



MAPEO DEL ÍNDICE DE ARIDEZ Y SU DISTRIBUCIÓN POBLACIONAL EN MÉXICO

MAPPING OF THE ARIDITY INDEX AND ITS POPULATION DISTRIBUTION IN MEXICO

Gabriel Díaz-Padilla¹; Ignacio Sánchez-Cohen²; Rafael A. Guajardo-Panes^{1*}; Ana L. Del Ángel-Pérez¹; Ariel Ruíz-Corral⁴; Guillermo Medina-García⁵; Daniel Ibarra-Castillo⁶.

¹ CE Cotaxtla-INIFAP. km 34 Carr. Veracruz-Córdoba. C. P. 94270. Medellín de Bravo, Ver., MÉXICO. Correo: guajardo.rafael@inifap.gob.mx (*Autor para correspondencia)

²CENID-RASPA-INIFAP. Km. 6.5 Margen derecha del Canal Sacramento. C.P. 35140. Gómez Palacio, Dur., México.

⁴CE Altos de Jalisco-INIFAP. Km. 8 Carr. Tepatlán-Lagos de Moreno. C.P. 47600. Jalisco, Jal., México.

⁵CE Zacatecas. Km. 24.5 Carr. Zacatecas-Fresnillo. C.P. 98500. Calera de Víctor Rosales, Zac., México.

RESUMEN

Se delimitaron las zonas áridas y húmedas de México, mediante el Índice de Aridez (IA) de la UNEP ($IA = Pma / Evt$). La Precipitación Media Anual (Pma) y la Evaporación (Ev), provienen de registros de 2,165 y 1,750 estaciones del SMN, respectivamente. La Evapotranspiración Potencial (Evt) se calculó mediante la expresión $Evt = Ev * 0.8$. Se interpolaron las variables Pma y Evt con resolución de 90 m. y mediante álgebra de mapas se obtuvo el IA, clasificándolo de acuerdo a la UNEP y cuantificando su población. No se observaron diferencias significativas entre los valores calculados de Evt y los registrados en 30 estaciones del CLIMWAT-FAO ($P=0.489$). Se encontró que las zonas hiperáridas, áridas y semiáridas ocupan el 1, 27 y 35 % del territorio nacional y son habitadas por el 1, 7 y 33 % de la población nacional, respectivamente. Las zonas subhúmedas-secas, subhúmedas-húmedas y húmedas, ocupan el 11, 16 y 15 % del territorio nacional, y son habitadas por el 27, 15 y 16 % de los habitantes del país. Esto implica que 63 % del territorio nacional presenta algún nivel de aridez y que lo habita el 41 % de la población del país.

Recibido: 6 de septiembre, 2010
Aceptado: 25 de junio, 2011
doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.09.069
<http://www.chapingo.mx/revistas>

PALABRAS CLAVE:

Desertificación, GIS, evapotranspiración, precipitación, zonas áridas.

ABSTRACT

The arid and humid zones of Mexico were delimited using the Aridity Index (AI) adopted by the United Nations Environment Programme ($AI = Map / Evt$). Mean annual precipitation (Map) and evaporation (Ev) data were obtained from the records of 2,165 and 1,750 SMN (Mexico's weather service) stations, respectively. Potential evapotranspiration (Evt) was calculated using the expression $Evt = Ev * 0.8$. Both variables (Map and Evt) were interpolated with a resolution of 90 m. Map algebra and Geographic Information System (GIS) spatial techniques were used to obtain the AI, which was classified according to UNEP classes and its population quantified. There were no significant differences between the Evt calculated and the Evt recorded at 30 CLIMWAT-FAO stations ($P=0.489$). It was found that hyper-arid, arid and semi-arid zones occupy 1, 27 and 35 % of the country's total area and are inhabited by 1, 7 and 33 % of the population, respectively. The dry-subhumid, moist-subhumid and humid zones occupy 11, 16 and 15 % of the country's landbase and are inhabited by 27, 15 and 16 % of Mexico's inhabitants. This means that 63 % of the country has some level of dryness and is inhabited by 41 % of the nation's population.

KEY WORDS: Desertification, GIS, evapotranspiration, precipitation, arid zones.

INTRODUCCIÓN

Uno de los más graves problemas que impacta amplias extensiones de la superficie terrestre es la degradación de la tierra, que puede referirse como la reducción temporal o permanente en la capacidad productiva de ésta, como resultado de la acción humana (Bot *et al.*, 2000). Dicha degradación ocurre en cualquier parte de la superficie terrestre, pero sólo es definida como "desertificación" cuando ocurre en las tierras secas (LEAN, 2008 y Gnacadja, 2009). Este problema afecta a una sexta

INTRODUCTION

One of the most serious problems impacting large tracts of the Earth's surface is land degradation, which can be referred to as a temporary or permanent reduction in the productive capacity of an area as a result of human action (Bot *et al.*, 2000). This degradation can occur anywhere on the Earth's surface, but it is only defined as "desertification" when it occurs in drylands (Lean, 2008 and Gnacadja, 2009). This problem affects one sixth of the world's population, 70 % of its drylands and about 25

parte de la población mundial, al 70 % de las tierras áridas y a alrededor del 25 % de la superficie total del planeta, y de acuerdo con Shah (2010) y Aldamo (2003), las limitaciones medioambientales son consideradas como una de las principales causas del movimiento de poblaciones, especialmente en zonas secas, donde el agua y no la tierra es el principal factor limitante. En tierras secas, se conjugan cuatro de los más graves problemas que enfrenta la humanidad: baja disponibilidad de agua, degradación de la tierra, inseguridad alimentaria y migración. De acuerdo con Gnacadja (2009), conservar la tierra y el agua es igual a seguridad en un futuro común. Si bien el problema es complejo y de difícil solución, el primer paso es cuantificarlo y delimitarlo. Como lo acota Dregne (1985), "...La evaluación de la desertificación en un país es crucial para la comprensión y corrección del problema..." Por ello, los mapas nacionales de evaluación son necesarios para los planificadores y tomadores de decisiones.

Uno de los productos más importantes al respecto es el Atlas Mundial de Desertificación, desarrollado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés) y publicado en 1992 y 1997, en el cual se implementa una metodología sencilla y práctica para desarrollar un índice clasificatorio de la aridez, donde se describe que las tierras secas son aquellas zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas cuyo cociente P/PET está comprendido entre 0.05 y 0.65, en el que P es la precipitación anual media y PET la evapotranspiración potencial del cultivo de referencia, ambas expresadas en milímetros (UNEP, 1997) y en la cual la evapotranspiración se estimó a partir del método de Thornthwaite, encontrando que para México 61 % de su territorio presenta algún grado de aridez (Hiperárida 0.53 %, árida 22.9 % y semiárida 37.9 %). Mercado *et al.* (2010) realizaron un trabajo cuyo objetivo fue adaptar y calibrar el modelo de aridez hidroclimática propuesto por De Martonne mediante una modificación del mismo, para adecuarlo al estudio del balance hídrico en zonas áridas y semiáridas en las cuencas de La Paz y Comundú, ubicadas en el estado de Baja California Sur, en donde se determinó un índice promedio mensual de aridez para ambas zonas. Salinas *et al.* (1998) estudian las condiciones de aridez de la región del noroeste mexicano, formado por los estados que rodean el Golfo de California, definiendo un Índice de Cobertura Árida Anual (ICAA), el cual es utilizado para describir las variaciones de la extensión y localización de las zonas de aridez extrema entre los años 1950 y 1990, y mediante un análisis espacial de las zonas áridas se encontró que en la zona que comprende el Desierto de Altar y la porción meridional de la Península de Baja California, las condiciones de aridez son más persistentes que en el resto de la región estudiada. La SEMARNAT, en el año 2006, generó un mapa de las zonas secas de México, encontrando zonas muy áridas, áridas, semiáridas y subhúmedas secas en 65 % del territorio nacional, en donde 29 % corresponde a las zonas semiáridas y

% of the total area of the planet, and according to Shah (2010) and Aldamo (2003), these environmental constraints are considered one of the main causes of population movement, especially in dry areas where water and not land is the main limiting factor. In drylands, four of the most serious problems facing humanity are combined: low water availability, land degradation, food insecurity and migration. According to Gnacadja (2009), conserving land and water is equal to security in a common future. While the problem is complex and difficult to solve, the first step is to quantify and delimit it. As Dregne (1985) puts it, "...The assessment of desertification in a country is crucial for understanding and correcting the problem..." Therefore, national assessment maps are necessary for planners and decision-makers.

One of the most important tools in this respect is the World Atlas of Desertification, developed by the United Nations Environment Programme (UNEP) and published in 1992 and 1997, which provides a simple and practical methodology for developing a classificatory aridity index, which describes drylands as those arid, semi-arid and dry-subhumid zones whose P/PET ratio is between 0.05 and 0.65, where P is mean annual precipitation and PET the potential evapotranspiration of the reference crop, both expressed in millimeters (UNEP, 1997) and in which evapotranspiration is estimated using the Thornthwaite method. From this, it was found that 61 % of Mexico's land has some degree of aridity (0.53 % hyper-arid, 22.9 % arid and 37.9 % semi-arid). Mercado *et al.* (2010) conducted a study whose aim was to adapt and calibrate the hydro-climatic aridity model proposed by De Martonne to the study of water balance in arid and semi-arid zones in the La Paz and Comundú watersheds, located in the state of Baja California Sur, where a mean monthly aridity index was determined for both areas. Salinas *et al.* (1998) studied the aridity conditions in this region in northwest Mexico, formed by the states bordering the Gulf of California, defining an Annual Arid Cover Index (AACI) which is used to describe variations in the extent and location of areas of extreme aridity between the years 1950 and 1990, and through a spatial analysis of the arid zones it was found that in the area comprising the Altar Desert and the southern portion of the Baja California Peninsula, the arid conditions are more persistent than in the rest of the region studied. In 2006, Mexico's secretariat of the environment and natural resources, hereafter referred to by its Spanish acronym SEMARNAT, generated a map of Mexico's dry zones, finding hyper-arid, arid, semi-arid and dry-subhumid zones in 65 % of the country's total area, where 29 % corresponds to semi-arid zones and 22 % to dry-subhumid ones. In a thorough, well-documented and state-of-the-art study of desertification, drought and poverty, Winslow *et al.* (2004) highlight the need to increase understanding of the nature, extent and severity of desertification, drought and degradation in arguing for the development of more effective measuring and monitoring methods. In this regard, the Water Center for Arid and Semi-Arid Zones

22 % a las zonas subhúmedas secas. En un estudio exhaustivo y bien documentado del estado del arte de la desertificación, sequía y pobreza, Winslow *et al.* (2004) resaltan la necesidad de incrementar el entendimiento de la naturaleza, extensión y severidad de la desertificación, sequía y degradación de las zonas áridas para el desarrollo de métodos más efectivos para medirla y monitorearla. En este sentido, el Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y El Caribe (CAZALAC), contempla la elaboración de un mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas de esta región, para lo cual en 2004 se elaboró una metodología unificada, fundamentada en la planteada por la UNEP. La UNESCO publicó en 2007, el Atlas de Zonas Áridas de América Latina y el Caribe; en su informe indica que el número total de estaciones climáticas utilizadas en el caso de México fue de 934 con información registrada entre los años de 1970 y 1996, de las cuales sólo 19 disponen de datos completos; en sus conclusiones indican que la disponibilidad y calidad de los datos deberá mejorarse a nivel nacional. Tal es el caso en Cuba, donde Vázquez *et al.* (2007) mejoraron dicho mapa agregando mayor información, más actualizada y mapas de mejor resolución.

Es por lo anterior que se resalta la necesidad de conocer de manera más precisa la situación de las zonas áridas en México, apoyándose para ello en la metodología propuesta por la UNEP (1992) y CAZALAC (2006), mejorando la cantidad y calidad de la información climatológica, así como la resolución de los mapas y la interpolación espacial de los resultados puntuales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se evaluaron los registros históricos de 5,088 estaciones meteorológicas de la red de monitoreo climático del Servicio Meteorológico Nacional (SMN-CNA, 2004); se seleccionaron solo las estaciones que contenían un mínimo 20 años con registro de información, sin datos atípicos y con al menos 75 % de ésta, dentro del periodo 1961-2003 sin haber suspendido labores antes de 1990 (Díaz, 2009; Díaz *et al.*, 2007). Para su validación se empleó el programa de cómputo R-CLIMDEX (Zhang y Yang, 2004), y para completar la información faltante, el CLIMGEM, desarrollado por Nelson (2003).

Acorde a Gómez *et al.* (2008), en muchas regiones del planeta no siempre es posible incorporar factores en el análisis ecológico, debido, entre otras causas, a la escasez de estaciones climatológicas, por lo cual es necesario desarrollar procedimientos para extrapolar una pequeña cantidad de datos disponibles a una región completa. En este sentido, se evaluaron diferentes técnicas y programas de interpolación para generar mapas de precipitación pluvial y evaporación, y finalmente se decidió utilizar el programa Anusplin 4.3, el cual emplea la técnica de *thin plate smoothing spline* (Hutchinson, 2004), que

in Latin America and the Caribbean (hereafter referred to by its Spanish acronym CAZALAC) envisages making a map of arid, semi-arid and subhumid zones in this region, for which a unified methodology, based on that proposed by UNEP, was developed in 2004. In 2007, UNESCO published the Atlas of Arid Zones of Latin America and the Caribbean, indicating in its report that the total number of weather stations used in the case of Mexico was 934 with information recorded between 1970 and 1996; of the 934 stations, only 19 have complete data, the UNESCO report notes, adding in its conclusions that the availability and quality of the data must be improved nationwide. Such is the case in Cuba, where Vázquez *et al.* (2007) improved this map by adding more information, updating it and using higher-resolution maps.

The foregoing highlights the need to know more precisely the situation of the arid zones in Mexico, which can be achieved by relying on the methodology proposed by UNEP (1992) and CAZALAC (2006) and improving the amount and quality of the weather information, map resolution and the spatial interpolation of the localized results.

The historical records of 5,088 weather stations belonging to Mexico's national weather monitoring network (SMN-CAN, 2004) were assessed. We only selected stations having at least 20 years' worth of records, without outliers (atypical data) and with at least 75 % of this time within the period 1961-2002 without having suspended work before 1990 (Díaz, 2009; Díaz *et al.*, 2007). For validation we used the R-CLIMDEX computer program (Zhang and Yang, 2004), and to complete the missing information, CLIMGEM, developed by Nelson (2003).

According to Gómez *et al.* (2008), in many regions of the planet it is not always possible to incorporate factors in the environmental analysis due to, among other reasons, the scarcity of weather stations, making it necessary to develop procedures for extrapolating a small amount of available data to an entire region. In this regard, we evaluated different interpolation techniques and programs to generate rainfall and evaporation maps, and finally we decided to use the ANUSPLIN 4.3 program, which uses the thin plate smoothing spline technique (Hutchison, 2004), which correlates historical climate data with elevation data taken from the digital elevation model, resulting in a map with greater precision compared to models generated by other techniques evaluated by Díaz *et al.* (2008), who obtained good results by interpolating precipitation in windward and leeward areas of the Gulf of Mexico.

The resolution of the maps processed was 90 meters. The mean annual evapotranspiration model was obtained by multiplying the raster map of mean annual evaporation by a factor of 0.8 (García, 1979; Villalpando *et al.*, 1993 and Espitia *et al.*, 2001). Subsequently, and based on the

correlaciona los datos climáticos históricos frente a los datos de altitud tomados del modelo de elevación digital, dando como resultado un mapa con mayor precisión frente a los modelos generados por otras técnicas evaluadas por Díaz *et al.* (2008), en donde obtuvo buenos resultados al interpolar precipitación en zonas de barlovento y sotavento del Golfo de México.

La resolución de los mapas procesados fue de 90 m. El modelo de evapotranspiración media anual se obtuvo a partir de la multiplicación del mapa raster de evaporación media anual por el factor 0.8 (García, 1979; Villalpando *et al.*, 1993 y Espitia *et al.*, 2001). Posteriormente, y con base en la metodología de la UNEP, se obtuvo un mapa con los índices de aridez provenientes de la división de la precipitación y la evapotranspiración; dicho mapa se clasificó en seis rangos de aridez (Cuadro 1). Luego se realizó una prueba gráfica y exploratoria de los datos para valorar la clasificación de las superficies delimitadas para cada clase. Se analizó la información existente de bases climáticas de la FAO a través del software CLIMWAT 2.0 (FAO, 2010a) y se extrajeron las series históricas climáticas de 54 estaciones en México, mismas que se procesaron con el software CROPWAT 8.0 (FAO, 2010b) para obtener los promedios de precipitación y de evapotranspiración; el método empleado fue el de Penman-Monteith (Zotarelli *et al.*, 2010).

Se integró una tabla con la información de precipitación media anual, multiplicando la evapotranspiración por 365 con el fin de obtener un estimador medio anual; se identificó su índice de aridez y la clase de acuerdo a la clasificación de la UNEP. Posteriormente cada estación se integró al Sistema de Información Geográfica ArcView 3.2 y se les delimitó un área buffer de 5 kilómetros de radio, dado que las condiciones biofísicas más próximas a un punto central tienen una misma analogía climática; el objetivo fue obtener indicadores a partir de los píxeles tomando como referencia estos círculos concéntricos de 9,691 píxeles integrando unidades de evaluación de 78.5 km², esto para obtener los promedios de sus índices de aridez modelados y confrontarlos posteriormente contra los índices de aridez obtenidos a partir de la información que presentan Allen *et al.* (1998), en donde estiman la evapotranspiración con el método Penman-Monteith. Un segundo análisis consistió en realizar una prueba de hipótesis y de análisis de regresión lineal para verificar la semejanza de ambos indicadores utilizando Minitab® Release 14. En lo referente a la prueba de hipótesis, se empleó una prueba de *t* para comprobar diferencias por parejas ($\mu_1 - \mu_2 = \mu_d$). La hipótesis a probar fue $H_0: \mu_d \neq 0$ vs. $H_a: \mu_d = 0$, empleando el estadístico

$$t = \frac{\bar{d} - 0}{s_d / \sqrt{n}} = \frac{\bar{d}}{s_d / \sqrt{n}}$$

UNEP methodology, we obtained a map of aridity indexes by dividing precipitation by evapotranspiration; this map was classified into six aridity ranges (Table 1). Then we made an exploratory graphical test of the data to assess the classification of the areas delimited for each class. We analyzed the existing information in FAO's climatic database using CLIMWAT 2.0 software (FAO, 2010a) and extracted the historical climatic series of 54 weather stations in Mexico, which were processed with CROPWAT 8.0 software (FAO, 2010b) to obtain the precipitation and evapotranspiration averages; the Penman-Monteith method was used (Zotarelli *et al.*, 2010).

A table with the information about mean annual precipitation was added by multiplying the evapotranspiration by 365 to obtain mean annual estimates; the aridity index and class were identified according to the UNEP classification. Subsequently, each station was integrated into the ArcView 3.2 geographic information system and delineated with a 5-km-radius buffer area, given that the biophysical conditions within that entire buffer area are similar to those recorded for its central point. The goal was to obtain indicators from the pixels, taking as a reference these 9,691-pixel concentric circles by integrating evaluation units of 78.5 km² in order to obtain the averages for their modeled aridity indices and then compare them against the aridity indices obtained from the information presented by Allen *et al.* (1988), where evapotranspiration was estimated with the Penman-Monteith method. A second analysis consisted of conducting a hypothesis test and linear regression analysis to verify the similarity of two indicators using Minitab® Release 14. With regard to the hypothesis test, a *t*-test was used to check for differences in pairs ($\mu_1 - \mu_2 = \mu_d$). The hypothesis to be tested was $H_0: \mu_d \neq 0$ vs. $H_a: \mu_d = 0$, using the statistic

$$t = \frac{\bar{d} - 0}{s_d / \sqrt{n}} = \frac{\bar{d}}{s_d / \sqrt{n}}$$

where *n* is the number of differences in pairs and

$$s_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n - 1}}$$

RESULTS AND DISCUSSION

In relation to mean annual precipitation, it was observed that the most abundant rainfall occurs in the southeastern regions of the state of Chiapas, in the southern Tabasco-northern Chiapas region, and in northern Oaxaca, where recorded rainfall ranges between 3,000 and 3,800 mm. The opposite occurs in northern Mexico, where recorded rainfall is below 250 mm. Areas that stand out in

donde n es el número de diferencias por parejas y

$$s_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n - 1}}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En relación con la precipitación media anual, se observó que las precipitaciones más abundantes se presentan en regiones del sureste del estado de Chiapas, entre el sur de Tabasco y el norte de Chiapas, así como en el norte de Oaxaca, donde se llegan a registrar precipitaciones que oscilan entre los 3,000 y 3,800 mm. Caso contrario sucede en el norte del país, donde se registran precipitaciones por debajo de los 250 mm, en las que sobresale la región sur de Coahuila, el noroeste de Sonora y la mayor parte de la península de Baja California (Figura 1).



FIGURA 1. Distribución espacial de la precipitación pluvial anual en México.

FIGURE 1. Spatial distribution of annual rainfall in Mexico.

En cuanto a la evaporación media anual, se observó que las regiones con mayores niveles corresponden a estados que se ubican al norte del país. En ellos, se registran valores por encima de los 2,250 mm, en contraste con el sureste de México y regiones aisladas en el sur de Chihuahua y la franja este de Durango, así como el centro de Nuevo León, en los que se registran entre 1,000 y 1,250 mm de evaporación promedio al año (Figura 2).

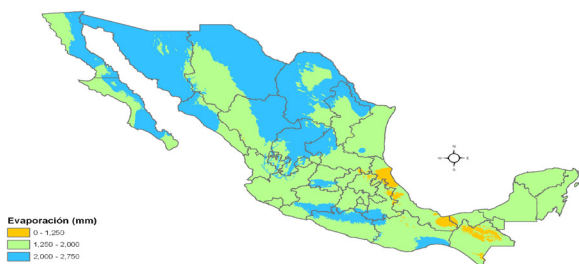


FIGURA 2. Distribución espacial de la evaporación media anual en México.

FIGURE 2. Spatial distribution of mean annual evaporation in Mexico.

this regard include southern Coahuila, northwestern Sonora and most of the Baja California peninsula (Figure 1).

In regards to mean annual evaporation, it was observed that states in the north of the country have the highest levels. Values above 2,250 mm are recorded in the north, in contrast to southeastern Mexico and isolated regions in southern Chihuahua and the eastern strip of Durango, as well as central Nuevo Leon, where mean annual evaporation is between 1,000 and 1,250 mm (Figure 2).

Subsequently, map algebra was performed to obtain a national evapotranspiration map. The resulting map shows that the oscillation ranges of potential evapotranspiration in the country are between 500 and 2,250 m (Figure 3).

Finally, we made the calculations for a map of aridity indices, which resulted from the ratios obtained by dividing rainfall by potential evapotranspiration. These indices were subsequently reclassified using the aridity classes proposed by UNEP (1992); the result of this map is shown in Figure 4.

The Figure 4 map and the information disaggregated in Table 1 show that the semi-arid class is the largest in the country, accounting for 69.2 million hectares (35 % of Mexico's total land area) inhabited by about 33.5 million people. The arid class is the second largest with an area covering slightly more than 43 million hectares (22 % of the total area), home to a little over 7.6 million people. It should be noted that hyper-arid zones are home to slightly more than one million people, spread over 2.5 million hectares, whose climate conditions are, without doubt, difficult.

Finally, in southeastern areas of Mexico, along the Sierra Madre del Sur, Sierra Madre Occidental, and the Neovolcanic Axis coastal sections, plus the Pacific Coast and Gulf of Mexico plains, there are dry-subhumid, moist-subhumid and humid conditions that cover 42 % of Mexico's landbase in which close to 59 % of the country's population lives (Table 1).

To verify the results of the aridity indices calculated, we compared them with the historical information from FAO, finding that 37 of the 54 stations corresponded with the aridity index map presented in Figure 4. Regarding the remaining 17 stations, it was observed that there was no similarity in seven of them because the data for mean annual precipitation was found to be under- or overestimated, causing variation in the aridity category. This led to considering the mean annual precipitation data from the National Water Commission (known by the Spanish acronym CONAGUA in Mexico), which was processed and refined (LADIGS, 2010) for that point or another one close to it. By recalculating the aridity index of these seven stations, they were correctly located in the class corresponding to the modeled map. Of the remaining 10 stations, eight of

Posteriormente se realizó álgebra de mapas para obtener un mapa nacional de evapotranspiración. El mapa resultante muestra que los rangos de oscilación de evapotranspiración potencial en el país se encuentran entre los 500 y los 2,250 mm (Figura 3).

Para finalizar, se calculó un mapa de índices de aridez, que resultó del cociente de dividir la precipitación pluvial entre la evaporación potencial, y posteriormente fue reclasificado tomando las clases de aridez propuestas por la UNEP (1992); el resultado de dicho mapa se muestra en la Figura 4.

Del mapa anterior y de la información desagregada en el Cuadro 1, se observa que la clase semiárida es la de mayor extensión en el país, al contar con 69.2 millones de hectáreas (35 % de la superficie total del país), y en la que habitan cerca de 33.5 millones de personas; en orden de extensión, sigue la región árida, con una superficie que supera por poco los 43 millones de hectáreas (22 % de la superficie nacional), y en ella habitan poco más de 7.6 millones de personas. Cabe destacar que en las zonas hiperáridas se encuentran establecidas poco más de un millón de personas, distribuidas a lo largo de 2.5 millones de hectáreas cuyas condiciones de adaptación al clima son, sin lugar a duda, difíciles.

Finalmente, en zonas del Sur-sureste de México, costas de la Sierra Madre del Sur, Sierra Madre Occidental, Eje Neovolcánico así como en las Llanuras de la Costa del Pacífico y del Golfo de México, se registran condiciones subhúmedas secas, subhúmedas húmedas y húmedas, que cubren 42 % del territorio nacional y en el que habita cerca del 59 % de la población de nuestro país (Cuadro 1).

Para verificar los resultados de los *I_a* calculados, se confrontó la información histórica proveniente de la FAO y se encontró que en 37 de las 54 estaciones hubo correspondencia con el mapa de índice de aridez presentado en la Figura 4. En lo referente a las 17 estaciones restantes se observó que en siete de ellas no hubo semejanza, pues el dato se encontraba sub o sobrecalculado en precipitación media anual, provocando que hubiera variación de la categoría de aridez; esto motivó que se consideraran las precipitaciones medias anuales provenientes de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) procesadas y depuradas (LADIGS, 2010) para ese punto o algún otro más cercano. Al recalcular el índice de aridez de estas siete estaciones, se ubicaron correctamente en la clase correspondiente al mapa modelado. De las restantes 10 estaciones, ocho de ellas se encuentran a una distancia entre 1 y 5 km de la clase que se obtuvo en el mapa, posiblemente resultado de las referencias espaciales tomadas del programa CLIMWAT 2.0 (FAO, 2010a), ya que sólo definen dos posiciones decimales en su ubicación geográfica; sin embargo, dada la cercanía a la clase modelada de aridez, se pueden

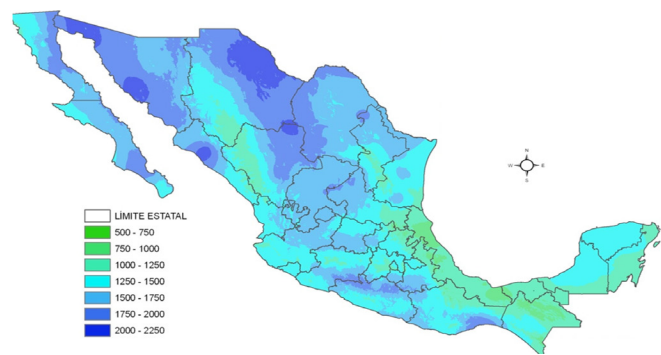


FIGURA 3. Distribución espacial de la evapotranspiración potencial en México.

FIGURE 3. Spatial distribution of potential evapotranspiration in Mexico.



FIGURA 4. Delimitación espacial del índice de aridez en México con base en la clasificación de la UNEP (1992).

FIGURE 4. Spatial delineation of the aridity index in Mexico based on the UNEP classification (1992).

them are at a distance of between 1 and 5 km from the class that was obtained on the map, possibly resulting from the spatial references taken from the CLIMWAT 2.0 program (FAO, 2010a), since they only define two decimals in their geographic location; however, given the proximity to the modeled aridity class, they can be considered as a good estimate and therefore valid. Finally, the two remaining stations are categorized into different classes with respect to the map in Figure 4. Based on the above, it can be concluded that 52 of the 54 CLIMWAT stations (FAO, 2010a), in which evapotranspiration was calculated by the Penman-Monteith method, in the CROPWAT 8.0 computer program (FAO, 2010b), have an acceptable correspondence with the aridity index modeled in this work.

In relation to the *t*-test to check for differences between the aridity index values calculated with the CLIMWAT 2.0 information (FAO, 2010a) (AI-CROPWAT) and those calculated with the national meteorological service information (AI-SMN), we observed no statistical evidence to reject $H_0: \mu_d=0$ given that $p=0.489$.

The foregoing leads to the conclusion that there is no difference between the Aridity Index obtained from the SMN meteorological data (2004), where *E_{tp}* was held to be 0.8 of evaporation, and the Aridity Index obtained from the

CUADRO 1. Desagregación de las clases del Índice de Aridez (IA) y su correspondiente población.

TABLE 1. Breakdown of the Aridity Index (AI) classes and their corresponding population.

Clase de aridez	$\frac{Pma}{Evt}^z$	Población ^y	Población (%)	Superficie (ha)	Superficie (%)
Hiperárida	< 0.05	1,062,440	1	2,560,325	1
Árida	0.05 - 0.20	7,642,095	7	43,058,007	22
Semiárida	0.20 - 0.50	33,536,455	33	69,231,040	35
Subhúmeda seca	0.50 - 0.65	28,185,085	27	20,573,706	11
Subhúmedas húmeda	0.65 - 1.00	15,601,903	15	31,108,556	16
Húmedas	> 1.00	16,701,441	16	28,494,505	15
Total		102,729,419	100 %	195,026,139 ^x	100 %

^z Pma=Precipitación media anual y Evt= Evapotranspiración media anual.

^x Los datos de población provienen del Censo de Población y Vivienda 2005.

^y Sólo se considera superficie continental, y la diferencia en relación con lo reportado al INEGI (2010) se debe a los algoritmos empleados en el software para el cálculo de superficies y la escala de la cartografía empleada, la cual fue de 1:250,000.

^z PMA=Spanish acronym for mean annual precipitation and Evt= mean annual evapotranspiration.

^x The population data come from the 2005 Population and Housing Census.

^y Only continental land area is considered, and the difference compared with that reported by INEGI (2010) is due to the algorithms used in the software for calculating areas and the map scale used, which was 1:250,000.

considerar como buena estimación y por lo tanto válidas. Finalmente, las dos estaciones restantes están calificadas en diferentes clases con respecto al mapa de la Figura 4; por lo anterior, se puede concluir que 52 de las 54 estaciones provenientes de CLIMWAT 2.0 (FAO, 2010a), y en las cuales se calculó la evapotranspiración mediante el método de Penman-Monteith, en el CROPWAT 8.0 (FAO, 2010b), poseen una correspondencia aceptable respecto al Índice de Aridez modelado en el presente trabajo.

En lo relacionado con la prueba de *t* para probar diferencia entre los valores del índice de aridez calculado con la información del CLIMWAT 2.0 (FAO, 2010a) (IA-Cropwat) y los calculados con la información del Servicio Meteorológico Nacional (IA-SMN), se observó que no existe evidencia estadística para rechazar $H_0: \mu_d=0$ dado que $p=0.489$.

Lo anterior permite concluir que no existe diferencia entre el Índice de Aridez que se obtuvo de los datos meteorológicos del SMN (2004), donde se consideró que la *Etp* es el 0.8 de la evaporación y el Índice de Aridez a partir de la información de CLIMWAT 2.0 (FAO, 2010a), donde se considera que la *Etp* fue estimada mediante el método Penman-Monteith. Subsecuentemente, con análisis de regresión entre el Índice de Aridez derivado de la información de CLIMWAT 2.0 (FAO, 2010a) (IA-Cropwat) y el del SMN (IA-SMN), se detectaron observaciones atípicas, las cuales se eliminaron, y en un análisis posterior se observó un valor de $r=0.9572$ (Figura 5).

El uso de la prueba de *t*, y el análisis de regresión permitieron realizar una validación de los resultados obtenidos entre modelo desarrollado y la información generada por CLIMWAT 2.0 (FAO, 2010a), lo que permite establecer que la precisión de este trabajo es aceptable

CLIMWAT 2.0 information (FAO, 2010a), where *Etp* was estimated by the Penman-Monteith method. Subsequently, with regression analysis between the Aridity Index derived from the CLIMWAT 2.0 information (FAO, 2010a) (IA-CROPWAT) and the SMN (IA-SMN) data, outliers were detected and removed, and further analysis showed a value of $r=0.9572$ (Figure 5).

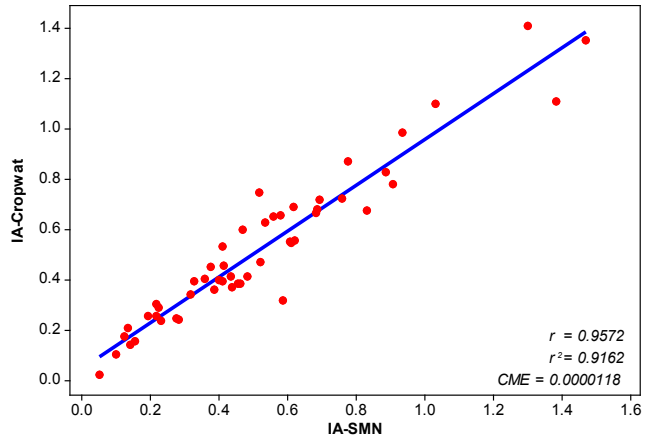


FIGURA 5. Análisis de regresión lineal entre el IA-Cropwat y IA-SMN sin considerar observaciones atípicas.

FIGURE 5. Linear regression analysis between the IA-CROPWAT and IA-SMN excluding outliers.

Using the *t*-test and regression analysis allowed for a validation of the results obtained between the model developed and the information generated by CLIMWAT 2.0 (FAO, 2010a), thus establishing that the accuracy of this work is acceptable and can be considered as an update of the zoning of arid zones in Mexico, given that a greater amount of climate information was also used in a longer time period, resulting in greater precision mapping information.

y puede considerarse como una actualización de la zonificación de zonas áridas en México, dado que también se empleó una mayor cantidad de información climática en un periodo temporal más amplio, generando información cartográfica de mejor precisión.

Con base en los resultados obtenidos, se observó que si bien la CONAZA, la UNEP, y la SEMARNAT cuentan con procesos metodológicos para la estimación de superficies en condiciones de aridez, el presente trabajo desarrolló una metodología sencilla y de fácil aplicación mediante el empleo de información de libre acceso tanto en la FAO como en el SMN. De acuerdo a los resultados generados de este trabajo comparado con el llevado a cabo por CONAZA/UACH (2004) se observa que las zonas con algún grado de aridez aumentaron en casi 11 %. Cabe señalar que en dichas áreas incide un total de 77,103 localidades con poco más de 42 millones de habitantes (41.1 % de la población total), de éstas el 98 % son localidades rurales, con una población que asciende a poco más de 8 millones de habitantes (9 % de la población nacional) donde las afectaciones por condiciones de sequía son severas y se carece de la infraestructura hidráulica necesaria para subsistir.

CONCLUSIONES

Este trabajo permitió contar con un mapa actualizado que delimita zonas que se encuentran bajo algún nivel de condición de aridez en México, considerando 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-Monteith. En este mapa se observa que el 63 % de la superficie nacional se encuentra bajo algún tipo de aridez y que en ella habita el 41 % de la población nacional, poco menos de la mitad; lo anterior permite establecer que es necesario considerar el incremento de obras destinadas para la captación y almacenaje de agua tanto para uso doméstico como para actividades agropecuarias, las cuales son vitales para el sustento de los residentes de las zonas en cuestión.

En este orden hay que considerar lo planteado por Sánchez *et al.* (2008), quien señala que el estudio de las variaciones climáticas del pasado es de gran importancia para prever el futuro y de esta manera estar en mejores posibilidades de tomar decisiones adecuadas, las cuales permitirán disminuir el riesgo implícito en los cambios del clima.

LITERATURA CITADA

- ALDAMO, S. B. 2003. Vulnerable people in fragile lands: Migration and desertification in the drylands of Argentina. The case of the department of Jáchal. PhD thesis. The University of Texas, Austin. 313 p.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA L. S.; RAES, D.; SMITH, M. 1998. Crop

Based on the results obtained, it was observed that while CONAZA, UNEP, and SEMARNAT have methodological processes for estimating areas in arid conditions, this study developed a simple and easily-applied method by using freely-accessible information from both FAO and SMN. According to the results generated by this work compared to the one carried out by CONAZA/UACH (2004), it was observed that areas with some degree of aridity increased by almost 11 %. It should be noted that these areas encompass a total of 77,103 communities with slightly more than 42 million inhabitants (41 % of the total population). Of these communities, 98 % are rural towns with a combined population totaling just above 8 million (9 % of Mexico's population) where the damage caused by drought conditions is severe and residents lack the water infrastructure necessary to maintain their livelihoods.

CONCLUSIONS

This work resulted in the creation of an updated map that delineates areas under some level of aridity in Mexico, taking into account that 80 % of evaporation becomes evapotranspiration and that this indicator can be considered as an approximation of the one proposed by FAO based on the Penman-Monteith calculation. This map shows that 63 % of Mexico's landbase is under some type of aridity and is inhabited by 41 % of the national population, or just under half. The foregoing establishes the need to consider increasing work projects for capturing and storing water for both domestic use and agricultural activities, which are vital to the livelihoods of the residents in the areas concerned.

We must therefore consider the viewpoint expressed by Sánchez *et al.* (2008), who contend that the study of past climate changes is of great importance in predicting the future and thus being better able to make appropriate decisions, which will decrease the risk involved in climate change.

End of English Version

- evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO. Rome, Italy. 322 p. (Irrigation and Drainage Papers 56).
- BOT, A. J.; NACHTERGAELE, F.; YOUNG, A. 2000. Land resource potential and constraints at regional and country levels. FAO. Rome, Italy. 122 p.
- CAZALAC. 2006. (Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe). Zonación de los Regímenes Hídricos de América Latina y el Caribe desde una Perspectiva Climática. IV Foro Mundial del Agua con sede en México. PHI-UNESCO-Flemish Government. 24 p.
- CONAZA/UACH. 2004. (Comisión Nacional de Zonas Áridas/Universidad Autónoma Chapingo). Escenarios Climatológicos de la República Mexicana ante el Cambio Climático. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. México. 169 p.
- DÍAZ, P. G. 2009. Variación espacio-temporal de la precipitación pluvial

en México: Una aproximación a la evaluación de impactos. Tesis doctoral. Instituto Tecnológico de Sonora. Ciudad Obregón, Sonora. 152 p.

- DÍAZ, P. G.; SÁNCHEZ, C. I.; QUIROZ, R.; GARATUZA, P. J.; WATTS, T. C.; CRUZ, M. R. 2008. Interpolación espacial de la precipitación pluvial en la zona de barlovento y sotavento del Golfo de México. *Agricultura Técnica en México* 34(3): 279-287 pp.
- DÍAZ, P. G.; SÁNCHEZ, C. I. 2007. Sistema de consulta y procesamiento de información climatológica de México. *In: Sánchez, C. I.; Chebhouni, G. (eds.). Procesos Hidrológicos en Zonas Áridas y Semiáridas-De la investigación a la Acción.* INIFAP. Gómez Palacio, Durango, México. 22-39 pp.
- DREGNE, H. E. 1985. *Desertification of arid lands.* 2nd. ed. Harwood Academic Publishers. 242 p.
- ESPITIA, E. L.; SANTAMARÍA, E. C.; CASTRO, F. R. 2001. Generación, calibración y evaluación de modelos empíricos para estimar la evapotranspiración potencial en la Comarca Lagunera. *Revista Chapingo, Serie Zonas Áridas* 2(2): 114-118.
- FAO. 2010a. (Food and Agriculture Organization). CLIMWAT (Version 2) [Software de cómputo de libre acceso]. Water Development and Management Unit and the Climate Change and Bioenergy Unit of FAOWATER. http://www.fao.org/nr/water/infoces_databases_climwat.html
- FAO. 2010b. (Food and Agriculture Organization). CROPWAT (Version 8) [Software de cómputo de libre acceso]. Land and Water Development Division of FAO. http://www.fao.org/nr/water/infoces_databases_cropwat.html
- GARCÍA, B. J. 1979. Estructura metodológica para la caracterización agroecológica de áreas por procedimientos cuantitativos de análisis y su posterior zonificación. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México. 401 p.
- GNACADJA, L. 2009. Conserving land and water for a secure future. *Environmental Policy and Law* 39(3): 328-330.
- GÓMEZ, J. D; ETCHEVERS, J. D.; MONTERROSO, A. I.; GAY, C.; CAMPO, J.; MARTINEZ M. 2008. Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmósfera* 21(1): 35-56.
- HUTCHINSON, M. F. 2004. Anuspline (Versión 4.3) [Software de cómputo]. Center for Resource and Environment Studies. The Australian National University. Canberra, Australia.
- INEGI. 2010. (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). Marco geoestadístico 2010 versión 5.0. Extraído el 10 de febrero de 2010 desde http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/M_Geoestadistico.aspx.
- LADIGS. 2010. (Laboratorio de Agromapas Digitales). Estadísticas climatológicas básicas de los estados de la República mexicana: (Periodo 1961-2003). INIFAP. Xalapa, Veracruz. México. <http://agromapas.inifap.gob.mx/publicaciones.html>
- LEAN, G. 2008. Down to earth: A simplified guide to the Convention to Combat Desertification, why it is necessary and what is important and different about it. UNCCD. Bonn, Germany. 36 p.
- MERCADO M., G; TROYO D., E.; AGUIRRE G., A; MURILLO A., B.; BELTRÁN M., L. F.; GARCÍA H., J. L. 2010. Calibración y aplicación del índice de aridez De Martonne para el Análisis del déficit hídrico como estimador de la aridez y desertificación en zonas áridas. *Universidad y Ciencia* 26(1): 51-64.
- NELSON, R. 2003. ClimGen: Weather Generator (Version 4.01.05). [Software de cómputo de libre acceso]. Washington State University. <http://www.bsyse.wsu.edu/climgen>.
- SALINAS Z., C.A.; LLUCH B., D; HERNÁNDEZ V., S. y LLUCH C., D.B. 1998. La aridez en el noreste de México. Un análisis de su variabilidad espacial y temporal. *Atmósfera* 11(1): 29-44.
- SÁNCHEZ C., I.; DÍAZ P., G.; ESTRADA A., J. y CUETO W., J. A. 2008. Incertidumbre climática y toma de decisiones. Consideraciones de riesgo y vulnerabilidad social. CENID-RASPA-INIFAP. Gómez Palacio, Durango. 55 p.
- SEMARNAT. 2006. (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). Informe de la situación del medio ambiente en México: Compendio de estadísticas ambientales. SEMARNAT. México D.F. 134-144 pp.
- SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL-COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. 2004. (SMN-CNA). Base de datos climáticos diarios de estaciones climatológicas de la República Mexicana.
- SHAH, A. 2010. Land degradation and migration in a dry land region in India: extent, nature and determinants. *Environment and Development Economics* 15(2): 173-196.
- UNEP. 1997. (United Nations Environment Programme). World Atlas of Desertification. 2nd. ed. Oxford University Press. 182 p.
- UNEP. 1992. (United Nations Environment Programme). World Atlas of Desertification. Oxford University Press. 69 p.
- UNESCO, 2007. (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). Zonación de los Regímenes Hídricos de América Latina y el Caribe desde una Perspectiva Climática: Dentro del marco del proyecto "Elaboración del Mapa de Zonas Áridas, Semiáridas y Subhúmedas de América Latina y el Caribe". PHI-LAC. Montevideo, Uruguay. 32 p.
- VÁZQUEZ, R.; FERNÁNDEZ, A.; SOLANO, O. 2007. Mapa de aridez de Cuba. *Zonas Áridas.* 11(1). 101-109 pp.
- VILLALPANDO F.; GARCÍA, E. 1993. Agroclimatología del estado de Jalisco. Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Laboratorio Bosque La Primavera. Guadalajara, Jalisco. México. 40 p.
- WINSLOW, M.; SHAPIRO, B. I.; THOMAS, R.; SHETTY, S. V. R. 2004. Desertification, drought, poverty and agriculture: research lessons and opportunities. Aleppo, Syria; Patancheru, India; and Rome, Italy: International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA), and the International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT), and the UNCCD Global Mechanism (GM). 52 p.
- ZHANG, X.; YANG, F. 2004. RCLimDex 1.0. Departamento de Investigación Climática del Servicio Meteorológico de Canadá. <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.html>.
- ZOTARELLI, L.; DUKES, M. D.; ROMERO, C. C.; MIGLIACCIO K. W.; MORGAN, K. T. 2010. Step by step calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method). Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida. 12 p.