

Análisis de la sequía y desertificación mediante índices de aridez y estimación de la brecha hídrica en Baja California Sur, noroeste de México

Recibido: 29 de junio de 2012. Aceptado en versión final: 28 de octubre de 2013.

Enrique Troyo Diéguez*
Gustavo Mercado Mancera**
Arturo Cruz Falcón*
Alejandra Nieto Garibay*
Ricardo D. Valdez Cepeda***
José Luis García Hernández+
Bernardo Murillo Amador*

Resumen. En Baja California Sur (BCS) prevalecen climas muy secos-semicálidos y cálidos, asociados con la tendencia extremosa de las temperaturas diurnas y con la sequedad ambiental. En el estado, la temperatura máxima en verano sobrepasa los 40° C y la mínima oscila de 5 a 12° C, con mínima estatal de 2° C en invierno en la parte alta de la Sierra de La Laguna; solo en la región de Los Cabos se presenta un clima cálido subhúmedo. Debido a que la precipitación en el estado es escasa, oscilando de 310 mm en el sur del estado a 120 mm anuales en la porción norte,

las predicciones y escenarios en condiciones de cambio climático apuntan hacia una acentuación de las sequías. Con los valores de temperatura y precipitación correspondientes a los diferentes escenarios de cambio climático para cuatro estaciones consideradas y mediante una modificación escalar del Índice de De Martonne, se calcularon los indicadores IDHA Índice de Disponibilidad Hidroambiental (IDHA) e Índice de Sequía Hidroambiental (ISHA), para determinar su tendencia y la consecuente Brecha Hídrica Estandarizada (BHE), cuantificación innovadora del déficit hídrico, que

* Programa de Agricultura en Zonas Áridas, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C. (CIBNOR), Calle Instituto Politécnico Nacional No. 195, Playa Palo de Santa Rita Sur, 23096, La Paz, Baja California Sur, México. E-mail: etroyo04@cibnor.mx; afalcon04@cibnor.mx; anieto04@cibnor.mx; bmurillo04@cibnor.mx

** Coordinación de Ingeniería Agrícola, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México, Campo Cuatro, Km. 2.5 Carretera Cuautitlán-Teoloyucan San Sebastián Xhala, 54714, Cuautitlán Izcalli, Estado de México. E-mail: gmanmer@yahoo.com.mx

*** Centro Regional Universitario CRUCEN, Universidad Autónoma Chapingo, Cruz del Sur No. 100, Constelaciones, 98060, Zacatecas, México. E-mail: vacrida@hotmail.com

+ Facultad de Agricultura y Zootecnia, Universidad Juárez del Estado de Durango, Km. 35 Carretera Gómez Palacio-Tlahualillo, Domicilio Conocido, 35170, Venecia, Durango, México. E-mail: josel.garciahernandez@yahoo.com

Cómo citar:

Troyo Diéguez, E., G. Mercado Mancera, A. Cruz Falcón, A. Nieto Garibay, R. D. Valdez Cepeda, J. L. García Hernández y B. Murillo Amador (2014), "Análisis de la sequía y desertificación mediante índices de aridez y estimación de la brecha hídrica en Baja California Sur, noroeste de México", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 85, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 66-81, dx.doi.org/10.14350/ig.32404.

se propone en este trabajo. El máximo valor de BHE (diez unidades), el cual indica prevalencia de sequía, se observa de febrero a junio en prácticamente todo el estado. Se concluye que el análisis de las tendencias de PP y t y su integración en indicadores biparamétricos constituyen una herramienta

confiable para la construcción de escenarios y tendencias de cambio climático.

Palabras claves: Balance hídrico, sequía, aridez, índice de aridez, noroeste de México.

Analysis of drought and desertification by means of aridity indices and the estimation of water gap in Baja California Sur, Northwest Mexico

Abstract. In Baja California Sur (BCS), Mexico, dry-semi warm and warm climates prevail associated to an extreme trend of diurnal temperatures and the environmental dryness. In this State, the maximum summer t exceeds 40° C and the minimum varies from 5 to 12° C, with a minimal for the State of 2° C in winter, at the top of the Sierra de La Laguna; only Los Cabos region has a warm humid climate. Because precipitation in the state is low, oscillating from 310 mm in the southern area of the state to 120 mm per year in the northern portion, predictions and scenarios under climate conditions point to an intensification of droughts. The aim of this work was to carry out a comparative analysis of trends of temperature, precipitation and hydro-environmental aridity among contrasting localities of BCS, by means of the application of Aridity Indexes and the determination of the Standardized Water Gap (BHE), through a numerical scale modification of the De Martonne Index. With the values of temperature and precipitation for the different climate change scenarios for four weather stations, the indicators Hydro Environmental Availability Index (IDHA) and Hydro Environmental Drought Index

(ISHA) were calculated to determine their trend and the consequent BHE, an innovative quantification of water deficit, which is proposed in this paper. The maximum value of BHE (10 units), indicating prevalence of drought, is observed from February to June in almost the entire state. Results suggest that BHE tend to increase and intensify under climate change conditions, which is more evident from the South towards the North of the State. According to the trends of the indexes IDHA, ISHA and BHE, under six scenarios of climatic change for four regions of BCS, BHE can be estimated with a major significance for the region Gustavo Díaz Ordaz-Vizcaíno, Mulegé County, in the North of the State, where may reach a value BHE_{max} = 10 and BHE_{min} = 7.23, values which suggest extreme dryness, corresponding to the maximum values among localities. We conclude that the analysis of trends in PP and t and their integration into bi-parametric indicators are a reliable tool for the construction of scenarios and climate change trends.

Key words: Water balance, drought, Index of Aridity, northwest Mexico.

INTRODUCCIÓN

El concepto *desierto* tiene que ver y está relacionado con un lugar que puede sostener y brindar hábitat a un número relativamente limitado de seres vivos, es decir, se trata de un territorio con poca biomasa y escasa productividad biológica (ONU, 1994). En el contexto del ecosistema, el proceso de *desertificación* se refiere a una disminución de la biomasa, del suelo y de la productividad biológica de un territorio (Ibáñez *et al.*, 2007), la cual puede ocurrir tanto en regiones áridas como en semiáridas y subhúmedas, incluyendo los ecosistemas de matorral xerófilo y los de selva baja caducifolia. Cuando la disminución de la productividad biológica ocurre en un territorio cercano a los desiertos, se trata de un proceso de desertización, como ocurre en las áreas contiguas al Desierto del Vizcaíno, en Baja

California Sur (BCS, Oropeza, 2004). Por su parte, 'aridez' es una palabra de origen latino (*aridus*) que significa seco, es decir, sin humedad. Sin embargo, la aridez es algo más que sequía, puesto que en su concepto intervienen diversos elementos y factores climáticos, entre los que destacan las altas temperaturas, baja precipitación y la intensa radiación. Desde el punto de vista hidrológico, la aridez se define en términos de volumen de flujo anual, como una relación directa entre los atributos de los almacenamientos o depósitos superficiales, la hidrología subterránea y los procesos geomorfológicos (Watkins, 1969).

En una zona seca, es evidente que la escasez de agua procede principalmente de la falta de lluvia, o de una menguada o disminuida precipitación. Además, la eficacia del agua en el suelo depende de numerosos factores terrestres, entre los que destaca

la evaporación (Mercado *et al.*, 2010). Distintos autores utilizan conceptos variados para definir la aridez climática, por ello no existe una clara y exacta definición de aridez. Sin embargo, algunos autores emplean una noción más amplia de aridez, a la que denominan aridez paisajística, que se origina cuando la aridez del clima se refuerza por la aridez edáfica, la cual no es fácil de cuantificar; sin embargo, su influencia es decisiva para la agricultura, la cobertura vegetal y el paisaje (Amestoy y Amestoy, 2009). Díaz *et al.* (2011) propusieron un procedimiento para la elaboración de un mapa actualizado que delimita zonas que se encuentran en algún nivel de condición de aridez en México, al considerar que el 80% de la evaporación se convierte en evapotranspiración y este indicador se puede considerar como una aproximación al planteado por la FAO basado en el cálculo de Penman-Monteinth.

Los recursos naturales disponibles, agua, suelo, biota y energía interactúan estrechamente con el clima, cuyas variaciones y fluctuaciones pueden modificar las propiedades y atributos del entorno ambiental, causando eventualmente procesos de degradación, como la erosión y desertificación (Cuadro 1). El entendimiento común de las causas que modifican el uso del suelo y que generan cambios en la cubierta vegetal está dominado por simplificaciones que, a su vez, frecuentemente fundamentan las políticas de desarrollo y conservación del ambiente (Lambin *et al.*, 2001). Al respecto, se ha coincidido en que todo proceso que contribuye al deterioro ambiental, incluyendo la

degradación del agua, el suelo o la biodiversidad, puede considerarse como un proceso de desertificación (Reynolds *et al.*, 2005). En diversas zonas de BCS existen procesos de degradación de los mencionados recursos:

1. Degradación del agua; derivado de la extracción de un volumen de agua subterránea mayor al que ingresa por infiltración y degradación en calidad por intrusión salina, contaminación por fertilizantes y salinización de las aguas remanentes retenidas temporalmente en las represas y depresiones del terreno. Lo anterior ocurre en las cuencas de La Paz y Los Planes, BCS, entre otras (Figura 1, Cuadro 2).
2. Degradación de la biodiversidad; puede ocurrir debido a la destrucción de hábitats, al sobrepastoreo, introducción de especies exóticas, pérdida de variedades locales de diversas especies cultivadas, y a otros factores. Dicho tipo de degradación se observa en el Valle de Santo Domingo y en la cuenca de La Paz, BCS (Troyo *et al.*, 2008).
3. Degradación del suelo; referido a la pérdida de la fertilidad, generalmente irreversible, o bien, cuya recuperación es altamente costosa y económicamente inviable (Oropeza, 2004). Lo anterior se observa en los valles de Santo Domingo y el Vizcaíno, BCS.

De todos los recursos de la Tierra, la falta de agua dulce, la degradación del suelo y la pérdida de diversidad biológica, expresados en la desertifica-

Cuadro 1. Efectos causados en el entorno ambiental por variables o atributos del factor clima

| Indicador | Erosión hídrica | Erosión por labranza | Erosión eólica | Salinización suelo y agua | Estrés hídrico | Incendios forestales | Desertificación |
|------------------------------|-----------------|----------------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------------|-----------------|
| Temperatura ambiental | | | | + | + | + | + |
| Precipitación | + | + | | + | + | + | + |
| Índice de Aridez | | | + | + | + | + | |
| Evapotranspiración potencial | + | | | + | + | | |
| Estacionalidad de la lluvia | + | | | + | + | + | + |
| Erosividad de la lluvia | + | | | | | | + |

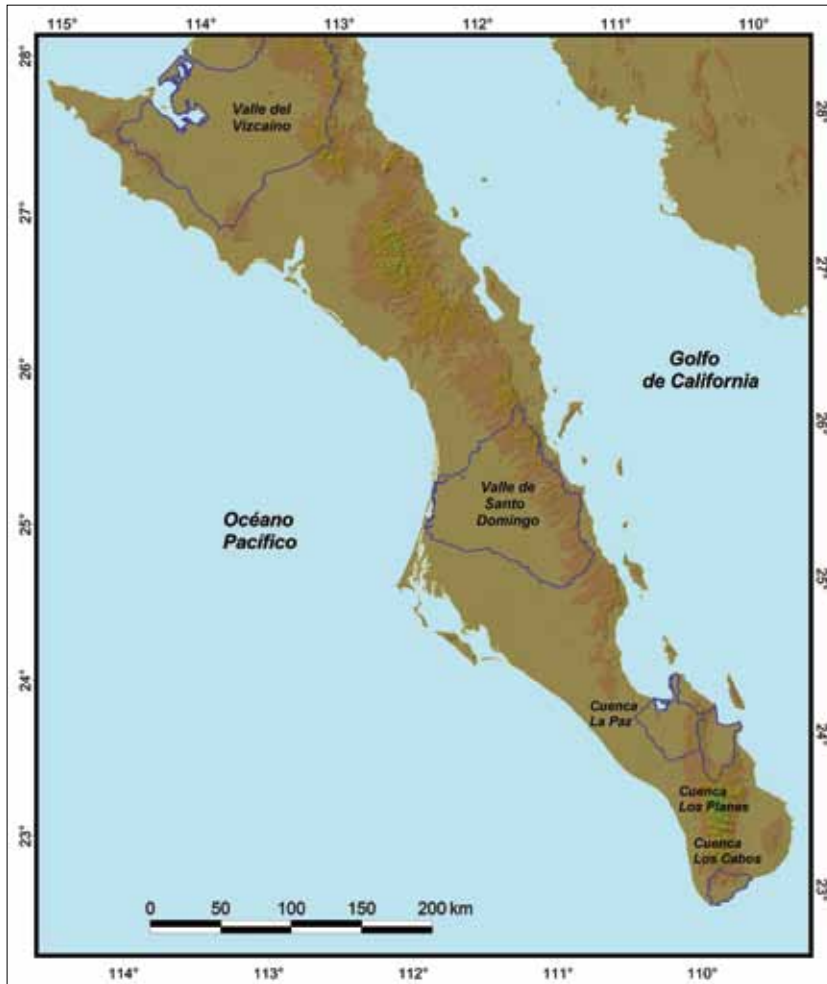


Figura 1. Cuencas y valles de Baja California Sur vulnerables a la desertificación.

Cuadro 2. Efectos causados en el entorno ambiental por variables o atributos del recurso agua

| | Erosión hídrica | Erosión por labranza | Erosión eólica | Salinización suelo y agua | Estrés hídrico | Incendios forestales | Desertificación |
|----------------------------------|-----------------|----------------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------------|-----------------|
| Calidad del agua | | | | + | + | | + |
| Disponibilidad de agua | | | + | + | + | + | + |
| Explotación del agua subterránea | + | + | | + | + | | |
| Consumo/demanda de agua | | | | + | + | | + |

ción, constituyen la amenaza más implacable para la humanidad. Al respecto, según Reynolds *et al.* (2005), la desertificación es uno de los principales problemas ambientales a los que se enfrentan los

países situados en zonas de clima árido, semiárido y seco-subhúmedo. Los síntomas o huellas de las fluctuaciones climáticas, de la degradación por erosión y desertificación, se hallan presentes en áreas

que tienden a ensancharse, en numerosos casos de modo acelerado por la frecuencia e intensidad de las sequías y ocurrencia eventual de lluvias de alta intensidad y, sobre todo, por un uso y gestión inadecuado de los recursos naturales por parte de los diversos sectores de la sociedad.

La desertificación, desde el decenio de 1970-1980, ha sido un tema de amplia cobertura mediática y considerado como uno de los problemas más graves que afectan a las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas secas del planeta por sus implicaciones ambientales y socioeconómicas. Incluso ha llegado a ser uno de los más importantes temas ambientales en los ámbitos científico, político y también popular. La desertificación fue uno de los principales problemas abordados en la *Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo*, celebrada en Río de Janeiro en 1992. En la citada *Cumbre de la Tierra* se reconoció la dimensión global del problema y la necesidad de una movilización general para combatir el fenómeno de degradación de la Tierra a través de un *Convenio Internacional de Lucha contra la Desertificación*, protocolizado en 1994, el cual entró en vigor a finales de 1996 al ser ratificado por más de 50 países (ONU, 1994).

La gestión de los recursos naturales en el noroeste de México y en BCS, en el siglo XXI y en el horizonte de un desarrollo perdurable, deberá evaluar la vulnerabilidad de sus ecosistemas frente a diversos escenarios originados por la desertificación y el cambio global, en términos del agotamiento hídrico, degradación, fragmentación del ecosistema y pérdida de recursos. Los factores de cambio incluyen el clima y los patrones de uso del territorio que resultan de las políticas agropecuarias, pesqueras, acuícolas, industriales, turísticas y otras presiones socioeconómicas. La aproximación debe basarse en modelos integrados que permitan diseñar estrategias para una gestión de cambio socioeconómico y ambiental que sea compatible con la explotación y conservación sostenible de los recursos naturales (Del Barrio, 2001).

Casi la totalidad del territorio sudcaliforniano tiene en común una marcada aridez, tanto estival como invernal, y un régimen de lluvias con elevado índice de irregularidad y acusada estacionalidad. Los

registros de las temperaturas y de las precipitaciones traducen ciertos rasgos generales pero disimulan los acontecimientos esporádicos que alteran su imagen (Troyo *et al.*, 2008). El estado de BCS es extraordinariamente seco y árido; este análisis se centra en la evolución de las precipitaciones en las que se observan marcados ciclos de sequía. Los índices de aridez en esta entidad de la República Mexicana se analizan y se hace especial mención a las sequías, así como a las aportaciones de agua en cuencas prioritarias que sostienen el desarrollo socioeconómico.

En ese sentido, un análisis comparativo de las tendencias de la temperatura, precipitación y aridez hidroambiental entre localidades contrastantes de BCS es presentado mediante la aplicación de 'Índices de Aridez' y la determinación de la brecha hídrica estandarizada (BHE), a través de una modificación numérica escalar del 'Índice de De Martonne' (IM) y su derivación en indicadores hídricos, para adecuarlos como estimadores de la deficiencia de agua, aridez y desertificación a las condiciones climáticas de BCS, en escenarios de cambio climático.

MÉTODOS

Cuatro regiones en BCS fueron definidas para su análisis, conformadas por valles o cuencas actualmente vulnerables al cambio climático y a procesos de desertificación, dado su perfil termo-pluviométrico y las condiciones de explotación agropecuaria en que se encuentran (Figura 1, Cuadro 3). De acuerdo con los gradientes de precipitación y oscilaciones de temperatura, el clima de BCS varía del tipo subtropical seco al extremadamente árido, cuyos gradientes se expresan y delimitan mediante el Índice de De Martonne (1927), (Figura 2, Cuadro 4), con vegetación dominante de tipo sarcocaulé, matorral espinoso y algunas gramíneas anuales con densidades de población reducidas, principalmente en las épocas de sequía. Mediante la aplicación del método de zonificación climática según el criterio de interpretación del Índice Climático (Ic) desarrollado por FAO-UNESCO (Simota y Dumitru, 2010), las regiones evaluadas corresponden a una zona árida (Cuadros 4 y 5).

Cuadro 3. Valores de parámetros hidroambientales y de la brecha hídrica estandarizada, estimados para seis escenarios de cambio climático, en cuatro regiones de BCS

| Parámetro Hidroambiental | Estaciones | | | | Estadísticos | |
|--|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------|------------------------|--------------|---------------------|
| | G. Díaz Ordaz-Vizcaíno ^a | Ciudad Constitución ^b | La Paz ^c | Los Cabos ^a | Media | Desviación estándar |
| Temperatura media anual, °C | 20.4 | 22.0 | 23.3 | 23.4 | 22.3 | 1.4 |
| Precipitación anual (PP), mm | 119.5 | 149.7 | 182.6 | 309.7 | 190.4 | 83.6 |
| Evaporación anual (Ev), mm | 1 950.3 | 2 030.2 | 1 996.5 | 1 943.1 | 1 980.0 | 40.9 |
| Déficit hidrometeorológico (Ev-PP) | 1 830.8 | 1 880.5 | 1 813.9 | 1 633.4 | 1 789.7 | 107.9 |
| Evapotranspiración potencial (Eto), mm | 1 722.0 | 1 461.5 | 1 759.8 | 1 709.7 | 1 663.2 | 136.2 |
| Índice climático IcFAO-UNESCO (PP/Eto) | 0.07 | 0.10 | 0.10 | 0.14 | 0.11 | 0.03 |
| Índice de Lang (PP/t) | 5.86 | 6.80 | 7.84 | 13.24 | 8.43 | 3.30 |
| IDHA promedio anual | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.3 | 1.0 | 0.2 |
| IDHA máximo anual | 2.2 | 2.2 | 3.3 | 5.1 | 3.2 | 1.4 |
| IDHA mínimo anual | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| ISHA promedio anual | 9.2 | 9.1 | 9.0 | 8.7 | 9.0 | 0.2 |
| ISHA máximo anual | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 0.0 |
| ISHA mínimo anual | 7.8 | 7.8 | 6.7 | 4.9 | 6.8 | 1.4 |
| BHE mínima anual | 5.60 | 5.6 | 3.4 | 0.0 ^d | 3.6 | 2.6 |
| Escenarios de cambio climático | | | | | | |
| BHE mín., PP actual, +1.5° C | 5.8 | 5.8 | 3.6 | 0.2 | 3.9 | 2.6 |
| BHE mín., PP actual, +3.0° C | 6.0 | 5.8 | 3.8 | 0.6 | 4.1 | 2.5 |
| BHE mín., PP-30%, temp act | 7.0 | 6.9 | 5.4 | 2.8 | 5.5 | 1.9 |
| BHE mín., PP-30%, +1.5° C | 7.1 | 7.0 | 5.6 | 3.2 | 5.7 | 1.8 |
| BHE mín., PP-30%, +3.0° C | 7.2 | 7.2 | 5.8 | 3.4 | 5.9 | 1.8 |

^a Historial de 29 años, ^b 28 años, ^c 30 años, ^d El dato real es -0.2.

Por otra parte, los acuíferos que abastecen las localidades estudiadas se encuentran en condiciones de sobreexplotación, siendo el acuífero de San José del Cabo, en el sur del estado, el que acusa un mayor déficit hídrico, alcanzando una magnitud de -5.91 Mm³ anuales (Cuadro 6), (DOF, 2010, 2011). Para la cuantificación numérica de la aridez y sequía y su aplicación en la interpretación del proceso de desertificación, diferentes métodos se han propuesto y utilizado para la delimitación y caracterización de las zonas áridas y semiáridas. El cálculo de la relación PP/t, en mm/°C, es una de las alternativas numéricas que se aplica en este

tipo de estudios (Amador *et al.*, 2011), la cual fue publicada y ha sido referida como el Índice de Lang (Hubálek y Horáková, 1988; Sánchez *et al.*, 2011). Entre los indicadores que se han reportado, el Índice de Martonne (IM) es muy utilizado por su sencillez, requiriendo únicamente datos mensuales de precipitación y temperatura (Amestoy y Amestoy, 2009); dicho índice se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$IM = (12 * PP)/(t + 10) \quad (1)$$

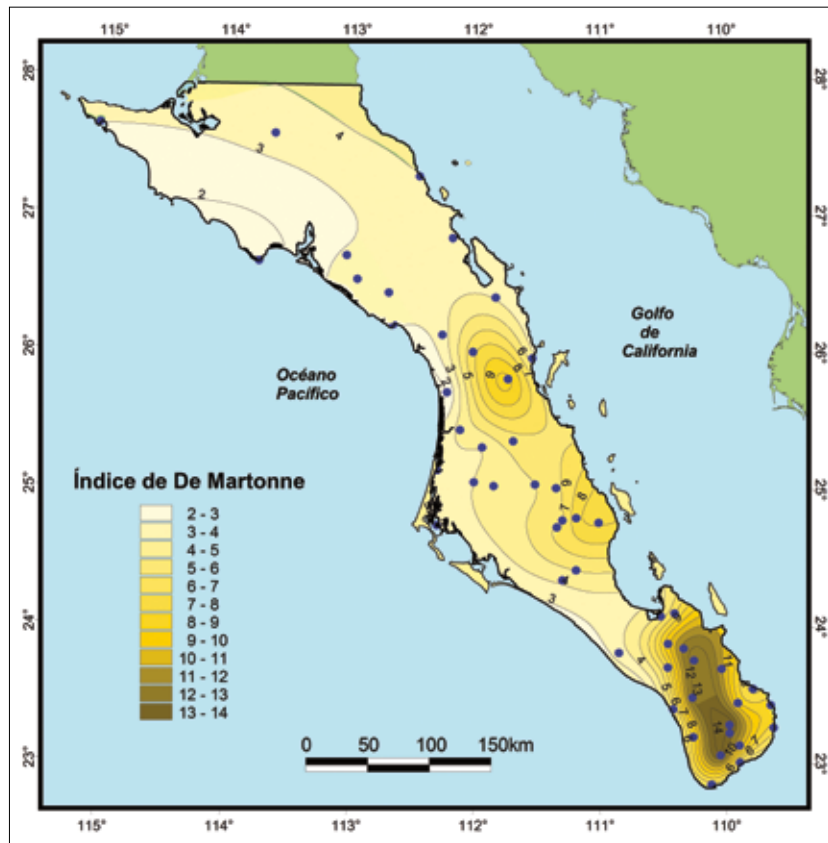


Figura 2. Gradiente de aridización evidente de sur a norte, en las provincias bioclimáticas de Baja California Sur; la mayor extensión es ocupada por zonas tipo desierto y semidesierto (Cuadro 4).

Cuadro 4. Zonificación climática según el criterio de interpretación del Índice de De Martonne (1926)

| Clasificación IM | Intervalo |
|--------------------------------|-----------|
| Desiertos (hiperárido) | 0 a 5 |
| Semidesierto (árido) | 5 a 10 |
| Semiárido de tipo mediterráneo | 10 a 20 |
| Subhúmeda | 20 a 30 |
| Húmeda | 30 a 60 |
| Perhúmeda | > 60 |

Cuadro 5. Zonificación climática según el criterio de interpretación del Índice climático Ic FAO-UNESCO

| Clasificación IcFAO-UNESCO | Intervalo |
|------------------------------------|---------------------------|
| 0) Zona árida extrema (hiperárida) | $P/ET_0 \leq 0.03$ |
| I) Zona árida | $0.03 < P/ET_0 \leq 0.20$ |
| II) Zona semiárida | $0.20 < P/ET_0 \leq 0.50$ |
| III) Zona sub-húmeda | $0.50 < P/ET_0 \leq 0.75$ |
| IV) Zona húmeda | $0.75 < P/ET_0 \leq 1.25$ |
| V) Zona húmeda extrema | $P/ET_0 > 1.25$ |

Donde, PP: precipitación mensual (mm) y t: temperatura media mensual (°C); 12 es una constante para la aplicación del modelo al análisis de datos mensuales.

Cuando el índice mensual de De Martonne (ecuación 1) es mayor a 20, se considera un mes húmedo; si su valor fluctúa entre 10 y 20 corresponde

a un mes semi-árido; y un mes árido es aquel cuyo índice tiene un valor menor a 10. La dificultad en la aplicación del ÍM radica en la escasa posibilidad que presenta para realizar comparaciones de estaciones o regiones cuantitativamente similares, además de que realmente refleja una condición de pluviosidad y no de aridez o sequía, toda vez que aumenta su

Cuadro 6. Disponibilidad de agua subterránea para ocho acuíferos de Baja California Sur, publicada en el *Diario Oficial de la Federación* (DOF, 2009, 2010, 2011)

| Clave | Unidad hidrogeológica (Acuífero) | Fecha de publicación | R | DNCOM | VCAS | VEXTET | DAS | DÉFICIT |
|-------|----------------------------------|----------------------|--|-------|--------|--------|------|---------|
| | | | ---- Cifras en millones de metros cúbicos anuales ---- | | | | | |
| 0302 | Vizcaíno | 28/08/2009 | 41.20 | 3.50 | 37.83 | 42.00 | 0.00 | -0.13 |
| 0339 | Paralelo 28 | 25/01/2011 | 5.40 | 4.00 | 0.00 | 0.00 | 1.40 | 0.00 |
| 0306 | Santo Domingo | 28//08/2009 | 188.00 | 10.40 | 178.76 | 214.00 | 0.00 | -1.16 |
| 0323 | Los Planes | 28/08/2009 | 9.40 | 1.00 | 12.43 | 11.00 | 0.00 | -4.03 |
| 0324 | La Paz | 28/08/2009 | 27.80 | 0.00 | 30.39 | 30.5 | 0.00 | -2.59 |
| 0319 | San José del Cabo | 28/08/2009 | 24.0 | 3.00 | 26.91 | 26.20 | 0.00 | -5.91 |
| 0320 | Santiago | 28/08/2009 | 24.50 | 4.6 | 15.75 | 13.20 | 4.15 | 0.00 |
| 0335 | San Lucas | 08/07/2010 | 0.50 | 0.37 | 0.24 | 0.10 | 0.00 | -0.11 |

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterráneas VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" y "4" de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000.

valor de manera directamente proporcional a la magnitud de la PP.

Para 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 PP y t, con periodos de precipitación muy poca o nula. Lo anterior obedeció a que la tendencia del IM es numéricamente imperceptible para el periodo seco, tendencia caracterizada por valores mínimos o muy poco significativos, toda vez que su resolución se enfoca numéricamente a la época húmeda o de alta pluviosidad (Mercado *et al.*, 2010).

Con el propósito de encontrar un ajuste apropiado a la ecuación de De Martonne, mediante el método de los mínimos cuadrados, dicha ecuación se ajustó a un modelo numérico alternativo que estuviese altamente correlacionado con el déficit hídrico y que a la vez fuese sensible a valores mínimos de precipitación. El planteamiento surgió ante la necesidad de contar con un índice que muestre un valor con mayor sensibilidad para su interpretación en zonas secas, cuya escala esté limitada de 0 a 10 unidades y sea aplicable a condiciones de precipitación menor a 100 mm mensuales, característico de las zonas áridas. Dicho indicador alternativo, modificado a partir

de la ecuación del IM, fue definido mediante la función:

$$IDHA = Ke (12*PP)/(t + 10) \quad (2)$$

Donde: IDHA es el Índice de Disponibilidad Hidroambiental, PP es la precipitación mensual en mm, t es la temperatura media mensual en grados centígrados y Ke es un coeficiente adimensional de ajuste de escala, con valor de 0.193. A su vez, para complementar la condición hídrica a partir del índice IDHA (ecuación 2), se definió la siguiente relación:

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

donde: ISHA es el Índice de Sequía Hidroambiental.

El factor de ajuste Ke en la ecuación 2, propuesto para modificar el IM, fue establecido con valor de 0.193, en virtud de que en las condiciones de aridez de la zona en estudio resuelve con mayor sensibilidad numérica a la variación de las sequías. Dichos cálculos se realizaron para cada estación climática analizada de manera individual y en conjunto para cada región.

Para el análisis de las tendencias hídricas estimadas a partir del cambio climático se consideraron

seis escenarios: *a)* tendencia de PP y temperatura actual, *b)* PP actual con incremento de 1.5° C, *c)* PP actual con aumento de 3° C, *d)* decremento de PP en 30%, en condiciones actuales de temperatura, *e)* decremento de PP en 30%, con aumento de 1.5° C, y *f)* decremento de PP en 30%, con aumento de 3° C.

Una vez determinados los valores de *t* y PP correspondientes a los diferentes escenarios de cambio climático para las estaciones consideradas, se procedió a calcular los indicadores IDHA e ISHA (ecuaciones 2 y 3) para determinar su tendencia y la consecuente brecha hídrica estandarizada (BHE) en cada caso. El cálculo de la BHE se realizó restando al valor del índice ISHA el valor del IDHA registrado para el mismo mes o periodo en las localidades estudiadas; en consecuencia, BHE se determina mediante las siguientes ecuaciones, en valores adimensionales:

$$BHE = ISHA - IDHA \quad (4)$$

$$BHE = 10 - (2 * IDHA) \quad (5)$$

En términos de las variables consideradas en el Índice de De Martonne, la BHE se expresa de la siguiente manera:

$$BHE = 10 - [4.632 * PP / (t + 10)] \quad (6)$$

Con los datos obtenidos se construyeron los gráficos de IDHA, ISHA y BHE asociados a cada escenario de cambio climático, en las localidades estudiadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De las áreas analizadas en BCS, la región de Los Cabos presenta la mayor precipitación, observándose una tendencia a la disminución de la misma, la cual se exagera hacia el norte del estado, donde la estación Gustavo Díaz Ordaz-Vizcaíno, en el municipio de Mulegé en el norte del estado, mostró la menor precipitación en BCS (Cuadro 3, Figura 3). El déficit hidrometeorológico (evaporación menos precipitación) fue significativo, siendo de

mayor magnitud en el área de influencia de la estación ubicada en Ciudad Constitución, la cual se encuentra en el valle agrícola de Santo Domingo, BCS, principal zona productora del estado (Cuadro 3).

La disponibilidad hidro-ambiental (IDHA) en las estaciones analizadas mostró valores muy pequeños (IDHA promedio estatal = 1.00) con respecto al valor máximo posible (IDHA = 10), el cual representaría una pluviometría óptima; el valor mínimo promedio se observó para la estación Gustavo Díaz Ordaz-Vizcaíno, con IDHA prom = 0.8 (Cuadro 3). En todas las estaciones, la mayoría de los meses presentaron un valor grande del indicador ISHA (sequía hidro ambiental), con un promedio estatal de ISHA = 9.0, lo que motiva a diseñar estrategias para optimizar el uso del agua disponible en las regiones de estudio, principalmente en los escenarios de cambio climático.

Para el caso de la cuenca de La Paz, se observó un IDHA cuyo valor se aproxima al ISHA (Figura 4), únicamente en el mes de septiembre cuando la BHE disminuye, alcanzando en ese momento su valor mínimo en el año (BHE mín = 3.4), aunque de cualquier manera prevalece un IDHA pequeño, lo que implica una escasa disponibilidad de agua para la mayor parte del año. Por su parte, en la región de Los Cabos, la BHE tiende a cero e incluso adquiere un valor negativo en el mismo mes de septiembre, sitio y época en que existe oferta hídrica, contrastando con los demás sitios de estudio, donde a lo largo del año prevalece una sequía hidroambiental. Según los resultados, la BHE tiende a incrementarse y magnificarse en condiciones de cambio climático, lo cual es más notorio desde el sur hacia el norte del estado.

Las tendencias de los índices IDHA, ISHA y de la consecuente BHE en seis escenarios de cambio climático se muestran en la Figura 5, para cuatro microrregiones de BCS. La BHE que puede pronosticarse con mayor acentuación habrá de ocurrir en la región de Gustavo Díaz Ordaz-Vizcaíno, donde alcanzaría un valor de BHE mínima = 7.23 (con 30% menos de PP y una temperatura incrementada en 3° C), el cual denota extrema sequía y corresponde al valor máximo entre localidades, estimado para los escenarios evaluados (Cuadro 3).

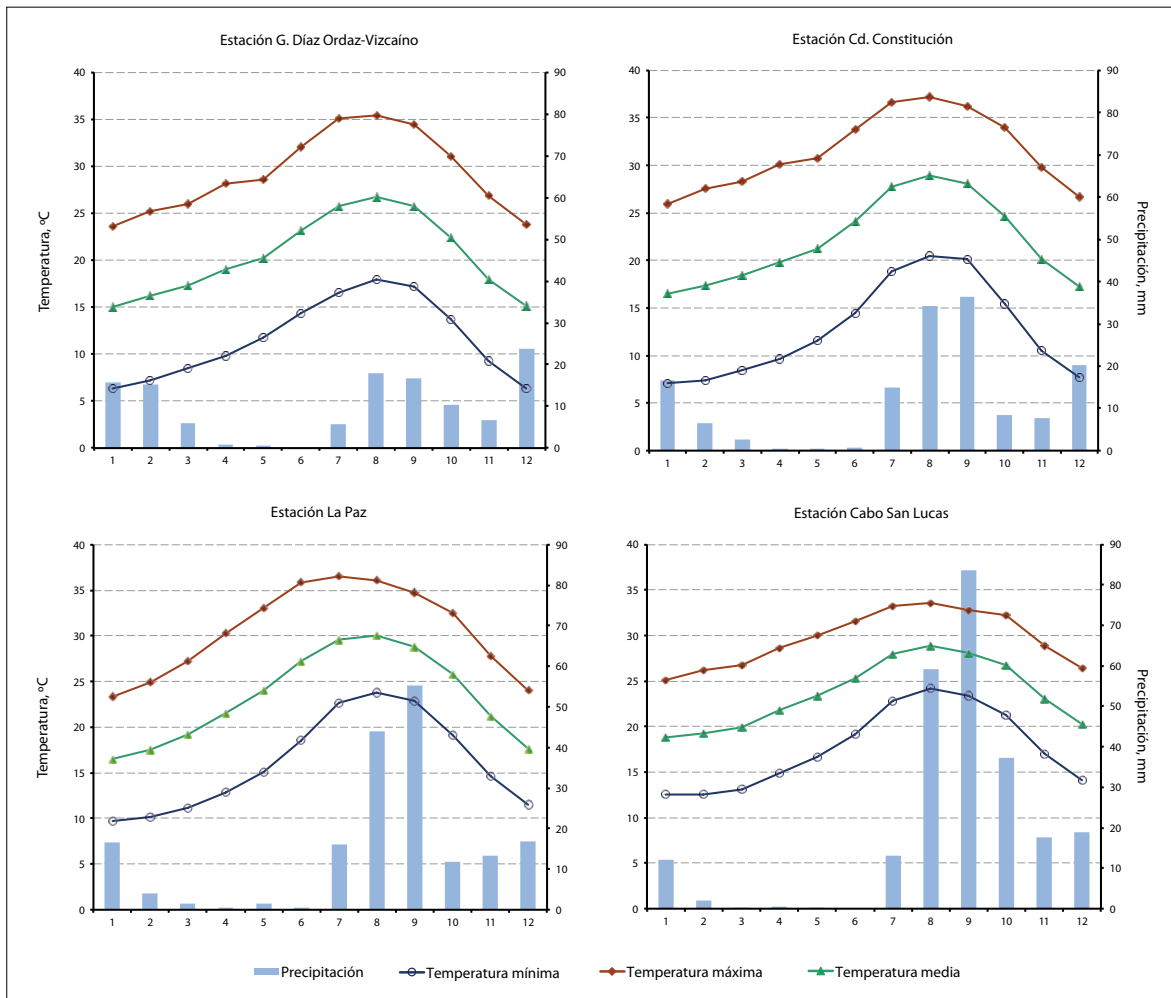


Figura 3. Tendencias de las variables termoplumiométricas (precipitación, temperatura máxima, temperatura media y temperatura mínima), para cuatro microrregiones de BCS.

El desempeño numérico del IM está estrechamente asociado a la fluctuación de la precipitación, por lo que en una serie de datos históricos, su sensibilidad obedece principalmente a las variaciones pluviométricas. En la Figura 6 se observa la escasa precipitación registrada para la estación G. Díaz Ordaz-Vizcaíno, en el norte de Baja California Sur, del 2009 al 2011. La aplicación del citado índice solo ratifica que diciembre del 2009 fue el más húmedo para el referido periodo. Por su parte, en la Figura 7 se observa el efecto de los fenómenos convectivos pluviométricos en la región de Cabo San Lucas hacia el sur del estado,

donde las mayores precipitaciones se presentan en agosto y septiembre, con la tendencia representada por el IM, mostrando una alta correlación. Como herramienta alternativa, en las Figuras 8 y 9 la tendencia de los indicadores IDHA e ISHA reflejan en una escala estandarizada las fluctuaciones de las épocas húmedas y secas en las áreas de influencia de las estaciones G. Díaz Ordaz-Vizcaíno (norte de BCS) y de Cabo San Lucas, BCS, para el trienio 2009-2011.

Mediante los índices desarrollados, es posible comparar la condición hídrica reflejada por diferentes localidades, mediante el análisis de la fluc-

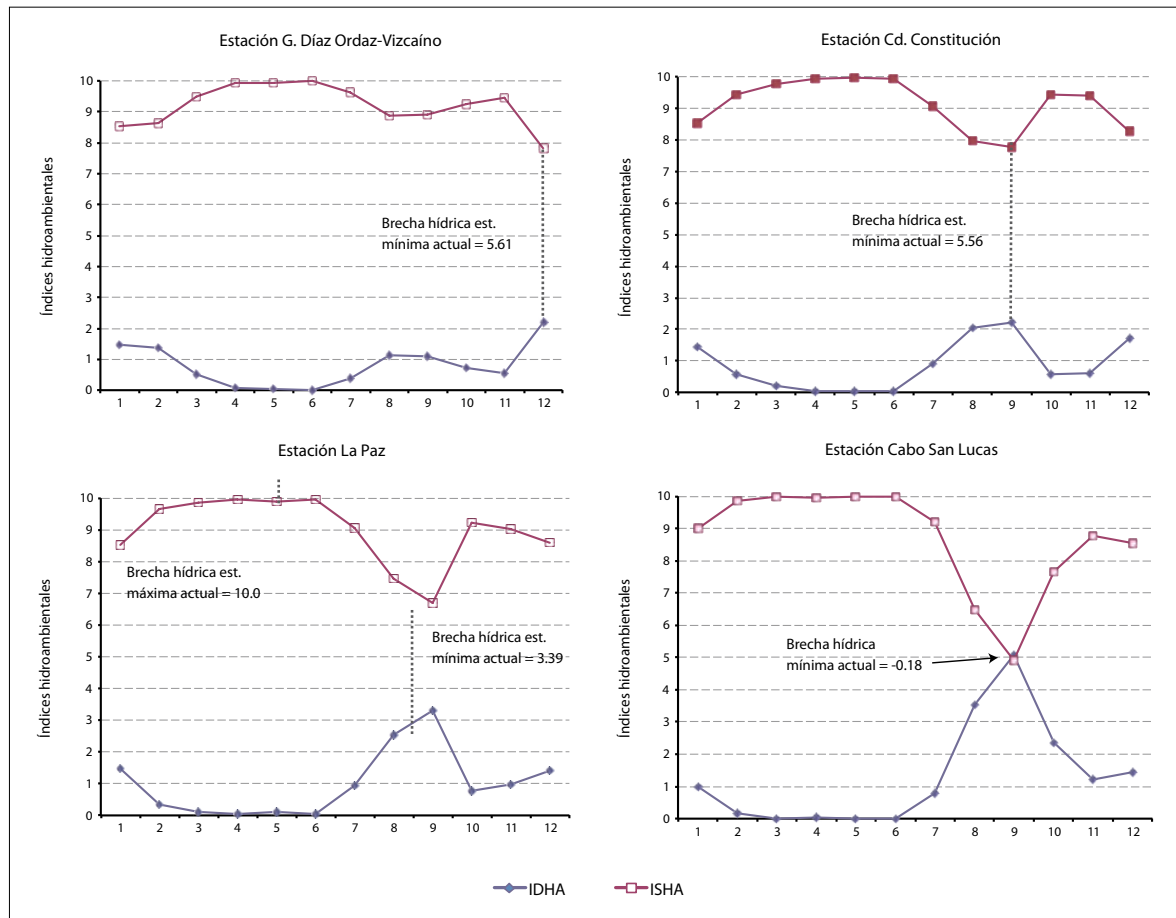


Figura 4. Fluctuación de los indicadores IDHA (Índice de Disponibilidad Hidroambiental) e ISHA (Índice de Sequía Hidroambiental) en cuatro microrregiones de BCS.

tuación resultante, con el potencial para detectar con suficiente resolución la presencia y longitud de los periodos húmedos y secos. En las citadas Figuras 8 y 9, es posible detectar que el periodo de sequía hidrometeorológica en la estación G. Díaz Ordaz-Vizcaíno se prolonga prácticamente a lo largo del trienio analizado, toda vez que el índice ISHA no disminuye de un valor de ocho en el periodo, en tanto que en la estación Cabo San Lucas se detectan incrementos de humedad pluviométrica en los meses de agosto y septiembre, lo cual fue más evidente en 2009 y 2010, siendo relativamente seco en 2011.

Los cambios significativos en los sistemas físicos y biológicos se están produciendo en todos los continentes y en la mayoría de los océanos, con

una concentración de los datos disponibles en Europa y América del Norte (Rosenzweig *et al.*, 2008); en zonas áridas, dichos cambios afectan de manera significativa la disponibilidad y calidad de los recursos agua y suelo.

Al planificar el desarrollo tecnológico y aplicar métodos de diagnóstico hidroambiental y de disponibilidad del agua para la prevención de la desertificación, es difícil determinar el balance óptimo entre las estrategias y atributos involucrados en la conservación del agua y suelo y aquellos requeridos para optimizar la producción, que logren al mismo tiempo consolidar el desarrollo socio-económico. Dicho balance depende de manera compleja, de la naturaleza del suelo, de la geografía, del clima particular en cada caso (particularmente de la

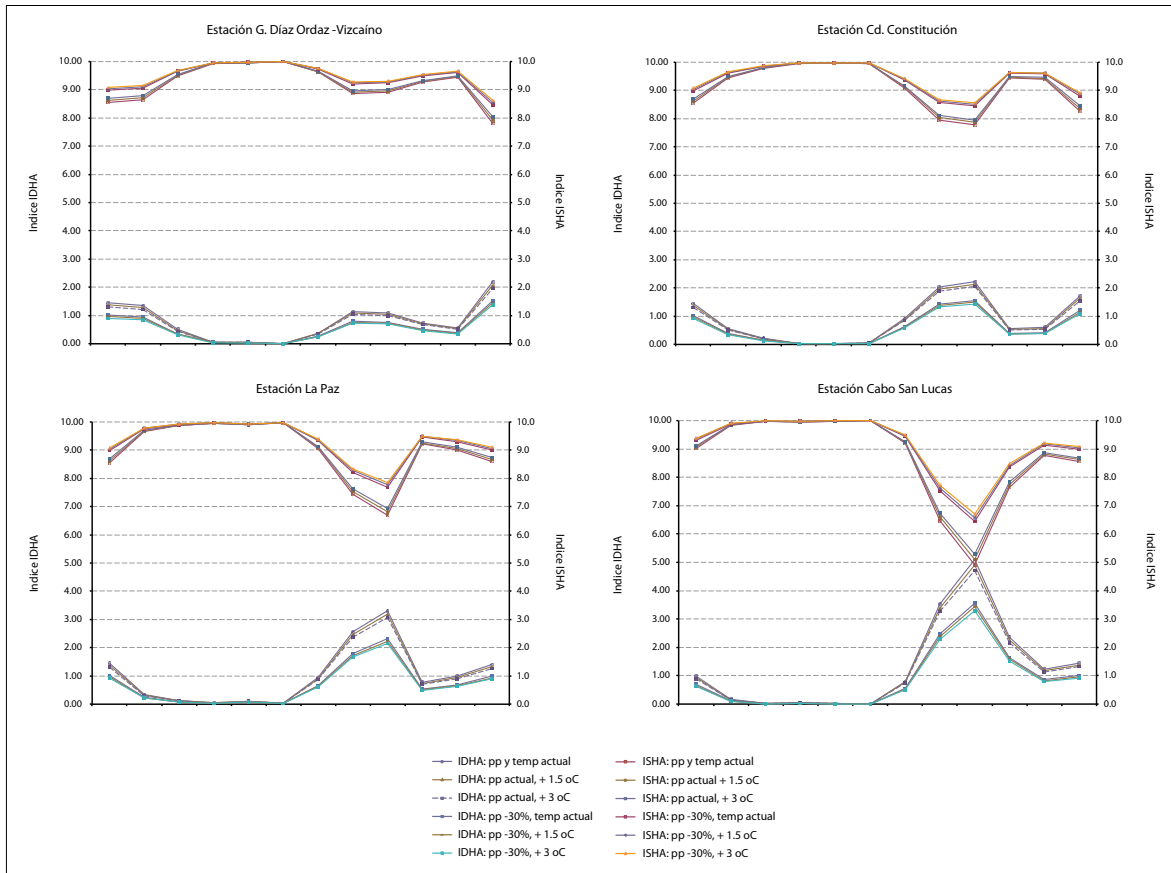


Figura 5. Tendencias estimadas para los índices IDHA, ISHA y la brecha hídrica en seis escenarios de cambio climático, para cuatro microrregiones de Baja California Sur.

probabilidad de las próximas sequías y precipitaciones), del potencial y condición agrícola, y del perfil socio-económico y tecnológico del usuario del agua y del productor (Troyo *et al.*, 2010).

En el caso particular del agua como recurso limitante en zonas áridas, la variabilidad climática y el agua subterránea deben valorarse como factores clave, considerándolos partes centrales y activas del entorno y sus recursos. Por lo antes expuesto, se requiere un entendimiento detallado del clima y de los sistemas de flujo involucrados, de tal forma que puedan clarificarse y definirse con precisión los problemas relacionados e instrumentar así las soluciones pertinentes que puedan mitigar oportunamente los efectos ambientales, considerando la naturaleza geoclimática y el perfil socioeconómico (Carrillo *et al.*, 2008).

A manera de ejemplo de las consecuencias que genera sacrificar el balance hídrico en aras de una mayor capacidad de producción agropecuaria, la agricultura en el Valle de Santo Domingo, municipio de Comondú, BCS, ha mostrado en decenios pasados una alta tasa de incremento en la productividad, aunque los rendimientos máximos posibles al parecer ya han sido alcanzados, con efectos de degradación hídrica, incluyendo la disminución en la disponibilidad y calidad del agua extraída del acuífero (Troyo *et al.*, 2008). En los últimos años la disponibilidad hídrica y, en consecuencia, la productividad en el Valle de Santo Domingo, ha disminuido debido a la sobreexplotación del agua subterránea para el riego, lo cual se manifiesta mediante un déficit de -1.16 Mm^3 (Cuadro 5). Además, la intrusión de agua salina, exacerbada

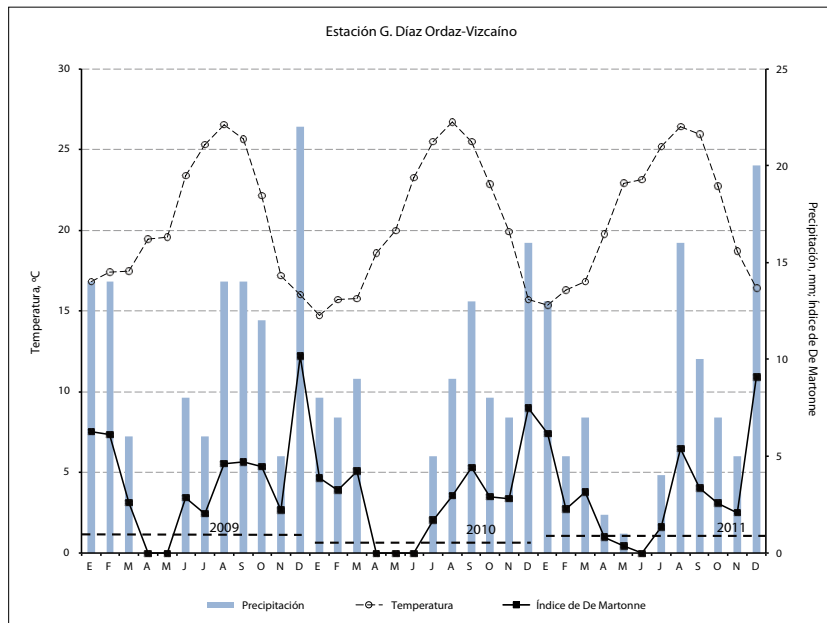


Figura 6. Tendencia de la temperatura media, precipitación y del Índice de De Martonne para el área de influencia de la estación G. Díaz Ordaz-Vizcaino, municipio de Mulegé, BCS. Periodo 2009-2011.

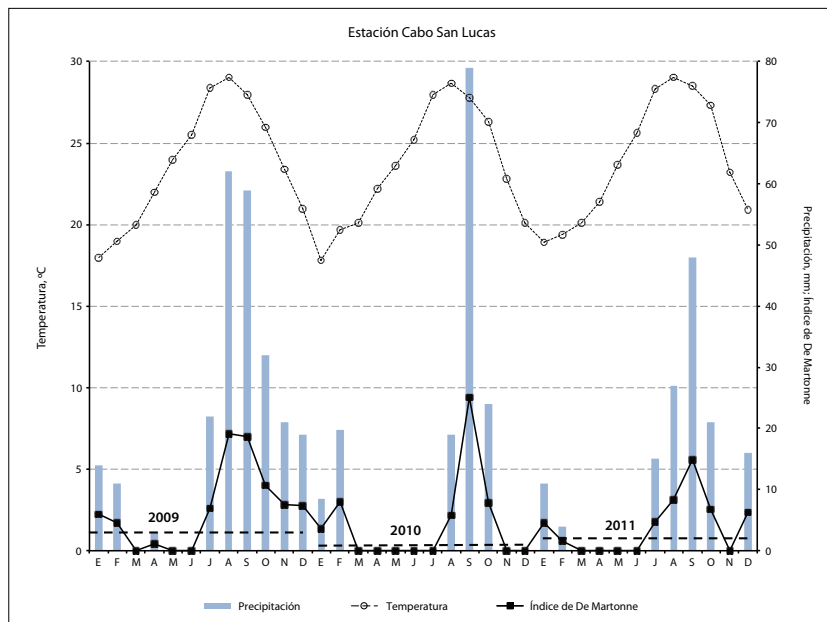


Figura 7. Tendencia de la temperatura media, precipitación y del Índice de De Martonne para el área de influencia de la estación Cabo San Lucas, municipio de Los Cabos, BCS. Periodo 2009-2011.

por la extracción inmoderada de agua de pozos profundos, ha inducido problemas de salificación y sodificación, lo cual ocasiona que los paquetes tecnológicos, generados por la 'Revolución Verde' e incluso por recomendaciones a partir de investigaciones más recientes, sean ineficientes (Salinas *et al.*, 2006).

CONCLUSIONES

La región de Los Cabos presenta la mayor precipitación, aunque se aprecia una tendencia de disminución hacia el norte del estado. La estación Gustavo Díaz Ordaz-Vizcaino mostró la menor precipitación en BCS.

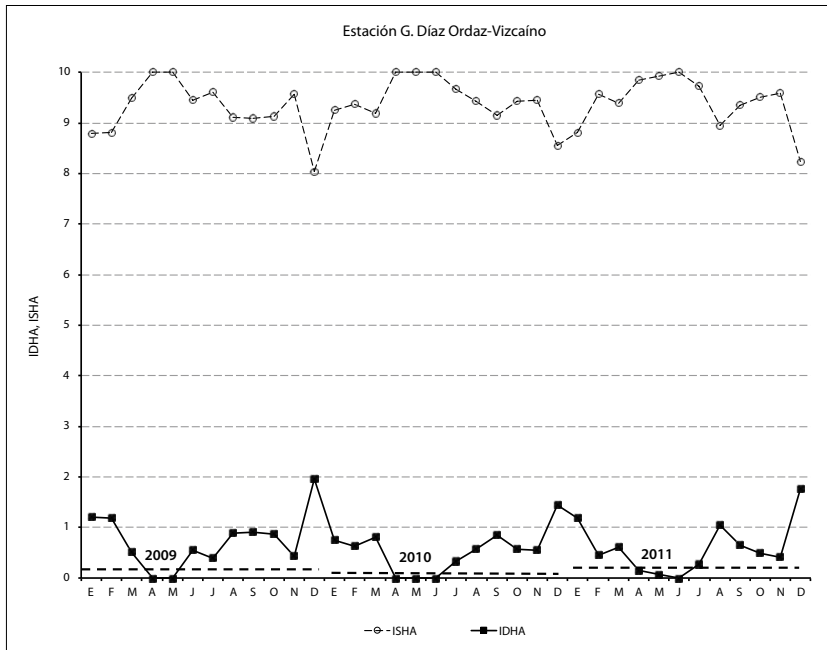


Figura 8. Fluctuación de los indicadores IDHA e ISHA, para el área de influencia de la estación G. Díaz Ordaz-Vizcaíno, municipio de Mulegé, BCS. Periodo 2009-2011.

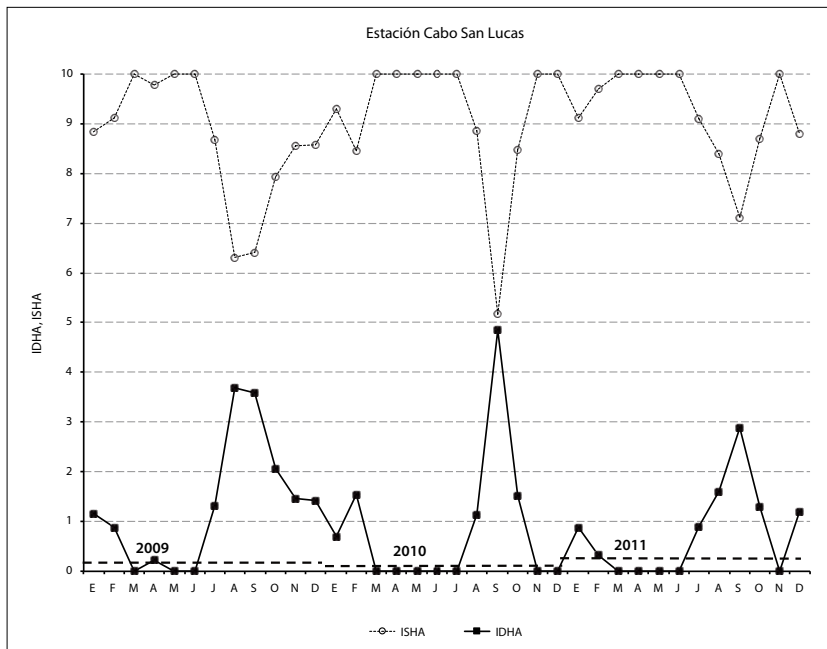


Figura 9. Fluctuación de los indicadores IDHA e ISHA, para el área de influencia de la estación Cabo San Lucas, municipio de Los Cabos, BCS. Periodo 2009-2011.

El déficit hidrometeorológico (evaporación menos precipitación) fue significativo. El de mayor magnitud correspondió a la estación ubicada en Ciudad Constitución, en el valle agrícola de Santo Domingo, principal zona agrícola de BCS.

En todas las estaciones, la mayoría de los meses presentaron un valor grande del indicador ISHA (sequía hidrológica ambiental), con un promedio estatal de ISHA = 9.0. A su vez, la BHE tiende a incrementarse y magnificarse en condiciones de cambio climático,

lo cual es más notorio desde el sur hacia el norte del estado. La BHE mayor que puede ocurrir corresponde a la región de Gustavo Díaz Ordaz-Vizcaíno. El valor estimado de BHE mínima es 7.23 (con 30% menos de PP y una temperatura incrementada en 3° C) y denota sequía extrema.

Una eventual degradación de la calidad del agua subterránea puede prevenirse o controlarse si los procesos involucrados son entendidos e integrados en proyectos de diagnóstico sobre la disponibilidad hídrica, en los planes de ordenamiento y en las políticas públicas de manejo sustentable de los recursos (Cardona *et al.*, 2004). Lo antes expuesto implica la necesidad de diseñar estrategias para optimizar las extracciones de los acuíferos, principal fuente de agua para el desarrollo de BCS.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Fondo SEP-CONACYT, Proyecto 0134460 *Determinación y construcción de indicadores de la huella hídrica y desertificación como consecuencia de la sobreexplotación agropecuaria y del cambio climático*.

REFERENCIAS

Amador García, A., E. Granados López and M. E. Mendoza (2011), "Three approaches to the assessment of spatio-temporal distribution of the water balance: the case of the Cuitzeo basin, Michoacán, Mexico", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 76, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 34-55.

Amestoy Alonso, J. y J. Amestoy García (2009), "Precipitaciones, aridez, sequía y desertificación de la comarca del campo de Cartagena", *Lurralde. Inves. Espac.*, núm. 32, pp. 119-154.

Cardona, A., J. J. Carrillo Rivera, R. Huízar Álvarez and E. Granel Castro (2004), "Salinization in coastal aquifers of arid zones: an example from Santo Domingo, Baja California Sur, Mexico", *Environmental Geology*, no. 45, pp. 350-366.

Carrillo Rivera, J. J., A. Cardona, R. Huízar Álvarez and E. Granel (2008), "Response of the interaction between groundwater and other components of the environment in Mexico", *Environmental Geology*, no. 55, pp. 303-319.

De Martonne, E. (1927), "Regions of interior-basin drainage", *Geographical Review*, vol. 17, no. 3, pp. 397-414.

Del Barrio, G. (coord.; 2001), *Assessing climate change effects on land use and ecosystems: from regional analysis to the European scale (ACCELERATES)*, Proyecto de Investigación, V Programa Marco de la Comisión Europea (2001- 2003), Estación Experimental de Zonas Áridas, CSIC, Almería.

Díaz Padilla, G., I. Sánchez Cohen, R. A. Guajardo Panes, A. L. Del Ángel Pérez, A. Ruíz Corral, G. Medina García y D. Ibarra Castillo (2011), "Mapeo del índice de aridez y su distribución poblacional en México", *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, vol. XVII, edición especial, pp. 267-275.

DOF (2009), "Acuerdo por el que se da a conocer la ubicación geográfica de 371 acuíferos del territorio nacional, se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de 282 acuíferos, y se modifica, para su mejor precisión, la descripción geográfica de 202 acuífero", *Diario Oficial de la Federación*, 28 de agosto, México.

DOF (2010), "Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios de disponibilidad media anual de las aguas subterráneas de 44 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológicas que se indican", *Diario Oficial de la Federación*, 8 de julio, México.

DOF (2011), "Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios de disponibilidad media anual de las aguas subterráneas de 50 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológicas administrativas que se indican", *Diario Oficial de la Federación*, 25 de enero, México.

Hubálek, Z. and M. Horáková (1988), "Evaluation of climatic similarity between areas in biogeography", *Journal of Biogeography*, no. 15, pp. 409-418.

Ibáñez, J., J. Martínez and S. Schnabel (2007), "Desertification due to overgrazing in a dynamic commercial livestock-grass-soil system", *Ecological Modelling*, vol. 205, no. 3-4, pp. 277-288.

Lambin, E. F., B. L. Turner, H. J. Geist, S. B. Agbola, A. Angelsen, J. W. Bruce, O. T. Coomes, R. Dirzo, G. Fischer, C. Folke, P. S. George, K. Homewood, J. Imbernon, R. Leemans, X. Li, E. F. Moran, M. Mortimore, P. S. Ramakrishnan, J. F. Richards, H. Skånes *et al.* (2001), "The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths", *Global Environmental Change*, vol. 11, no. 4, pp. 261-269.

Mercado Mancera, G., E. Troyo Diéguez, A. Aguirre Gómez, B. Murillo Amador, L. F. Beltrán Morales y J. L. García Hernández (2010), "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”, *Universidad y Ciencia*, vol. 26, núm. 1, pp. 51-64.
- ONU (1994), *Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación y la Sequía. Naciones Unidas - Centro de Información. México, Cuba y República Dominicana*, Organización de las Naciones Unidas, Informe oficial en línea http://www.cinu.org.mx/temas/des_sost/desert.htm. (04 de junio, 2012).
- Oropeza Orozco, O. (2004), “Evaluación de la vulnerabilidad a la desertificación”, en Martínez, J., A. Fernández Bremauntz y P. Osnaya (comps.), *Cambio climático: una visión desde México*, SEMARNAT-INE, pp. 303-314.
- Reynolds, J. F., F. T. Maestre, E. Huber-S., J. Herrick y P. R. Kemp (2005), “Aspectos socioeconómicos y biofísicos de la desertificación”, *Ecosistemas*, vol. 14, no. 3, pp. 3-21.
- Rosenzweig, C., D. Karoly, M. Vicarelli, P. Neofotis, O. Wu, G. Casassa, A. Menzel, T. L. Root, N. Estrella, B. Seguin, P. Tryjanowski, C. Liu, S. Rawlins and A. Imeson (2008), “Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change”, *Nature*, no. 453, pp. 353-357.
- Salinas Zavala, C. A., S. E. Lluch Cota e I. Fogel (2006), “Historia del desarrollo del cultivo invernal de trigo en cinco distritos de riego en el Desierto de Sonora, México”, *Interciencia* (Venezuela), vol. 31, núm. 4, pp. 254-261.
- Sánchez Torres Esqueda, G., J. E. Jospina Noreña, C. Gay García and C. Conde (2011), “Vulnerability of water resources to climate change scenarios. Impacts on the irrigation districts in the Guayalejo–Tamesí river basin, Tamaulipas, Mexico”, *Atmósfera*, vol. 24, no. 1, pp. 141-155.
- Simota, C. and M. Dumitru (2010), “Biophysical criteria designating agriculture drought affected areas in the context of climate changes”, *BALWOIS – Obriid*, pp. 1-10.
- Thorntwaite, C. W. (1931), “The climates of North America: According to a new classification”, *Geographical Review*, vol. 21, no. 4, pp. 633-655.
- Troyo Diéguez, E., A. Nieto Garibay, J. L. García Hernández, B. Murillo Amador y M. Cariño M (2008), “Diagnóstico agro-ambiental de Baja California Sur: estado actual y alternativas para el desarrollo agropecuario sostenible”, en Cariño, M. y M. Monteforte (eds.), *Del saqueo a la conservación: historia ambiental contemporánea de Baja California Sur, 1940-2003*, SEMARNAT-INE-UABCS-CONACYT, México, pp. 551-570.
- Troyo Diéguez, E., A. Cruz Falcón, M. Norzagaray Campos, L. F. Beltrán Morales, B. Murillo Amador, F. A. Beltrán Morales, J. L. García Hernández y R. D. Valdez Cepeda (2010), “Agotamiento hidroagrícola a partir de la Revolución Verde: extracción de agua y gestión de la tecnología de riego en Baja California Sur, México”, *Estudios Sociales*, vol. 18, núm. 36, pp. 177-201.
- Watkins, J. R. (1969), “The definition of the terms hydrologically arid and humid for Australia”, *Journal of Hydrology*, vol. 9, no. 2, pp. 167-181.