



Acta Universitaria

ISSN: 0188-6266

actauniversitaria@ugto.mx

Universidad de Guanajuato

México

Rosas Ávila, Joel; García Romero, Árturo; López García, José; Manzo Delgado, Lilia

Análisis multicriterio para la delimitación de una región árida del centro de México

Acta Universitaria, vol. 25, núm. 4, julio-agosto, 2015, pp. 11-25

Universidad de Guanajuato

Guanajuato, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41641384002>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Análisis multicriterio para la delimitación de una región árida del centro de México

Multi-criteria analysis to delimit an arid region in central Mexico

Joel Rosas Ávila*, Árturo García Romero*, José López García*, Lilia Manzo Delgado*

RESUMEN

Se aplica el análisis multicriterio a la delimitación de una región de amplio interés hidrológico, biológico y cultural del centro de México, conocida como el Valle del Mezquital, donde la falta de una delimitación de carácter integral ha propiciado ambigüedades en su conceptualización. El análisis multicriterio consistió en una sobreposición ponderada de aspectos estructurales, bioclimáticos, geomorfométricos e históricos; e indicó que el Valle del Mezquital se distingue por relieves de curvatura lineal, modelados sobre rocas volcanoclasticas, condiciones de temperatura y precipitación que denotan un ambiente árido, afín a *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M. C. Johnst; suelos de tipo feozem y vertisol sometidos a riego, además de incluir el 55% de las localidades históricas de la etnia *hñahñu*. El estudio permitió reconocer aspectos intrínsecos de la región considerados importantes para promover la identidad endógena, favorecer la indicación geográfica y realizar un adecuado manejo y gestión de los recursos naturales en el Valle del Mezquital.

ABSTRACT

A multi-criteria analysis applies to the delimitation of a region of hydrological, biological, and cultural wide interest in central Mexico, known as the Mezquital Valley, where the lack of a delimitation of integral character has favored ambiguities in its conceptualization. Multi-criteria analysis consisted on a weighted overlay of structural, bioclimatic, geomorphometric, and historic factors. This analysis showed that the Mezquital Valley is distinguished by geological reliefs composed of volcaniclastic rocks, a linear curvature, temperature and precipitation conditions that indicate an arid environmental favorable for the establishment of *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C.Johnst, feozem and vertisol soil types subject to irrigation, and 55% of the localities of the *hñahñu* ethnic group. The study allowed recognize the intrinsic aspects considered important for promoting the identity of the region, favoring the geographic indication, and an appropriate management of the natural resources in the Mesquital Valley.

Recibido: 18 de abril de 2015

Aceptado: 9 de julio de 2015

Palabras clave:

Mesquite; *hñahñu*; aridez; región; análisis multicriterio.

Keywords:

Mesquite; *hñahñu*; aridity; region; multicriteria analysis.

Cómo citar:

Rosas Ávila, J., García Romero, A., López García, J., & Manzo Delgado, L. (2015). Análisis multicriterio para la delimitación de una región árida del centro de México. *Acta Universitaria*, 25(4), 11-25.
doi: 10.15174/au.2015.772

INTRODUCCIÓN

La *región* es una representación espacial extremadamente diversa en cuanto a su extensión y contenido, lo que influye a que sea compleja su descripción (Da Costa-Gomes, 2000; Frémont, 1976; Giménez, 2005; van Young, 1992). No obstante, su carácter integral le permite fungir como escenario adecuado para destacar la identidad del espacio social, donde los individuos encuentran algunos de sus valores, se identifican y comparten ciertas características inherentes del entorno (Bürgi, Hersperger & Schneeburger, 2004; Di Méo, 1999). La región es de gran utilidad en estudios de carácter holístico, proporciona una visión de los recursos (Bürgi *et al.*, 2004; García-Aguirre, Ortiz, Zamorano & Reyes, 2007) y permite con base en una caracterización física, biológica y cultural la delimitación de los territorios.

* Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Coyoacán, México, D.F., C.P. 04310. Correo electrónico: jrosav@hotmail.com

La complejidad que implica la integración y síntesis ambiental ha incrementado el interés por las técnicas de evaluación multicriterio, que en asociación con los sistemas de información geográfica (SIG) permiten analizar de manera simultánea la heterogeneidad ambiental de una condición o proceso específico (Ceballos-Silva & López-Blanco, 2003; Geneletti, 2007), así como resolver los problemas relacionados con el turismo, la gestión del agua, la planificación del uso del suelo, el transporte, la eliminación de residuos, la planeación urbana y la conservación y restauración ambiental, entre otros (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio], 2015; García & Córdoba, 2010; Gómez & Barredo, 2006; Malczewski, 2006). Sin embargo, las investigaciones relacionadas con la aplicación de técnicas automatizadas, donde se conectan las características intrínsecas de un territorio con la finalidad de especificar y establecer los límites de regiones, son escasos; en la mayoría de las veces asumen que una región está definida por límites geopolíticos, hidrológicos, geológicos, o bien, sólo relacionan aspectos climáticos con el objeto de identificar aspectos puntuales del territorio analizado (Benedetti, 2009; Dang, Yan & Liu, 2000; Gaspar-Avellaneda, 2006; Geo-Mexico, 2015; Giorgi, 2008).

Las regiones áridas en México representan el 41% del territorio del país y albergan el 18% de la población nacional (González-Medrano, 2012); se distinguen por presentar una evaporación potencial mucho mayor que la precipitación anual (García, 2004), suelos bien consolidados en superficies con escasa pendiente y una vegetación muy diversa en formas de vida (Rzedowski, 1978). Las limitantes hídricas imperantes en las regiones áridas aumentan los impactos negativos relacionados con la escasez de agua, la desertificación y la sequía, lo que dificulta el desarrollo social y la conservación de sus ecosistemas (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO, por sus siglas en inglés], 2010).

El presente estudio aborda el caso de una región árida del centro de México conocida como Valle del Mezquital, donde la falta de una robusta delimitación propicia una crisis de identidad y una deficiente gestión de los recursos. El objetivo es delimitar espacialmente la región del Valle del Mezquital, a partir de un análisis multicriterio basado en aspectos físicos, biológicos y culturales; dicha delimitación ofrecerá argumentos de estudio a los trabajos que promueven la identidad de las comunidades locales, el mantenimiento de los recursos y la sostenibilidad de los servicios ambientales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área en estudio

Localizado en el centro de México, el Valle del Mezquital es un área biogeográficamente singular, ya que define el límite meridional del gran desierto chihuahuense. El significado de su nombre hace referencia a un valle en el que hasta el siglo XVIII se extendía una comunidad vegetal (mezquital) representada por *Prosopis laevisgata* (López-Aguilar & Fournier, 2009). Además del interés biológico y físico, el Valle del Mezquital destaca por ser un punto de confluencia de culturas mesoamericanas de gran importancia del centro de México. Entre ellas, el grupo étnico *hñahñu*, que ocupó una extensa superficie del valle hasta antes del siglo XV (López-Aguilar & Bali-Chávez, 2002); posteriormente, debido a pugnas con otras etnias, su población se estableció en lugares de difícil acceso y poco adecuados para la siembra (Moreno-Alcántara, Garret-Ríos & Fierro-Alonso, 2006). En general, las poblaciones humanas del Valle del Mezquital demostraron un uso eficiente del ambiente, basado en un aprovechamiento de los recursos acordes con los gradientes ambientales (López-Aguilar & Fournier, 2009). En las décadas posteriores a la colonización de México (siglo XVI), los extensos matorrales que cubrían el área se sometieron a un indiscriminado pastoreo de ovejas, que propició un intenso proceso de degradación ambiental (Melville, 1990). Después, entre los siglos XVII y XIX, el uso de las aguas de los ríos Tula y El Salado favorecieron la implementación de sistemas de riego y el predominio de prácticas agrícolas (Ramírez-Calva, 2013), sin embargo, la consolidación agrícola del Valle del Mezquital ocurrió a partir de la construcción del gran canal del desagüe de la Ciudad de México, a finales del siglo XIX, el cual permitió utilizar las aguas residuales y pluviales para expandir la agricultura de riego, a través del establecimiento de una importante red de canales de los sistemas de riego de Tula y Alfajayucan (Carmona-Paredes & Muñiz-Arcila, 2014; Romero-Álvarez, 1997). En la actualidad, el Valle del Mezquital es altamente productivo en cultivos de maíz, trigo, sorgo y alfalfa (Romero-Álvarez, 1997); presenta una importante actividad industrial enfocada en la explotación de roca sedimentaria para la obtención de cemento y cal, así como actividades turísticas de esparcimiento (balnearios). Dichas actividades productivas han propiciado un continuo deterioro ambiental y no han mejorado los niveles de bienestar social, que se expresan en una acelerada pérdida de identidad que afecta la vida interna de los habitantes, quienes actualmente han sufrido importantes transformaciones en su concepción del Valle del Mezquital (Moreno-Alcántara *et al.*, 2006).

Flujo de trabajo

El procedimiento para delimitar el Valle del Mezquital, a partir de un modelo que incluyera sus características representativas, se basó en la selección de criterios, la obtención de submodelos, la reclasificación de valores, la ponderación de componentes y criterios, la suma ponderada y la homogenización del modelo. Las tres etapas generales consistieron en: (1) conceptualización del área en estudio, (2) obtención de componentes ambientales y (3) análisis multicriterio. El procesamiento de la información *raster*, la ponderación de los componentes y de los criterios constituyeron los ejes para la generación del modelo de delimitación (figura 1).

Conceptualización del área en estudio

Una revisión bibliográfica y cartográfica exhaustiva reveló la existencia de una multiplicidad de delimitaciones del Valle del Mezquital, las cuales parten de distintos enfoques y criterios, entre los que se incluyen aspectos hidrológicos, edafológicos, geomorfométricos, ecológicos, políticos, económicos, históricos, etnográficos y arqueológicos.

La primera descripción sobre la extensión y límites de la región que data de 1755 menciona que la Provincia del Mezquital es particularmente desapacible, cubierta

de plantas espinosas, entre las que se dispersan algunas haciendas; se señala que la presencia mayoritaria es de la etnia *hñahñu*, y que el área estaba dedicada a la jarcia, obtención de sal, labranza y engorda de ganado cabrío y ovejuno (De Villaseñor, 2005).

A pesar de la importancia económica y cultural del Valle del Mezquital, el primer trabajo que presentó un mapa con los límites de la región se publicó en el estudio de González-Quintero (1968). A partir de entonces, la tendencia en los límites propuestos denota un incremento, de manera que los estudios subsecuentes extienden los límites más allá de lo que homogéneamente corresponde a la región. Las propuestas planteadas pertenecen a una lista acotada de enfoques que se detallan a continuación:

Enfoque hidrológico. Es uno de los criterios más recurrentes, bajo el cual el Valle del Mezquital ha sido delimitado en función de su pertenencia a la cuenca hidrográfica del río Tula, o a la serie de cuencas en las que ésta se organiza (López-Zepeda, 2007), y en las que se encuentran diversos valles como el de Actopan, Alfajayucan, Ixmiquilpan, Mixquiahuala, Tepetitlán, Tezontepec, Tula y Zimapán (González-Medrano, 2012; Espino-Ortega & De la Cruz-López, 2009). Otros trabajos mencionan su origen lacustre, su relación con el acuífero del basamento y su ubicación en las depresiones del relieve montañoso de la Mesa Central (Bravo, 1937).

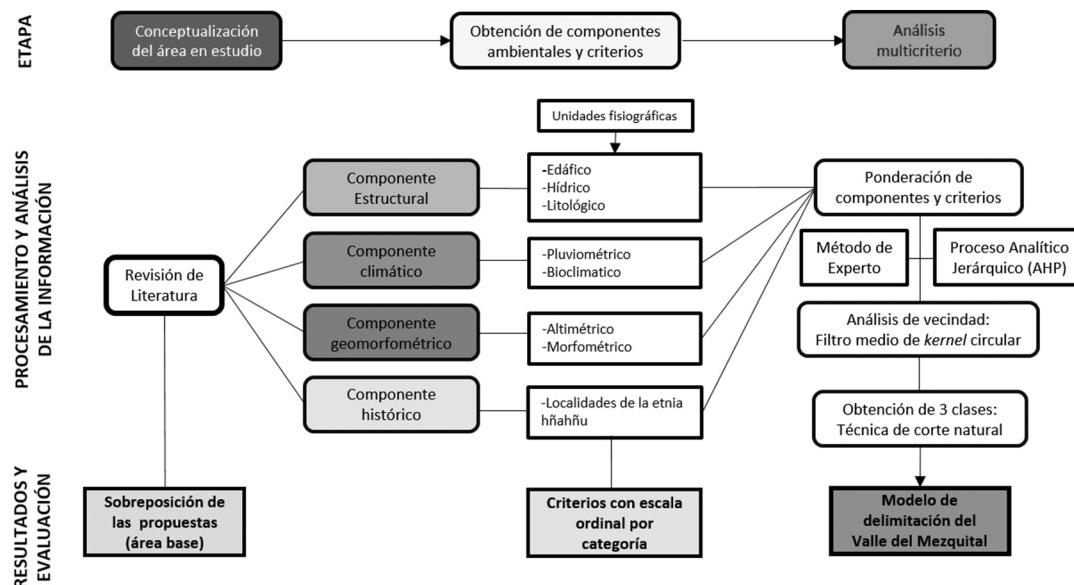


Figura 1. Flujo de trabajo para la delimitación del Valle del Mezquital.
 Fuente: Elaboración propia.

Enfoque geomorfológico. La mayoría de las propuestas que siguen este criterio consideran que el Valle del Mezquital corresponde a una depresión topográfica exclusiva de la planicie del fondo de la cuenca del río Tula, constituida por una alternancia de material piroclástico, lava, sedimentos lacustres y aluvión (Lesser-Carrillo, Lesser-Illades, Arellano-Islas & González-Posadas, 2011). Otros trabajos señalan que su área se extiende hasta los piedemontes de la Sierra de Juárez al norte; el cerro del Fraile, el cerro del Águila y la Sierra de Actopan al este; la Sierra del Mexe al sur y al oeste la sierra de Xinthé (González-Quintero, 1968).

Enfoque edáfico-climático. Se describe al Valle del Mezquital por sus características edáficas y climáticas, diferenciándolo en tres subregiones: la primera con suelos sujetos a riego y un clima semiseco, la segunda de clima semicálido en la que predominan los cultivos de temporal y la tercera de clima templado y un suelo no apto para la agricultura (Moreno-Alcántara *et al.*, 2006).

Enfoque político-administrativo. De acuerdo con Calvillo-Ortega (1981), el Valle del Mezquital se ha definido más por sus características socioeconómicas que por aspectos bióticos y físicos. Distintos estudios consideran que los límites del valle coinciden con los polígonos de los municipios que comprende, y en otros casos se ha partido de otros criterios socioeconómicos, para luego establecer las entidades administrativas que constituyen a la región. Bajo este aspecto se ha establecido que la extensa superficie de la región comprende 37 municipios (Espino-Ortega & De la Cruz-López, 2009).

Enfoque florístico-ecológico. En estos estudios, a pesar de que tratan el mismo tema de investigación, las diferencias en las delimitaciones son aún más frecuentes y contradictorias, ya que enmarcan su trabajo con límites de tipo geopolítico, hidrológico y/o geomorfológico (Bravo, 1937; Espino-Ortega & De la Cruz-López, 2009; García-Castañeda & López-Pérez, 2004; González-Quintero, 1968; Ruiz-Barrera, 2012; Velazco-Santiago & Ojeda-Rivera, 1989).

Por lo tanto, para establecer el área en estudio se vectorizaron los polígonos de las delimitaciones del Valle del Mezquital propuestos por los diferentes autores (Durán-Coyote, 2009; Espino-Ortega & De la Cruz-López, 2009; García-Castañeda & López-Pérez, 2004; González-Quintero, 1968; López-Aguilar, 1997; López-Zepeda, 2007; Ramírez-Martínez, 1998). La fusión de los polígonos considerados se nombró *área base* y sus coordenadas extremas (X1: 537 602 m,

Y1: 2 340 097 m y X2: 380 252 m, Y2: 2 164 597 m) definieron una superficie de 27 432 km² que correspondió al “área en estudio” (figura 2).

Componentes ambientales

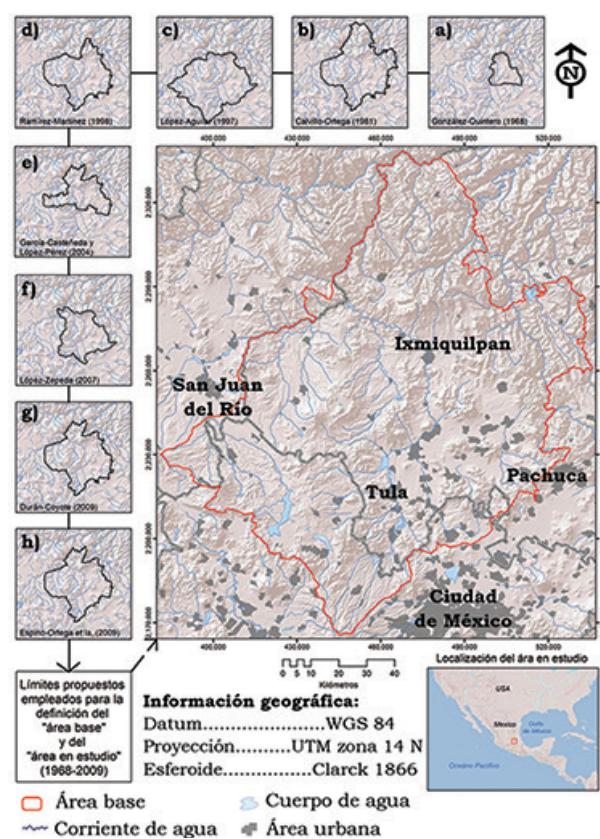
Para el análisis de delimitación se distinguieron cuatro componentes ambientales (estructural, climático, geomorfométrico e histórico), cada uno integrado por distintos criterios que representan aspectos particulares del Valle del Mezquital y que en conjunto sirvieron para diferenciar superficies que pueden formar parte del área a delimitar y caracterizar.

A continuación se describen los métodos empleados para la obtención de los criterios de cada componente ambiental:

Componente estructural. Los criterios considerados para describir y valorar el área en estudio desde una perspectiva estructural incluyeron información *raster* de tipo edáfico, hidrónico y litológico. *a)* Criterio edáfico: se procesó a partir de la carta de edafología 1:250 000 y se adecuó a las unidades fisiográficas trazadas manualmente sobre curvas de nivel escala 1:50 000 (Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía [INEGI], 2014); lo anterior permitió obtener una capa de suelos acorde con el relieve del área en estudio, así como reconocer los suelos con aptitud agrícola sujetos a riego (figura 3a). *b)* Criterio hidrónico: se definieron con base en las curvas de nivel y corrientes de agua superficiales a escala 1:50 000 (INEGI, 2014); el procedimiento consistió en la delimitación y clasificación de las subcuencas tributarias al río Tula y a su ubicación con relación a la porción alta, media o baja de la cuenca (figura 3b). *c)* Criterio litológico: la información empleada se obtuvo de las cartas geológico-mineras escala 1:50 000 (Servicio Geológico Mexicano [SGM], 2014) y se ajustaron a las unidades fisiográficas (figura 3c).

Componente climático. Para definir las áreas que por sus características climáticas influyen en el crecimiento y desarrollo de la vegetación de ambientes áridos se emplearon dos criterios: la pluviosidad (figura 3d) y la afinidad climática de *P. laevigata* (figura 3e). *a)* El criterio pluviométrico expresa la relación entre la precipitación anual y la temperatura ($R = P/T$, donde P es la precipitación anual en mm y T representa la temperatura media anual en °C); el cociente P/T es un indicador de la eficiencia de la precipitación en relación con la temperatura (García, 2004). Las capas *raster* de temperatura media anual y precipitación anual, empleadas para el cálculo del índice pluviométrico (figura 3d), se obtuvieron de *Worldclim* (*WorldClim*, 2014). *b)* El criterio bioclimático incorporó al modelo de afinidad climática para *P. laevigata* (mezquite), árbol en

su tiempo abundante y ampliamente distribuido en el área en estudio; el modelo se generó mediante el algoritmo BIOCLIM (Busby, 1991; Hijmans, Guarino, Cruz & Rojas, 2001), el cual empleó 255 registros de colecta de *P. laevigata* obtenidos del portal de la *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF, 2014); a partir de los registros de colecta se obtuvieron los valores de 19 variables climáticas derivadas de la precipitación media mensual y de las temperaturas máximas y mínimas de cada mes (Hijmans, Cameron, Parra, Jones & Jarvis, 2005); las celdas que presentaron más de dos sitios de colecta se consideraron como registro único para el análisis. Las variables de temperatura y precipitación utilizadas representan la tendencia anual (temperatura media anual, precipitación anual), la estacionalidad (registro anual de temperatura y precipitación) y los límites extremos (temperaturas mensuales más bajas y más altas, trimestres con y sin lluvia). Por lo tanto, con BIOCLIM se definió una envoltura climática con base en los valores extremos de cada variable ambiental, dicha envoltura permitió diferenciar las celdas del área en estudio que presentaron valores de temperatura y precipitación que favorece el establecimiento de *P. laevigata*. El modelo de afinidad climática asignó la categoría de “no adecuado” a las zonas que presentaron valores por fuera de la caja ambiental; “bajo” para las que se encontraron dentro de los percentiles 2.5 – 5.0 y 95.0 – 97.5; “medio” para las que estuvieron dentro de los percentiles 5.0 – 10.0 y 90.0 – 95.5; “alto” para aquéllas dentro del intervalo 10.0 – 20.0 y 80.0 – 90.0; “muy alto” a las áreas dentro de los percentiles 20.0 – 35.0 y 65.0 – 80; y “excelente” para aquellas áreas dentro de los percentiles 35.0 – 50.0 y 50.0 – 65.0 (figura 3e).



a) Gonzalez-Quintero (1968), b) Calvillo-Ortega (1981), c) López-Aguilar (1997), d) Ramírez-Martínez (1998), e) García-Castañeda & López-Pérez (2004), f) López-Zepeda (2007), Durán-Coyote (2009), g) Espino-Ortega & De la Cruz (2009).
Figura 2. Localización del área en estudio y límites propuestos por otros autores.
 Fuente: Elaboración propia, modelo de elevación digital, <http://www.inegi.org.mx/>

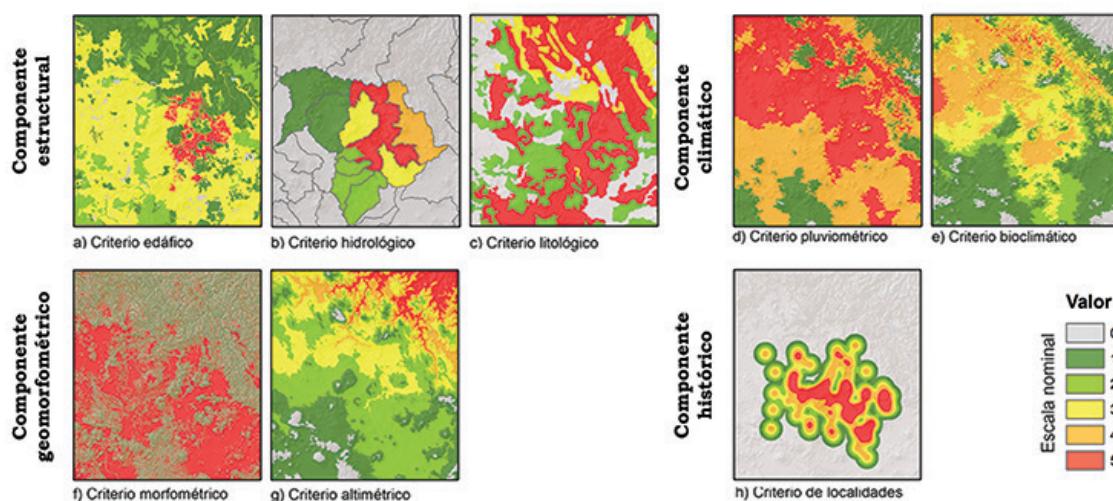


Figura 3. Criterios utilizados para la delimitación del Valle del Mezquital.
 Fuente: Elaboración propia.

Componente geomorfométrico. Se consideró la geometría del terreno y un modelo altimétrico como criterios indicativos de la pertenencia del terreno a morfologías de fondo de valle. *a)* Criterio altimétrico: para su obtención, se procesó un modelo digital de elevación (MDE) a partir del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (INEGI, 2014). Asimismo, con la finalidad de obtener valores de elevación que no representen cambios abruptos en la distribución de alturas, se aplicó al MDE un suavizado basado filtro promedio de *kernel* circular de 5 pixeles de diámetro (figura 3f). *b)* Criterio geomorfométrico: a partir del MDE suavizado se obtuvo un *raster* que indicó la geometría cóncava, convexa o plana de las laderas. Los valores esperados de curvatura en zonas montañosas (relieve moderado) varían de -0.5 a 0.5, mientras que para zonas con montañas escarpadas (relieve extremo) los valores fluctúan de -4 a 4 (MacMillan & Shary, 2009). El raster de curvaturas obtenido se reclasificó en tres categorías: lineal, cóncavo y convexo (figura 3g).

Componente histórico. A partir de 67 localidades en las que históricamente se asentó la etnia *hñahñu* (López-Aguilar, 1997), se generó un modelo de densidad de puntos por medio de un *kernel* de radio de búsqueda de 10 km. El *raster* de salida presenta valores altos para las áreas con mayor cantidad de localidades dentro del radio de búsqueda. Los valores continuos de las cinco clases del *kernel* se reclasificaron bajo las siguientes categorías: “muy denso”, “denso”, “regularmente denso”, “poco denso”, “aislado” y “sin localidades” (figura 3h).

Cabe mencionar que no se empleó como criterio de análisis la vegetación, debido a que el mezquital, vegetación que caracterizaba al área, se ha removido para el establecimiento de actividades agropecuarias (Bravo, 1937; González-Quintero, 1968; Velazco-Santiago & Ojeda-Rivera, 1989). Por otro lado, a pesar de estar clara su pertenencia del Valle del Mezquital a la Provincia Austro-Central (Morrone, 2005), no se contó con información de flora y fauna endémica o de interés regional que pudiera ser incorporada en el análisis multicriterio.

Análisis multicriterio

El análisis multicriterio incluye un conjunto de técnicas que permiten fundamentar los procesos de toma de decisiones (Malczewski, 2006) con base en la integración de múltiples criterios de evaluación y que de acuerdo con su importancia (ponderación) seleccionan los desempeños más adecuados de acción (Uribe, Geneletti, Del Castillo & Osri, 2014). El análisis multicriterio uti-

lizó dos técnicas para la ponderación de los criterios: *a)* el método de experto y *b)* el proceso analítico jerárquico; ambos procedimientos incluyeron los aspectos biológicos, físicos y culturales que de manera recurrente se citan en la literatura como distintivos del Valle del Mezquital (Bravo, 1937; Durán-Coyote, 2009; Espino-Ortega & De la Cruz-López, 2009; García-Castañeda & López-Pérez, 2004; González-Quintero, 1968; López-Aguilar, 1997; López-Zepeda, 2007; Ramírez-Martínez, 1998).

Método de experto (ME). Incluye un grupo de metodologías aplicadas en la selección de sitios óptimos o en el modelado de adecuación; utiliza una escala común de valores para diversas variables, las cuales son ponderadas de acuerdo con el criterio del evaluador; los modelos obtenidos identifican las mejores ubicaciones o las más favorables de un fenómeno específico (Maguire, Goodchild & Batty, 2005; Yan-Sui, Jie-Wong & Li-Ying, 2006). Por consiguiente, para definir el área que geográficamente corresponde al Valle del Mezquital se jerarquizaron y ponderaron los componentes ambientales y sus criterios de acuerdo con el punto de vista de los especialistas que han trabajado en la región. De esta manera, los criterios del componente estructural (edáfico, hídrico y litológico) representaron el 45% del total de la ponderación, debido a que explican y definen respectivamente a los valles fluviales, la altitud, la curvatura de la pendiente y la localización de los asentamientos de la etnia *hñahñu*. Por su parte, los criterios del componente climático (pluviométrico y bioclimático) constituyeron el 25% de la ponderación y evidenciaron dos aspectos importantes para la delimitación: el primero la condición de aridez y el segundo la distribución potencial de *P. laevigata* en el área en estudio. Los criterios del componente geomorfométrico (altimétrico y morfométrico) incluyeron el 20% de la ponderación, e identificaron las áreas que por su curvatura corresponden a superficies planas, en las que se extienden depósitos aluviales y que de acuerdo con su gradiente altitudinal sirven para diferenciar los valles fluviales. Por último, el componente histórico, con un 10% de la ponderación, estableció la distribución de los asentamientos de la etnia *hñahñu*; este componente presentó una estrecha relación con las características estructurales, climáticas y geomorfométricas del área en estudio (tabla 1, columna 1 y 2).

Las clases de cada criterio se ajustaron a una escala ordinal de 0 a 5 (tabla 1, columna 3). La información vectorial obtenida de los componentes ambientales se convirtió a formato *raster* con una resolución espacial de 30 m.

Tabla 1.
Componentes y criterios empleados en el análisis multicriterio.

Componente ambiental (peso)	Criterios (peso)	Valor ordinal (peso)					
		5	4	3	2	1	0
Estructural (0.45)	Edáfico (0.45)	Con riego y aptitud agrícola	Con aptitud agrícola	Aptitud agrícola media	Aptitud agrícola baja	Sin aptitud agrícola	Cuerpo de agua/Área urbana
	(0.45)	Cuenca Baja	Cuenca media	Cuenca tributaria	Cuenca alta	Cuenca confluyente	Cuenca no tributarias
	(Litológico 0.3)	Conspicua	-	Común	Poco común	-	No presente
Climático (0.25)	Pluviométrico (0.6)	Semiárido	Árido	Desértico	Subhúmeda	-	Húmeda
	Bioclimático (0.4)	Afinidad Excelente	Afinidad muy alta	Afinidad alta	Afinidad media	Afinidad baja	No adecuado
Geomorfométrico (0.2)	Altimétrico (0.4)	162 – 1200	1200 – 1600	1600 – 2000	2000 – 2400	2400 – 2800	2800 – 4000
	Morfométrico (0.6)	Lineal	-	-	-	Cóncavo	Convexo
Histórico (0.1)	Localidades (1)	Muy denso	Denso	Regularmente denso	Poco denso	Aislado	Sin localidades

Fuente: Modificado de Yan-Sui *et al.* (2006).

Para la obtención del modelo de delimitación, el ME realizó dos sumas ponderadas (Yan-Sui *et al.*, 2006): la primera obtiene la puntuación global S_k a partir de los criterios k ésimos (1 a k) de cada componente ambiental de acuerdo con la siguiente relación:

$$S_k = \sum_{i=1}^r a_i^k \cdot \sum_{j=1}^5 F_{ij}^k, \quad (1)$$

donde r se refiere al número de criterios de un componente ambiental; a representa la ponderación de un criterio, 0.45 para el suelo, 0.25 para las cuencas y 0.35 para la litología (tabla 1, columna 2), con un suma total de 1 para todos los valores a de un criterio determinado, y F_{ij} es el valor ordinal (5 - 0) de las clases de cada criterio (tabla 1, columna 3). A su vez, la segunda suma se realizó para los cuatro componentes ambientales, ya que de su efecto particular y combinado derivan las posibilidades para la obtención del modelo de delimitación del Valle del Mezquital:

$$SV_{ME} = \sum_{i=1}^{k=4} \beta_k^h \cdot S_k^h, \quad (2)$$

donde β_k representa el peso del componente, 0.45 para el estructural a 0.1 para el cultural (tabla 1, columna 1); y S_k representa la suma total de los criterios de los componentes ambientales obtenidos de la pri-

mer suma. El modelo de delimitación (SV_{ME}) representó mediante una escala ordinal de 0 (no representativo) a 5 (completamente representativo) la superficie que a partir de los criterios ambientales figuran en mayor proporción las características distintivas del Valle del Mezquital.

Proceso analítico jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés). Su principal característica es que el problema de decisión se plantea mediante una jerarquización en cuyo nivel superior está el objetivo del problema, y en la base las alternativas a evaluar (Saaty, 2008). El diseño de las jerarquías en el AHP requiere experiencia y conocimiento del problema planteado, del cual es indispensable disponer de toda la información necesaria; el AHP realiza comparaciones por pares de elementos, de acuerdo con su importancia o contribución de cada uno de ellos; las comparaciones por pares se realizan por valores de importancia, que se evalúan en función de una escala numérica propia del AHP (Bunruamkaew & Murayama, 2011; Khoi & Murayama, 2010; Mobaraki, Abdollahzadeh & Kamelifar, 2014).

La delimitación del Valle del Mezquital por medio del AHP incluyó los siguientes pasos (Mobaraki *et al.*, 2014): 1) Planteamiento del problema y definición del objetivo. 2) Establecimiento de las jerarquías para la toma de decisiones con base en los criterios. 3) Construcción de una matriz de comparación por pares de criterios mediante el uso de una escala de medición

relativa (tabla 2); las comparaciones por pares se realizaron en términos de qué elemento domina sobre el otro, la asignación de reciprocos es necesaria para la construcción de la matriz (tabla 3). 4) Obtención de la matriz normalizada, se suman los valores de cada columna de la matriz de comparación por pares, posteriormente se divide cada valor de la columna entre la suma de la columna. 5) Cálculo de los pesos, la media de los valores de cada fila de la matriz de normalizada es el peso de cada criterio. 6) Cálculo de *lambda*, se multiplica el vector columna por los pesos de cada fila de la matriz normalizada; los valores del vector columna resultante se dividen entre su peso, el promedio de los cocientes es *lambda*. 7) Cálculo del índice de consistencia (*CI*) y la relación de consistencia (*CR*) de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1}, \quad (3)$$

donde *n* es el tamaño de la matriz; y λ es el promedio de los productos de la matriz *R* por el vector *w*. Para defi-

nir que la matriz es consistente se obtuvo la relación de consistencia a partir de cociente:

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad (4)$$

donde *CI* es el índice de consistencia y *RI* es el índice de consistencia aleatorio que para una matriz de 8×8 tiene un valor de 1.41. La relación de consistencia resulta aceptable si es menor a 0.10, por lo que el vector de pesos obtenidos se admite como válido; si es mayor, la matriz es incompatible; para obtener una matriz consistente, los juicios deben ser revisados y mejorados. 8) Los pasos de 3 a 6 se realizaron para todos los criterios (Goshal, Naskar & Bose, 2011). 9) Obtenidos los pesos para los ocho criterios se realizó la suma ponderada; el modelo obtenido se representó mediante una escala ordinal de 0 a 5.

Los matriz de comparación por pares de criterios, la matriz normalizada, el vector de pesos, productos, el ratio y los índices obtenidos se muestran en las tablas 3 a 5.

Tabla 2.
Escala de comparación por pares.

Juicio	Valor	Juicio	Valor	Juicio	Valor
Igualmente preferida	1	Moderadamente a fuertemente	4	Muy fuertemente preferida	7
Igualmente a moderadamente	2	Muy preferidos	5	Muy fuerte a extremadamente	8
Moderadamente preferido	3	Encarecidamente a muy fuertemente	6	Extremadamente preferido	9

Valores 2, 4, 6 y 8 se emplearon para comparaciones inversas.

Fuente: Mobaraki *et al.* (2014).

Tabla 3.
Matriz de comparación por pares.

	Edáfico	Litológico	Hidrológico	Pluviométrico	Bioclimático	Morfométrico	Altimétrico	Localidades
Edáfico	1.00	7.00	1.00	1.00	3.00	7.00	9.00	5.00
Litológico	0.14	1.00	0.50	0.13	0.13	0.50	7.00	1.00
Hidrológico	1.00	2.00	1.00	1.00	1.00	3.00	5.00	5.00
Pluviométrico	1.00	8.00	1.00	1.00	3.00	3.00	9.00	3.00
Bioclimático	0.33	8.00	1.00	0.33	1.00	3.00	7.00	1.00
Morfométrico	0.14	2.00	0.33	0.33	0.33	1.00	5.00	1.00
Altimétrico	0.11	0.14	0.20	0.11	0.14	0.20	1.00	0.13
Localidades	0.20	1.00	0.20	0.33	1.00	1.00	8.00	1.00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.
 Matriz de criterios normalizada.

	Edáfico	Litológico	Hidrológico	Pluviométrico	Bioclimático	Morfométrico	Altimétrico	Localidades
Edáfico	0.254	0.240	0.191	0.236	0.312	0.374	0.176	0.292
Litológico	0.036	0.034	0.096	0.030	0.013	0.027	0.137	0.058
Hidrológico	0.254	0.069	0.191	0.236	0.104	0.160	0.098	0.292
Pluviométrico	0.254	0.275	0.191	0.236	0.312	0.160	0.176	0.175
Bioclimático	0.085	0.275	0.191	0.079	0.104	0.160	0.137	0.058
Morfométrico	0.036	0.069	0.064	0.079	0.035	0.053	0.098	0.058
Altimétrico	0.028	0.005	0.038	0.026	0.015	0.011	0.020	0.007
Localidades	0.051	0.034	0.038	0.079	0.104	0.053	0.157	0.058

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.
 Valores obtenidos de los pesos, productos, *lambda* (λ) e índices.

	Pesos	Productos	Ratio	λ	CI	RI	CR
Edáfico	0.260	2.402	9.253	8.921	0.132	1.41	0.09
Litológico	0.054	0.458	8.491				
Hidrológico	0.176	1.539	8.767				
Pluviométrico	0.223	2.066	9.284				
Bioclimático	0.136	1.291	9.484				
Morfométrico	0.061	0.550	8.946				
Altimétrico	0.019	0.156	8.309				
Localidades	0.072	0.635	8.832				

Fuente: Elaboración propia.

La suma ponderada para la obtención del modelo de delimitación por el método de AHP presentó la siguiente expresión:

$$SV_{AHP} = \sum_{i=1}^{k=8} \beta_k^h \cdot S_k^h, \quad (5)$$

donde β_k representa el peso del criterio, 0.26 para el edáfico, 0.054 para el litológico, 0.176 para el hidrológico y 0.072 para las localidades (tabla 5, columna 2); y S_k representa el valor, en escala nominal, de cada celda del raster en cuestión, por lo tanto $SVAHP = 0.26 \cdot raster\text{-edáfico} + 0.054 \cdot raster\text{-litológico} + 0.176 \cdot raster\text{-hidrológico} + \dots + 0.072 \cdot raster\text{-localidades}$. De igual manera que para el método de experto, el modelo de delimitación obtenido (SV_{AHP}) tendrá una salida en escala ordinal de 0 (no representativo) a 5 (completamente representativo).

Representación de los modelos. Con la finalidad de representar de manera más precisa y obtener superficies más homogéneas de las categorías nominales de los modelos de delimitación obtenidos, se les aplicó un filtro promedio de kernel circular de 2 km de diámetro. Asimismo, para mejorar la descripción del modelo, la escala ordinal se representó con cuatro clases porcentuales obtenidas mediante la técnica de intervalos naturales de Jenks (1963), que se caracteriza por agrupar mejor los valores similares y maximizar las diferencias entre clases.

RESULTADOS

Delimitación del Valle del Mezquital

Los modelos de delimitación del Valle del Mezquital obtenidos por el ME y el AHP mostraron valores de

representatividad que oscilaron entre 0% – 100%, por lo que un pixel con porcentaje alto indicó una mayor proporción de características inherentes de la región (referentes a los componentes estructural, climático, geomorfométrico e histórico del ambiente). Ambos modelos no presentaron celdas con una suma ponderada de cinco (100% de representatividad) debido a que la altimetría (figura 3e) y afinidad climática de *P. laevigata* (figura 3f) presentaron sus valores más altos al norte y oeste del área en estudio, respectivamente, lo que evitó que la suma alcanzara el puntaje máximo (100 %).

En el caso del modelo derivado del ME, las cuatro clases de representatividad diferenciaron siete polígonos orientados de centro-oeste a centro-este, con un patrón de distribución disyunto y valores de representatividad superiores al 68%; el puntaje más alto que registró este modelo, de acuerdo con la escala ordinal resultó de 4.74, correspondiente a un 92.8% de representatividad de los criterios; los polígonos 1 al 6 obtenidos por el ME presentan características bioclimáticas (ambiente árido afín a *P. laevigata*) y geomorfológicas (roca volcanoclástica y curvatura lineal) distintivas de la región; no obstante no se consideran parte del Valle del Mezquital, debido a que no constituyeron un polígono único (figura 4). En sí, las áreas que registraron valores superiores al 68% estuvieron relacionados con la presencia de roca volcanoclástica, criterio que resultó influido por la técnica de suma ponderada, ya que asume que los factores de mayor ponderación (criterios edáfico, hídrico y litológico) generan valores altos en el modelo; no obstante el polígono 4 (de menor tamaño) es producto del filtro promedio (figura 4).

Respecto al modelo generado mediante el AHP, definió un área ubicada en el centro-este del área en estudio (polígono 5) similar al obtenido por el ME (polígono 7); presentó cuatro polígonos disyuntos de menor tamaño (figura 5), dos al centro este y otros dos al centro sur del área en estudio. Los valores de representatividad más altos se incluyeron en la clase 70% a 95%. En general, el modelo del AHP resultó similar al modelo del ME; en ambos casos los perímetros de los polígonos 7 (figura 4) y 5 (figura 5) coinciden en sus límites noroeste, norte, noreste y este.

Por consiguiente, la región del Valle del Mezquital (definida por los polígonos 7 y 5) se localizó en el centro-este del área en estudio, cubre una superficie de 2,822 km², presenta suelos feozem y vertisol sometidos a riego, una matriz litológica de tipo volcanoclástica con afloramientos de roca caliza, condiciones de aridez que favorecen el establecimiento de *P. laevigata*, terrenos con pendiente lineal propios de la llanura fluvial del río Tula en los que se localizaron el 55% de las localidades históricas de la etnia *hñahñu*.

Los límites del Valle del Mezquital quedaron definidos por las laderas de la Sierra de Actopan al este, desde los cerros El Niño y El Cuade hasta la laderas de la Sierra de Actopan al oriente de Santiago de Anaya; al sureste por las laderas de los cerros Guerra, Viejo e Indianilla; al sur por las laderas de la sierra de Las Mesas y la transición entre la cuenca del Valle de México y la cuenca del río Tula, donde se encuentran los poblados de Ajoloapan, Tlapanaloya; Hueypoxtla y Tequixquiac; por su parte, las localidades de Conejos, Tlaxcoapan y San Idelfonso, así como las laderas de las formaciones cerriles aledañas a la ciudad de Tula, corresponden al límite suroeste; al oeste la región se extiende desde las laderas de los cerros La Mora, Peña Blanca y El Apartadero, contiguos al poblado de La Joya, extendiéndose por el piedemonte de la sierra conformada por los cerros El Xithi, Llano Largo, Peña Colorado, Llano Grande y hasta las laderas de los cerros Coraza y Bathe; el límite noroeste quedó definido por el cerro Colorado y el valle de Tasquillo; por su parte, al norte la región queda enmarcada por las rampas y laderas tendidas entre los cerros Daxhe y Candho; por último, el extremo noreste del Valle del Mezquital queda establecido por los piedemonte, laderas medias y lenguas de valle ubicados entre los cerros Juxmaye, Ventorillo, Guadal, Cebadero, Teptha y de la Nube (figura 6).

Características ambientales de la región del Valle del Mezquital

De acuerdo con los ocho criterios (edáfico, hídrico, litológico, pluviométrico, bioclimático, altimétrico, geomorfométrico e histórico) pertenecientes a cuatro componentes ambientales, a continuación se describen las características más sobresalientes del Valle del Mezquital:

Componente estructural

La región se distingue por una actividad agrícola muy extendida debido al aprovechamiento de las aguas del río Tula en asociación con una extensa red de canales de riego y embalses que permiten almacenar el agua pluvial y residual. Las aguas empleadas para el riego favorecen la aptitud agrícola de los dos suelos predominantes de la región, el vertisol y el feozem; otro suelo bastante extendido es el leptosol, no se encuentra sometido a riego y se localiza en el centro, oeste y sur del Valle de Mezquital. Respecto al criterio hídrico, la región quedó inmersa por completo en la cuenca del río Tula; por su parte, el criterio litológico identificó una matriz conformada por cuatro tipos de roca: volcanoclástica, caliza, roca ígnea extrusiva intermedia e ígnea extrusiva básica y ácida.

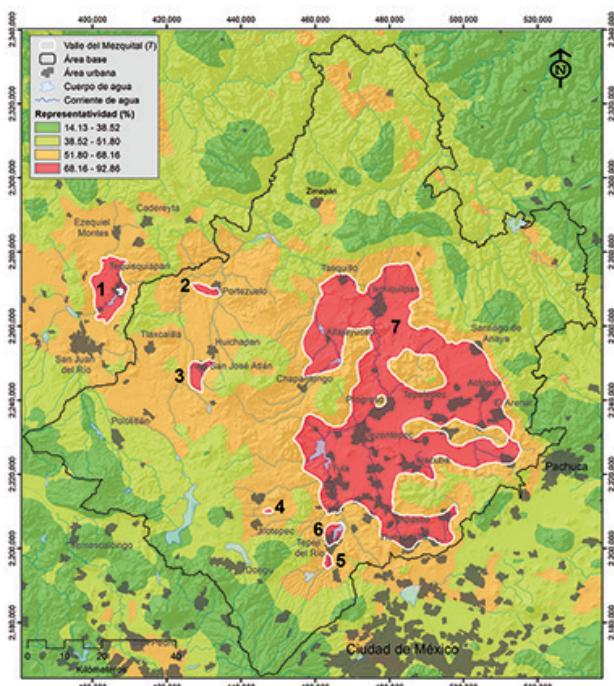


Figura 4. Modelo de delimitación del Valle del Mezquital obtenido por el ME.
Fuente: Elaboración propia.

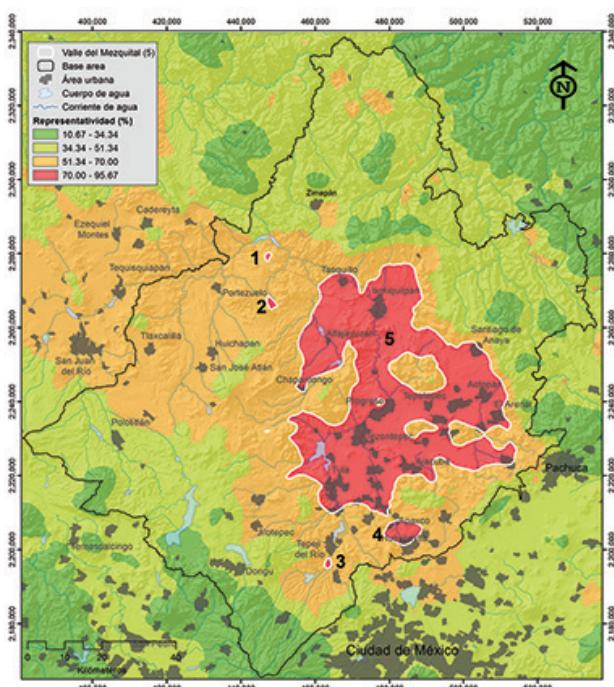


Figura 5. Modelo de delimitación del Valle del Mezquital obtenido por el método de AHP.
Fuente: Elaboración propia.

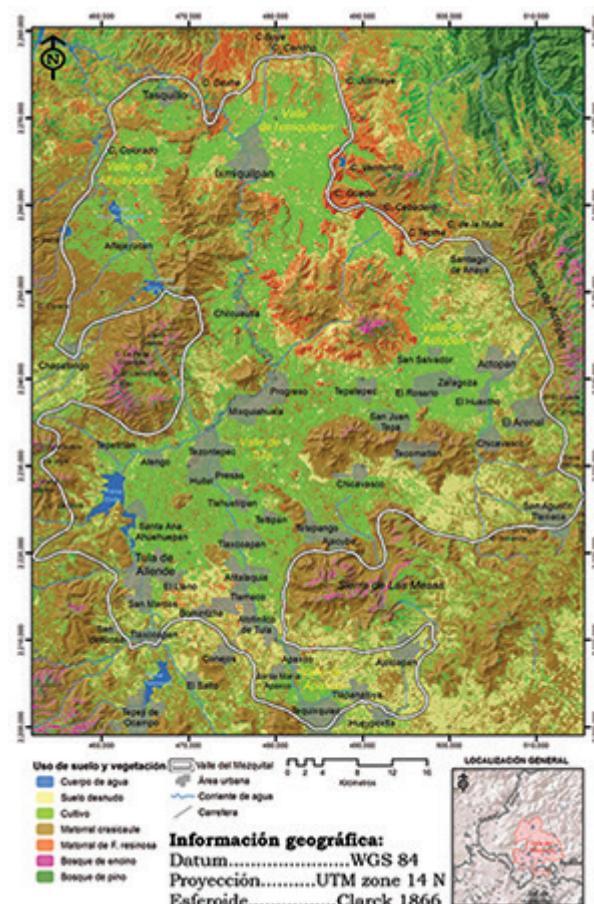


Figura 6. Región del Valle del Mezquital.
 Fuente: Modelo de elevación digital: <http://www.inegi.org.mx/>
 Uso de suelo y vegetación (inédito) J. Rosas-Ávila.

Componente climático

El índice pluviométrico señaló que la parte centro y norte del Valle del Mezquital es árida, mientras que el extremo sur donde se localizan los poblados de Apaxco, Hueypoxtla, Tequixquiac y Ajoloapan es semiárido. La afinidad de *P. laevigata* a la región mostró valores por encima del percentil 5 (clases alto y muy alto); en estos sitios, las condiciones de temperatura (temperatura media anual de 18 °C e isotermalidad del 65%) y precipitación (593 mm) resultan adecuados para la especie.

Componente geomorfométrico

El modelo altimétrico presentó un gradiente de noreste a suroeste con un intervalo de 162 m - 3914 m, que

relacionado con la morfometría del terreno distinguió dos pisos altitudinales de curvatura lineal (1600 m – 2000 m y 2000 m – 2400 m). Las principales áreas con una curvatura de tipo lineal corresponden a los valles de Actopan, Ixmiquilpan, Tasquillo, Tula y Alfajayucan.

Componente histórico

El modelo de densidad de localidades mostró la naturaleza y el acomodo de los asentamientos humanos con raíces históricas vinculadas con la etnia *hñahñu*. La mayor densidad de localidades se encontró en la sección centro y sureste de la región en terrenos con curvatura lineal y condiciones áridas. Los clase “muy denso” presentaron un patrón de distribución con dirección oeste-centro-sureste, e incluyó a las localidades de San José Atlán, Zimapantongo, Mixquiahuala, Tepatepec, Atitalaquia, Hueyopoxla y Tecajique.

DISCUSIÓN

Los límites propuestos para el Valle del Mezquital realizados con base en un solo criterio ambiental de índole topográfico, hidrológico, económico o geopolítico (Bravo, 1937; Durán-Coyote, 2009; Espino-Ortega & De la Cruz-López, 2009; García-Castañeda & López-Pérez, 2004; González-Quintero, 1968; López-Aguilar, 1997; López-Zepeda, 2007; Ramírez-Martínez, 1998) presentaron disparidades en sus descripciones y denotan ambigüedades en sus contornos. En contraste, la aplicación del análisis multicriterio permitió establecer que los modelos obtenidos por el ME y el AHP resultaron similares y, a diferencia con los límites establecidos en los estudios anteriores, no presentaron entre sí discrepancias sustanciales en sus contornos; asimismo, el análisis multicriterio permitió considerar de manera integral aspectos relacionados con la vegetación, el suelo, la litología, el clima y los rasgos culturales, indispensables en la planeación de actividades productivas, el manejo de los recursos naturales y el mantenimiento de los servicios ambientales.

El aumento del límite del Valle del Mezquital hacia Huichapan, por parte de otros autores (Calvillo-Ortega, 1981; Espino-Ortega & De la Cruz-López, 2009; López-Aguilar & Fournier, 2009; Ramírez-Martínez, 1998) coincide con los polígonos 1, 2 y 3 (figura 4; clase 68% – 92%) del modelo obtenido por el ME. Este hecho confirma que en dichos polígonos hay condiciones similares a las existentes en el Valle del Mezquital, razón por la cual en otros trabajos extienden el límite de la región al occidente. Por su parte, el método AHP definió de mejor manera las áreas am-

bientalmente homogéneas, ya que se redujeron tanto el área y como el número de polígonos disyuntos (figura 5; clase 70% – 95%). El límite obtenido por el AHP coincidió en su límite norte, este y sur al propuesto por González-Quintero (1968), salvo que dicho autor refiere sus límites a los parteaguas, mientras que el modelo del AHP los sitúa sobre las laderas de los cerros y sierras circundantes.

En general, los estudios basados en análisis espaciales para la obtención de modelos de elección, ubicación y definición de áreas óptimas se apoyan, para asignar los pesos a los criterios, en el método de AHP (Hizbaron, Baiquni, Sartohadi & Rijanta, 2012; Khoi & Murayama, 2010; Matsura, Sigimura, Miyamoto & Tanaka, 2014; Mobaraki *et al.*, 2014), el cual presenta un par de desventajas, como la subjetividad inherente de asignar la prioridad entre criterios, así como la complejidad en su cálculo (Bunruamkaew & Murayama, 2011); la subjetividad de asignar las prioridades es resuelta cuando se conocen los aspectos sobresalientes del problema, lo que facilita la asignación de los valores de ponderación tanto para el ME como para AHP (Mobaraki *et al.*, 2014; Uribe *et al.*, 2014).

Generalmente, las combinaciones espaciales para delimitar una región presentan dificultades relacionadas con los criterios, por lo que se debe conocer su contexto para seleccionar aquéllos que imponen personalidad al territorio (González-González, 1995); tanto el ME y como el AHP partieron de un conocimiento previo para la selección e identificación de los criterios inherentes y distinguibles del Valle del Mezquital. La reducción del número criterios ambientales permite una mejor delimitación y acotamiento de las particularidades de una región, asimismo facilita el entendimiento del uso del territorio por parte de los habitantes, quienes dada la gama de recursos seleccionan aquéllos que están más relacionados con sus aptitudes culturales (Estébanez-Álvarez, 1982; González-González, 1995). Por lo tanto, la vocación agrícola, la obtención de diversos productos de la vegetación, la explotación de recursos litológicos y el desarrollo de centros turísticos son actividades ineludibles de la región del Valle del Mezquital.

Para cada caso de estudio, las variables empleadas en la obtención de modelos de delimitación no siempre serán las mismas, por lo que la elección de criterios dependerá de la naturaleza del problema (Khoi & Murayama, 2010; Yan-Sui *et al.*, 2006). Por consiguiente, los componentes empleados en este estudio y su jerarquización aplican a la región del Valle del Mezquital; no obstante, los mismos principios pueden ser utilizados para delimitar otras regiones, en las cuales

el componente histórico-cultural será fundamental, ya que facilita el reconocimiento de los atributos intrínsecos del espacio de personas que ahí se realizan sus actividades.

CONCLUSIONES

La importancia de establecer y distinguir las peculiaridades de una región permite entender su dinámica al interior de ella misma. Definir los límites de una región o territorio desde un punto de vista estrictamente geográfico ofrece una visión más objetiva y precisa al momento de trabajar temas relacionados con el manejo de recursos, el ordenamiento territorial y los servicios ambientales. Una delimitación consensuada ayuda a reconocer las localidades que se encuentran en una región o territorio que cumplen con determinados factores naturales y humanos. Por lo tanto, la delimitación y conocimiento de las características intrínsecas del Valle del Mezquital promueve la identidad de sus habitantes a la región y establece las bases para la incorporación de actividades relacionadas con la indicación geográfica y el manejo sostenible de los recursos naturales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen ampliamente la cuidadosa lectura, correcciones, observaciones y sugerencias de los dos árbitros anónimos de la revista *Acta Universitaria*.

REFERENCIAS

- Benedetti, A. (2009). Los usos de la categoría región en el pensamiento geográfico argentino. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 13(286). Recuperado el 14 diciembre de 2014 de <http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-286.htm>
- Bravo, H. (1937). Observaciones florísticas y geobotánicas en el Valle del Mezquital, Hidalgo. *Anales del Instituto de Biología UNAM*, 8(1), 3-82.
- Bunruamkaew, K., & Murayama, Y. (2011). Site suitability evaluation for ecotourism using GIS & AHP: A case study of Surat Thani Province, Thailand. In *Procedia - Social and Behavioral Sciences* (vol. 21, pp. 269-278). Recuperado el 18 de enero de 2015 de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042811013474>. doi:10.1016/j.sbspro.2011.07.024.
- Bürgi, M., Hersperger, A. M., & Schneeberger, N. (2004). Driving forces of landscape change – current and new directions. *Landscape Ecology*, 19(8), 857-868.
- Busby, J.R. (1991). BIOCLIM-a bioclimate analysis and prediction system. *Plant Protection Quarterly*, 6, 8-9.
- Calvillo-Ortega, T. (1981). *Fundamentos geográficos para la reorganización espacial en el Valle del Mezquital* (tesis de maestría). Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM): México.
- Carmona-Paredes, R. B., & Muñiz-Arcila, F. (Octubre, 2014). Contaminación emergente en el Valle del Mezquital. Ponencia presentada en *Memorias del XXIII Congreso Nacional de Hidráulica*, Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- Ceballos-Silva, A., & López-Blanco, J. (2003). Delineation of suitable areas for crops using a Multi-Criteria Evaluation approach and land use/cover mapping: a case study in Central Mexico. *Agricultural Systems*, 77(2), 117-136.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) (2015). *Regionalización*. Recuperado el 11 de febrero de 2015 de <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/regionalizacion.html>
- Da Costa-Gomes, P. (2000). O coiceito da região e sua discussão. En I. Elias-de Castro, P. Da Costa-Gomes & R. Lobato-Correa (Eds.), *Geografia: Conceitos e temas* (Segunda ed., pp. 49-76). Rio de Janeiro: BCD.
- Dang, A., Yan, S., & Liu, Y. (July, 2000). GIS Based study on the regionalization of China's grain production system. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33(7), 71-76.
- De Villase or y S  nchez, J. A. (2005). *Theatro americano. Descripc n general de los reynos y provincias de la Nueva Espa a y sus jurisdic ciones*. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Di M o, G. (1999). Géographie sociale et territoires. *Annales de Géographie*, 108(608), 441.
- Durán-Coyote, S. (2009). *Evaluación de la reserva de semillas del suelo en dos matorrales xer f ilos del Valle del Mezquital, Hidalgo* (tesis de licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM): México.
- Espino-Ortega, G. J., & De la Cruz-L  pez, L. E. (2009). *Las crasul reas del Valle del Mezquital* (Tesis de licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM): México.
- Est  banez- lvarez, J. (1982). La geografía humanística. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 2(2), 11-31.
- Frémont, A. (1976). *La région espace v cu*. París: Flammarion.
- García de Fuentes, A., & Córdoba y Ordoñez, J. (2010). Regionalización socio-productiva y biodiversidad. En R. Durán & M. Méndez (Eds.), *Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán* (pp. 63-70). Mérida: CICY, PPD-FMAM, Conabio, SEDUMA.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de K ppen* (Quinta ed.). México, DF: Instituto de Geografía-Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- García-Aguirre, M. C., Ortiz, M. A., Zamorano, J. J., & Reyes, Y. (2007). Vegetation and landform relationships at Ajusco volcano México, using a geographic information system (GIS). *Forest Ecology and Management*, 239(1-3), 1-12.
- García-Castañeda, E., & L  pez-Pérez, S. (2004). *Distribución geográfica y diversidad de la familia Cactaceae en el Valle del Mezquital, Hgo.* (tesis de licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM): México.

- Gaspar-Avellaneda, V. (2006). Un estudio sobre los "límites" de Tierra Caliente. *Ciencia, Tecnología y Desarrollo Regional*, 1(3), 2-4.
- Global Biodiversity Information Facility (GBIF) (2014). Recuperado el 22 de septiembre de 2014 de <http://www.gbif.org/>
- Geneletti, D. (2007). An approach based on spatial multicriteria analysis to map the nature conservation value of agricultural land. *Journal of Environmental Management*, 83(2), 228-235.
- Geo-Mexico (2015). *The geography of tequila: where is tequila made?* Recuperado el 29 de agosto de 2014 de: <http://geo-mexico.com/?p=6953>
- Giménez, G. (2005). Territorio e identidad. Breve introducción a la geografía cultural. *Trayectorias*, 7(17), 8-24.
- Giorgi, F. (2008). Regionalization of climate change information for impact assessment and adaptation. *WMO Bulletin*, 57(2), 86-92.
- Gómez, M., & Barredo, J. (2006). *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio* (Segunda ed.). Madrid, España: Ra-Ma.
- González-González, M. J. (1995). *La región en el pensamiento geográfico. Contextos*, 13(25-26), 171-206. Recuperado el 14 de enero de 2015 de <https://buleria.unileon.es/handle/10612/995>
- González-Medrano, F. (2012). *Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación*. México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales/ Instituto Nacional de Ecología.
- González-Quintero, L. (1968). *Tipos de vegetación del Valle del Mezquital*, Hgo., México. México, DF: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Goshal, D. S., Naskar, S. K., & Bose, D. D. (2011). AHP in Assessing Performance of Diploma Institutes—A Case Study. *Journal of Technical Education and Training*, 3(2), 67-81.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978.
- Hijmans, R. J., Guarino, L., Cruz, M., & Rojas, E. (2001) Computer tools for spatial analysis of plant genetic resources data: 1. DIVA-GIS. *Plant Genetic Resources Newsletter*, 127, 15-19.
- Hizbaron, D. R., Baiquni, M., Sartohadi, J., & Rijanta, R. (2012). Urban vulnerability in Bantul district, Indonesia—towards safer and sustainable development. *Sustainability*, 4(9), 2022-2037. doi:10.3390/su4092022.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía (INEGI) (2014). *Recursos naturales*. Recuperado el 22 de diciembre de 2014 de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/default.aspx>.
- Jenks, G. (1963). Generalization in statistical mapping. *Annals of the Association of American Geographers*, 53(1), 15-26.
- Khoi, D. D., & Murayama, Y. (2010). Delineation of suitable cropland areas using a GIS based multi-criteria evaluation approach in the Tam Dao national park region, Vietnam. *Sustainability*, 2(7), 2024-2043. doi: 10.3390/su2072024.
- Lesser-Carrillo, L. E., Lesser-Illades, J. M., Arellano-Islas, S., & González-Pozadas, D. (2011). Balance hidrálico y calidad del agua subterránea en el acuífero del Valle del Mezquital, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28(3), 323-336.
- López-Aguilar, F. (1997). Las distinciones y las diferencias en la historia colonial del Valle del Mezquital. *Dimensión Antropológica*, 9(10), 27-70.
- López-Aguilar, F., & Bali-Chávez, G. (2002). La distribución de los asentamientos del Valle del Mezquital como un modelo de desarrollo social. *Estudios de cultura Otopame*, 3, 17-36.
- López-Aguilar, F., & Fournier, P. (2009). Espacio, tiempo y asentamientos en el Valle del Mezquital: un enfoque comparativo con los desarrollos de William T. Sanders. *Cuicuilco*, 16(47), 113-146.
- López-Zepeda, Y. (2007). *Clasificación y diagnóstico del recurso suelo en el Valle del Mezquital, Hidalgo* (tesis de licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México: México.
- MacMillan, R., & Shary, P. (2009). *Geomorphometry-Concepts, Software, Applications*. Amsterdam, The Nederlands: Elsevier.
- Maguire, D. J., Goodchild, M. F., & Batty, M. (2005). *GIS, Spatial Analysis, and Modeling*. Redlands, California: Esri Press.
- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703-726. doi:10.1080/13658810600661508.
- Matsuura, T., Sigimura, K., Miyamoto, A., & Tanaka, N. (2014). Knowledge-Based Estimation of Edible Fern Harvesting Sites in Mountainous Communities of Northeastern Japan. *Sustainability*, 6(1), 175-192. doi: 10.3390/su6010175.
- Melville, E. G. K. (1990). Environmental and Social Change in the Valle del Mezquital, Mexico, 1521-1600. *Comparative Studies in Society and History*, 32(1), 24-53.
- Mobaraki, O., Abdollahzadeh, M., & Kamelifar, Z. (2014). Site suitability evaluation for ecotourism using GIS and AHP: A case study of Isfahan Townships, Iran. *Management Science Letters*, 4(8), 1893-1898. doi: 10.5267/j.msl.2014.6.038.
- Moreno-Alcántara, B., Garret-Ríos, M. G., & Fierro-Alonso, U. J. (2006). *Otomíes del Valle del Mezquital*. México, DF: Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas.
- Morrone, J. J. (2005). Hacia una síntesis biogeográfica de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 76(2), 207-252. Recuperado el 13 de junio de 2015 de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-34532005000200006&lng=es&tlang=es
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) (2010). *Atlas de zonas áridas de América Latina y el Caribe*. La Serena, Chile: Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas.

- Ramírez-Calva, V. C. (2013). Sistemas de riego en Ixmiquilpan, Tetepango y Tula, siglos XVII-XIX. *Relaciones*, 34(136), 147-185.
- Ramírez-Martínez, J. (1998). *Análisis económico regional del Valle del Mezquital; observaciones de desarrollo* (tesis de licenciatura). Facultad de Economía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM): México.
- Romero-Álvarez, H. (1997). Case Study VII - The Mezquital Valley, Mexico. En WHO-UNEP (Eds.), *Water Pollution Control: A Guide to the Use of Water Quality Management Principles*. Suffolk, Great Britain: Helmer Hespanhol.
- Ruiz-Barrera, C. N. (2012). *Distribución y etnobotánica de Echinocactus platyacanthus Link & Otto (Cactaceae) en el Valle del Mezquital* (tesis de licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM): México.
- Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. México, DF: Limusa.
- Saaty, T. L. (2008). Relative measurement and its generalization in decision making. *Revista de La Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales. Serie A: Matemáticas*, 102(2), 251-318.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2014). *Edición de cartas geológico-mineras y geoquímicas escala 1:50 000*. Recuperado el 2 de noviembre de 2014 de http://www.sgm.gob.mx/cartas/Cartas_Ed50.jsp
- Uribe, D., Geneletti, D., Del Castillo, R. F., & Osri, F. (2014). Integrating stakeholder preferences and GIS-based multicriteria analysis to identify forest landscape restoration priorities. *Sustainability*, 6(2), 935-951. doi:10.3390/su6020935.
- Van Young, E. (1992). *Mexican Regions: Comparative History and Development*. San Diego: University of California, Center for U.S.-Mexican Studies.
- Velazco-Santiago, C., & Ojeda-Rivera, F. (1989). *Clasificación y caracterización fisonómica de la vegetación del Valle del Mezquital, Hgo.* (tesis de licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM): México.
- WorldClim (2014). *Global Climate Data - Free climate data for ecological modeling and G/S*. Recuperado el 11 de septiembre de 2014 de <http://www.worldclim.org/>
- Yan-Sui, L., Jie-Wong, W., & Li-Ying, G. (2006). GIS-Based Assessment of Land Suitability for Optimal Allocation in the Qinling Mountains, China. *Pedosphere*, 16(5), 579-586.
- Zonneveld, I. (1995). *Land Ecology: An introduction to landscape ecology as a base for land evaluation, land management and conservation*. Amsterdam, The Nederlands: SPB Academic Publishing.