y el cambio global. *Cuadernos de Geografía*.XII (1-2): 121-134.
- Verón SR, Paruelo JM, Oesterheld M (2006) Assessing desertification. *J. Arid Environm.* 66: 751-763.
- Wang Q, Takahashi H (1999) A land surface water deficit model for an arid and semiarid region: Impact of desertification on the water deficit status in the Loess Plateau, China. *Journal of Climate* 12: 244-257.
- Xu CY, Singh VP (2002) Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. *Water Resources Management* 16: 197-219.