

Análisis multivariado en la identificación de cuencas hidrológicas homogéneas: Caso cuenca alta del río Nazas

Multivariate analysis for the identification of homogeneous hydrological watersheds: Upper Nazas watershed case

Aldo Rafael Martínez-Sifuentes^{1*}, José Villanueva-Díaz², Juan Estrada-Ávalos³, Miguel Rivera-González³, Gerardo Delgado-Ramírez³, Julián Cerano-Paredes³

¹Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Agronomía y Zootecnia. Carretera Gómez Palacio-Tlahualilo Km. 35. Apartado Postal 1-142, C.P. 35000, Gómez Palacio, Durango, México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. Margen Derecho Canal del Sacramento Km. 6.5, Zona Industrial 4ª Etapa, C.P. 35140, Gómez Palacio, Durango, México.

*Autor para correspondencia: im_aldo09@hotmail.com

RESUMEN

La regionalización hidrológica constituye un análisis importante en el manejo integrado de cuencas, que permite identificar zonas con gran similitud para dirigir acciones en beneficio de los actores dentro del ecosistema y en procesos aguas abajo. El objetivo del presente estudio fue regionalizar hidrológicamente la cuenca alta del río Nazas a través de técnicas estadísticas multivariadas con información de fuentes nacionales e internacionales. La delimitación se llevó a cabo mediante Análisis de Componentes Principales para determinar los factores de carga y la jerarquización de las variables, se realizó una validación cruzada con dendrogramas y Curvas de Andrews. La regionalización hidrológica segmentó a la cuenca alta en tres regiones muy marcadas por sus variables, conformadas por 29, 21 y una microcuenca, las variables con mayor peso fueron la evapotranspiración, precipitación, volúmenes de escurrimiento y altura mínima de la cuenca. Este estudio permitió aplicar métodos estadísticos multivariados con un desarrollo y validación adecuada con insumos de calidad, volviéndose una opción para estudios hidrológicos en zonas con nula o escasa información climática e hidrométrica.

Palabras clave: Sistemas de Información Geográfica, regionalización, Componentes Principales, Curvas de Andrews, Dendrograma.

ABSTRACT

The hydrological regionalization, is an important analysis for the integrated management of water resources, allow to identify similar zones to make actions in benefit for the actors inside the ecosystem and downstream. The objective for this study was to hydrological regionalize the upper Nazas watershed, trough multivariate statistical techniques with national and international database. The delimitation was carried out with Principal Components Analysis to obtain the charge factors and the variable hierarchy, a cross validation was made with Dendrograms and Andrews curves. The hydrological regionalization divided the upper watershed on three marked regions for their variables, conformed by 29, 21 and one micro-watershed, the evapotranspiration, precipitation, superficial runoff and minimum height was the most important variables. This study allows to apply multivariate

techniques with a successful develop and validation, with sources of quality turning an option for hydrological studies on zones without climatic and hydrometric records.

Key words: Geographic Information System, regionalization, Principal Components, Andrews Curves, Dendrogram.

INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico constituye un elemento cada vez más limitado, en función a su calidad y cantidad, sin embargo, condiciones de exceso dan lugar a condiciones críticas de riesgo hídrico, por aumento en amenaza hidrológica, vulnerabilidad social o en conjunto, por lo tanto se vuelve de suma importancia establecer estrategias de gestión adecuadas con el fin de garantizar su uso eficiente (París y Zucarelli).

Con la finalidad de conocer las particularidades en un sistema hidrológico, son requeridos parámetros de confianza en calidad y extensión, sin embargo, el actual acervo hidroclimatológico de México presenta en ciertas zonas, carencia o mínima información (IMTA, 2005).

Uno de los más grandes desafíos en la hidrología es el conocer de manera adecuada los diversos fenómenos hidrológicos que presenta una región, ya que una adecuada cuantificación depende de las observaciones hidrológicas, y estas poseen un comportamiento estocástico, que por lo tanto, requieren de datos confiables y representativos para su estimación (Dourojeanni *et al.*, 2002).

Puesto que la cuenca hidrológica es considerada como la unidad de gestión de los recursos hídricos, la identificación de regiones hidrológicas homogéneas permite diferenciar aquellas variables con mayor importancia que definan las condiciones actuales e históricas de

las regiones, que coadyuven a establecer estrategias de conservación y manejo de cuencas, así mismo, la regionalización es usada para facilitar la transferencia de información de sitios con registros instrumentados a otros, en donde se requiere de información pero no existen (Nathan *et al.*, 1999).

La delimitación hidrológica por regiones, constituye una etapa a considerar en el manejo integrado de cuencas, dado que se busca dar una solución regional satisfactoria (Simithers *et al.*, 2001). Para estudios de regionalización hidrológica, necesario conocer las características que conforman la zona a analizar, ya que cambios en la fisiografía de la cuenca, influye de manera directa en la distribución espacial en cantidad, duración e intensidad de diversas variables climáticas (Álvarez-Olguín *et al.*, 2011). La cuenca alta del río Nazas conforma una importante región ubicada en la Sierra Madre Occidental, donde se originan los escurrimientos superficiales que satisfacen los requerimientos hídricos de la Comarca Lagunera en relación a la actividad agropecuaria, industrial y doméstica, por tal motivo el objetivo del presente estudio fue identificar zonas homogéneas en la parte alta de la cuenca del río Nazas, mediante la aplicación de técnicas estadísticas multivariadas a través de variables obtenidas de modelos de volúmenes de escurrimiento, evapotranspiración e información de bases de datos espaciales nacionales e internacionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

La cuenca alta del río Nazas se encuentra en la Región Hidrológica 36 (Figura 1), conformada por las subcuencas Sardinias y Salomé Acosta, con una superficie de 18 327 95 km² y se localiza en las coordenadas extremas 22°40' a

26°35' de LN y 101°30' a 106°20' de LO (CNA, 1998). El clima dominante en la cuenca es semiseco templado BS1Kw (w), con un gradiente altitudinal que va desde los 3283 msnm en su punto más elevado, hasta 1455 msnm en el punto más bajo, la vegetación con mayor presencia es la secundaria arbustiva de pastizal

natural, seguida por el bosque de pino-encino y bosque de pino (INEGI, 2016).

Delimitación de microcuencas hidrográficas.

Para el presente estudio se realizó una delimitación de microcuencas, con la finalidad de fragmentar la topografía de la cuenca alta del Nazas e identificar regiones homogéneas a partir de información geomorfológica y climática de cada subregión. La delimitación se llevó a cabo a través del modelo digital de elevación de INEGI con 30 m de resolución por píxel, y con el software ArcGIS versión 10.3 (ESRI, 2014) mediante las herramientas de análisis espacial “Hydrology” (Alencar et al., 2016; INEGI, 2013). Se trató de obtener una superficie mínima de 20 km² por microcuenca para representar una

extensión considerable en sus parámetros geomorfológicos y efectos climáticos.

Parámetros Geomorfológicos. Para la representación geomorfológica de cada microcuenca, se determinaron los parámetros de área (km²), perímetro (km), longitud de cauce (km), altura máxima (m), altura mínima (m), densidad de drenaje (km km⁻²) y pendiente media del cauce (%). La información de área, perímetro longitud de cauce y altitudes, se obtuvo a partir del modelo digital de elevación de INEGI y con herramientas de análisis espacial de ArcGIS como es la estadística de zona “Zonal Statistic”, la densidad de drenaje se calculó mediante la ecuación:

$$D_d = \frac{\sum L}{A}$$

Donde, Dd es la densidad de drenaje en la microcuenca, $\sum$ es la sumatoria de las corrientes de agua (km), A es el área total de la microcuenca (km²) Y la pendiente media se calculó a través de:

$$I_c = \frac{HM - Hm}{10 * L}$$

Donde, Ic es la pendiente media del cauce (%), Hm y Hm es la altitud máxima y mínima de cauce (msnm) Y L es la longitud del cauce (km).

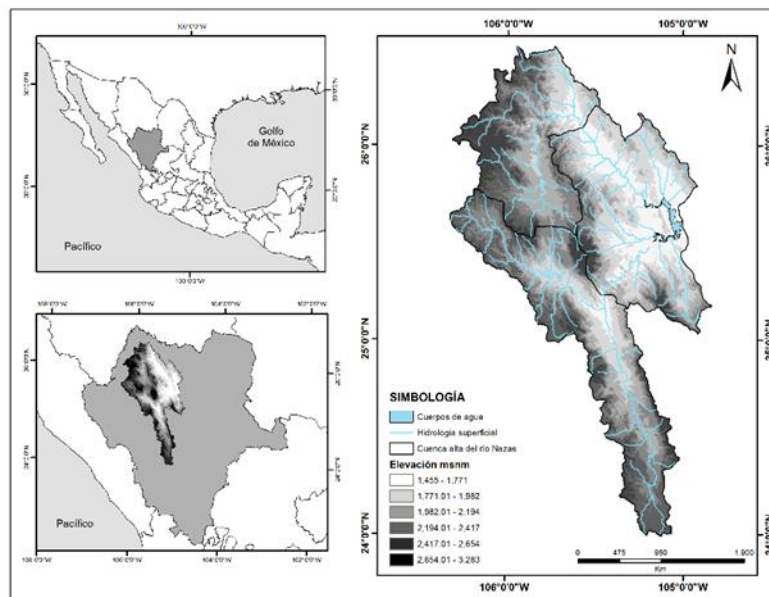


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca alta del río Nazas en el estado de Durango.

Parámetros climáticos y factores hidrológicos.

El clima es un factor determinante en la disponibilidad de recursos naturales en una cuenca hidrológica, siendo este el componente que determina la tasa de precipitación acorde a parámetros como latitud y elevación que por consiguiente producen los escurrimientos superficiales y el efecto de la temperatura en procesos fisiológicos como la evapotranspiración en la vegetación y el suelo (Uribe, 2015), que permiten delimitar regiones a partir de las características homogéneas.

$$Vm = P * Ce * A$$

Donde, Vm es el volumen medio anual de escurrimiento (m³), P es la precipitación anual de la cuenca (m), Ce es el coeficiente de escurrimiento (adimensional) y A es el área de la cuenca (m²).

La precipitación se obtuvo de la capa bioclimática reescalada de Worldclim, el coeficiente de escurrimiento Ce, se generó a partir de la clasificación de la capa de uso de suelo y vegetación de serie VI (INEGI 2014; INEGI, 2016) y la textura de la carta de edafología ambas de INEGI, para este apartado

La precipitación (mm) se obtuvo de la base de datos de WorldClim 2.0 (Fick y Hijmans, 2017) con una resolución espacial de 30 segundos (~ 1 km), capa bioclimática que se reescaló con el modelo digital de elevación de INEGI y se delimitó con el polígono de la cuenca alta del río Nazas.

El volumen de escurrimiento medio, se cuantificó a través de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 (CNA, 2000) y está dado por:

$$ce = k \frac{(P - 250)}{2000}$$

Si k es mayor que 0.15, entonces:

$$ce = k \frac{(P - 250)}{2000} + \frac{k - 0.15}{1.5}$$

Donde, Ce es el coeficiente de escurrimiento (adimensional), K es el factor de tipo y uso de suelo (adimensional). Cada valor de pixel se multiplicó por 900 m² y se dividió entre 1000 con la finalidad de obtener m³ por pixel (Díaz-Padilla *et al.*, 2012).

La evapotranspiración potencial se obtuvo a partir de la ecuación de (Thornthwaite, 1948), se generó a partir de este modelo debido a la disponibilidad de datos climáticos a nivel cuenca, ya que otros modelos requieren de mayor información climática puntual, sin embargo el modelo propuesto por Thornthwaite solamente emplea temperatura media. La variable requerida para este modelo (temperatura media) se obtuvo de la base de datos de la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales de la Universidad Nacional Autónoma de México y se reescaló con el modelo digital de elevación de INEGI (UNAM, 2011).

se identificó el valor de k de acuerdo a álgebra de mapas de acuerdo al uso y tipo de suelo (CNA, 2000).

Para determinar el coeficiente de escurrimiento, se contemplaron las siguientes expresiones a partir del valor de k.

Si k es menor o igual a 0.15, entonces:

Métodos estadísticos multivariados y validación gráfica.

Los métodos estadísticos presentan gran importancia en el manejo de datos hidrológicos debido a su capacidad de optimizar y sintetizar información (Lozares *et al.*, 1991). Además, al considerar numerosas variables que conforman las bases de datos, implica una múltiple referenciación y se vuelve una necesidad el enfoque multivariado para el procesamiento y análisis.

Para la homogeneización de las variables por microcuenca se empleó el Análisis de Componentes Principales (ACP), con la finalidad identificar las asociaciones de entidades

similares a través de los Componentes y factores de carga (Olivares, 2014). Para mostrar la representación de los resultados obtenidos se generó una validación cruzada a través de un análisis de agrupamiento mediante Dendrograma por método Ward en modalidad R y Q (Peña, 2002), y con las variables con mayor importancia se aplicó una técnica gráfica

(Andrews, 1972), la cual permite representar un punto de un espacio multidimensional en una gráfica de dos dimensiones a través de una función armónica, donde los coeficientes que afectan a las funciones seno y coseno, y el término constante están definidos por los valores para las n variables mediante la siguiente función:

$$f_x(t) = \frac{X_1}{\sqrt{2}} + \sum_{i=1}^{m1} X_{2i} \sin(it) + \sum_{i=1}^{m2} X_{2i+1} \cos(it)$$

Donde:

$$m1 = \frac{n-1}{2} = m2 \quad \text{si } n \text{ es impar}$$

$$m1 = \frac{n}{2} \quad y \quad m2 = \frac{n}{2} - 1 \quad \text{si } n \text{ es par}$$

$X_1, X_2, \dots$ representan las variables utilizadas por microcuenca y la función se grafica en el rango de $-\pi$ a π .

Andrews (1972) determinó que la diferencia entre dos curvas es proporcional a la distancia euclidiana, por lo tanto, esta técnica permite comparar visualmente grupos homogéneos. El orden de $X_1, X_2, \dots$ se estableció acorde a las cargas obtenidas del ACP.

Con la finalidad de corregir heterogeneidades del conjunto de datos y no se vean enmascarados por diferencias de unidades y/o rango de variación, se aplicó una estandarización mediante la tipificación de la Ley Normal, mediante la siguiente expresión:

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \mu}{\sigma}$$

Donde, Z_{ij} es la representación de la j -ésima observación de la i -ésima variable transformada, X_{ij} representa el valor de la j -ésima estación de la i -ésima variable, μ es la media de la variable X_{ij} y σ representa la desviación estándar de X_{ij} .

RESULTADOS

Delimitación de microcuencas hidrográficas.

La delimitación se muestra en la Figura 2 que de acuerdo al procesamiento del modelo digital de elevación de 30 m de resolución espacial, se obtuvieron 51 microcuencas distribuidas en la superficie de la cuenca alta del Nazas, cabe señalar que en este estudio se respetó la poligonal principal de la cuenca, por tal motivo se

acotaron a dicho límite con la finalidad de obtener una representación en el espacio de sus variables sin considerar superficie de cuencas vecinas, debido a este criterio solamente se obtuvo una microcuenca de las 51 con valor menor a 20 km², sin embargo el resto presentó una superficie de hasta 2940.52 km², siendo la media de 359.09 km².

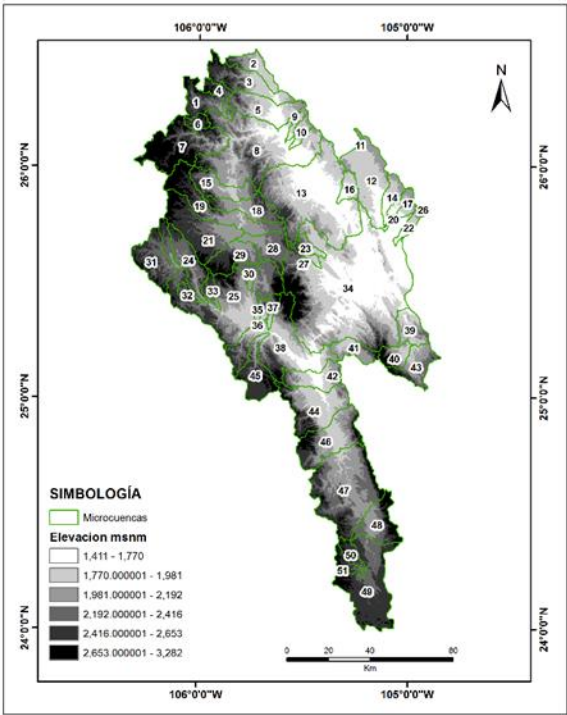


Figura 2. Microcuencas obtenidas por geo-proceso de la cuenca alta del río Nazas.

Parámetros Geomorfológicos. La información geomorfológica por microcuenca fue variada acorde a la topografía de la región; en la Tabla 1, se presenta información de datos mínimos, máximos, promedios y desviación estándar por cada una de los parámetros como representación de toda la superficie.

Tabla 1. Características geomorfológicas de microcuencas.

	Área (km ²)	Perímetro (km)	Longitud de cauce (km)	Altura máxima (msnm)	Altura mínima (msnm)	Densidad de drenaje (km km ⁻²)	Pendiente media (%)
Máximo	2940.52	431.59	125.82	3265	2300	1.68	94.09
Mínimo	4.28	20.99	6.39	2099	1411	0.03	11.75
Media	359.09	112.04	29.82	2792.31	1813.05	0.19	40.40
Desviación estándar	500.21	87.73	21.62	337.25	206.79	0.24	19.26

Parámetros climáticos y factores hidrológicos. En la Figura 3 a, b y c se presenta la distribución espacial de las variables de precipitación, volumen de escurrimiento y evapotranspiración potencial, el comportamiento de las variables se presenta considerando la elevación de la cuenca y la cobertura vegetal. La mayor concentración de la precipitación se ubica en la parte alta de la cuenca donde se encuentra la vegetación de bosque de pino. Por otro el gradiente en evapotranspiración ubica a la zona noreste de la cuenca como la más demandante de agua, en esta región se localiza la vegetación secundaria arbustiva de pastizal natural, aunado

a ello la elevación es la más baja y con los registros de temperatura más altos, lo que hace idóneo que la tasa de evapotranspiración sea mayor. Los volúmenes de escurrimiento superficial, debidos a la precipitación, cubierta vegetal, tipo y estructura de suelo, se comportan

de una manera más homogénea pero con una distribución semejante a la precipitación. La información referente a valores máximos, mínimos, medios y desviación de estas variables se presentan en la Tabla 2.

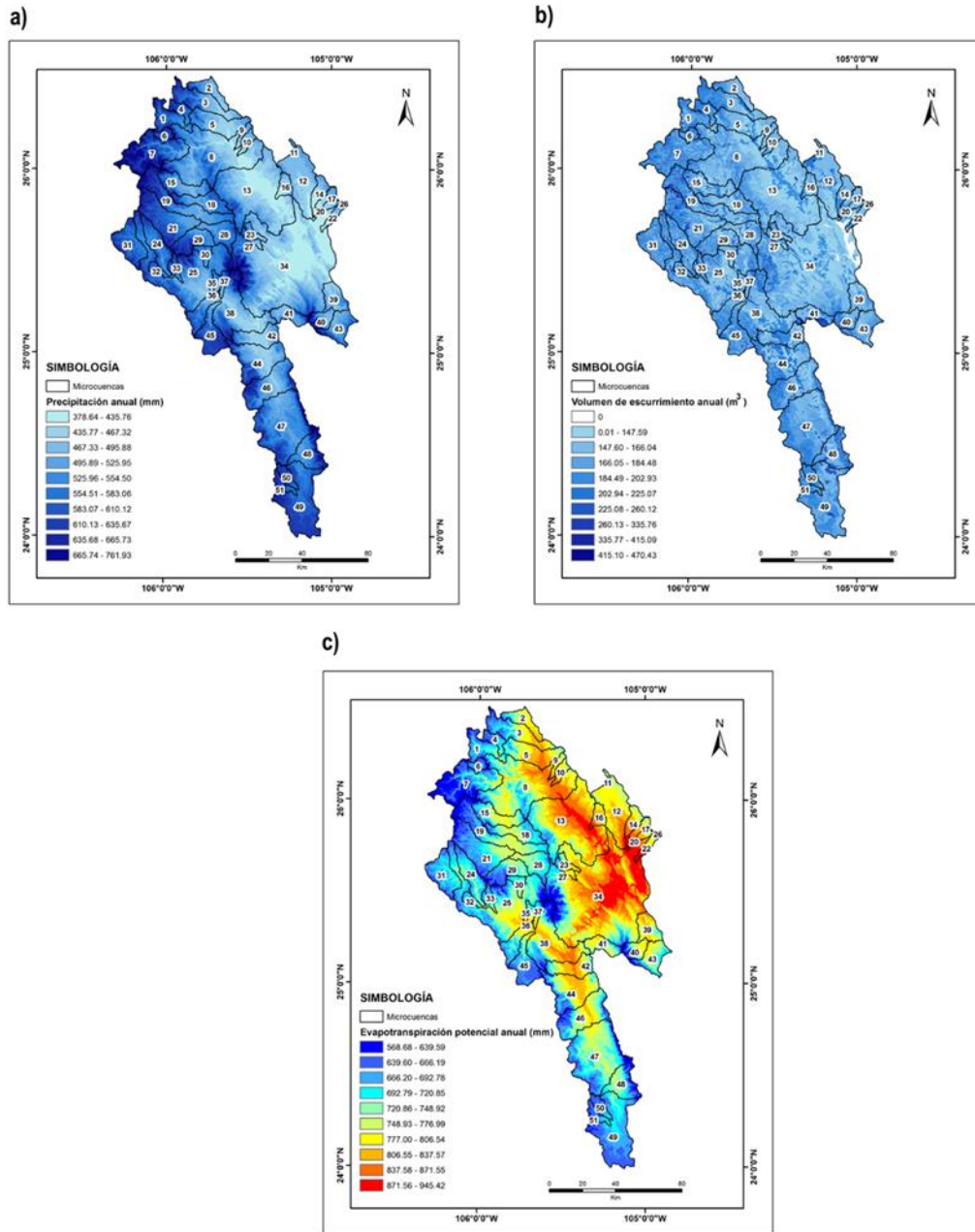


Figura 3. Distribución espacial de precipitación, volúmenes de escurrimiento y evapotranspiración potencial en la cuenca alta del río Nazas.

Tabla 2. Características climáticas e hidrológicas de las microcuencas generadas.

	Precipitación (mm)	Volúmenes de escurrimiento (m ³)	Evapotranspiración potencial (mm)
Máximo	625.58	193.74	827.02
Mínimo	455.08	151.81	660.72
Media	538.67	173.28	737.10
Desviación estándar	49.69	11.30	48.72

Métodos estadísticos multivariados y validación gráfica. La Tabla 3 y 4 presentan los resultados obtenidos del ACP, se han señalado con negritas las cargas que señalan la relación existente entre las variables y los ejes principales, lo que permite evidenciar el orden de significancia de las variables que intervienen en la regionalización. Se tomó en consideración que el autovalor (eigenvalue) sea mayor a 1 y la varianza total acumulada sea mayor al 70%. De acuerdo a lo anterior se consideraron tres Componentes Principales, los cuales representan el 88.9 % de la varianza total.

La Tabla 4 presenta las cargas que conforman a cada uno de los componentes en función de las variables consideradas. Se observa que las variables principales que intervienen en la regionalización son altura mínima, precipitación, evapotranspiración y volúmenes de escurrimiento, donde estas definen al Componente Principal 1, que posee mayor

representatividad en términos de varianza (40.7 %, acorde a la Tabla 3).

Del análisis de dendrograma Modo R método Ward (Figura 4), se aprecia que las variables de topografía presentan una fuerte relación con las variables que tienen en cuenta la respuesta de la cuenca (área, perímetro, longitud de cauce, densidad de drenaje). De igual manera se presenta una fuerte relación entre las variables que conforman el balance hidrológico y los rangos de elevación (altura máxima, altura mínima, precipitación y volumen de escurrimiento).

De la Figura 5, se ilustra el agrupamiento entre las observaciones de las microcuencas a través del Modo Q del método Ward, donde se identificaron tres regiones principales, sin embargo a través de las curvas de Andrews, se delimitaron los niveles de corte entre regiones y se confirmó lo obtenido con el dendrograma (Figura 6).

Tabla 3. Autovalores (eigenvalues) de cada Componente Principal y su varianza individual.

Orden	Autovalor	Varianza
1	4.0652	40.7
2	3.4970	35.0
3	1.3290	13.3
4	0.4922	4.9
5	0.2536	2.5
6	0.1540	1.5
7	0.0879	0.09
8	0.0620	0.06
9	0.0573	0.06
10	0.0018	0.00

Tabla 4. Carga de los factores por variable y comunalidad.

Variable	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Comunalidad
Área (km ²)	0.181	-0.463	-0.018	0.24
Perímetro (km)	0.142	-0.497	-0.042	0.29
Longitud de cauce (km)	0.163	-0.479	-0.168	0.28
Altura máxima (msnm)	-0.272	-0.378	0.258	0.28
Altura mínima (msnm)	-0.442	0.026	-0.291	0.28
Densidad de drenaje (km km ⁻²)	0.019	0.291	-0.565	0.40
Precipitación (mm)	-0.463	-0.151	-0.112	0.24
Evapotranspiración (mm)	0.466	0.140	0.120	0.25
Volumen de escurrimiento (m ³)	-0.438	-0.072	0.009	0.19
Pendiente media (%)	-0.167	0.185	0.687	0.53

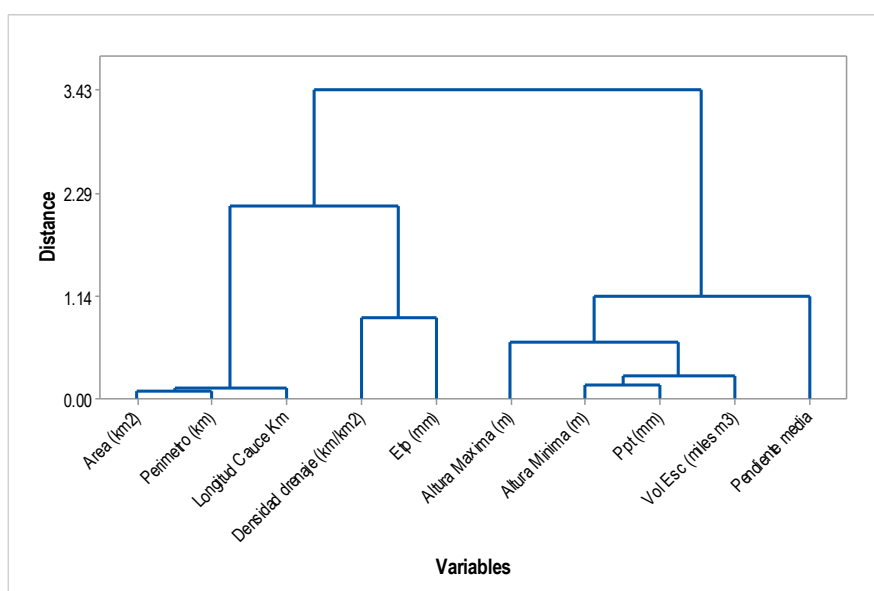


Figura 4. Dendrograma Modo R, método Ward.

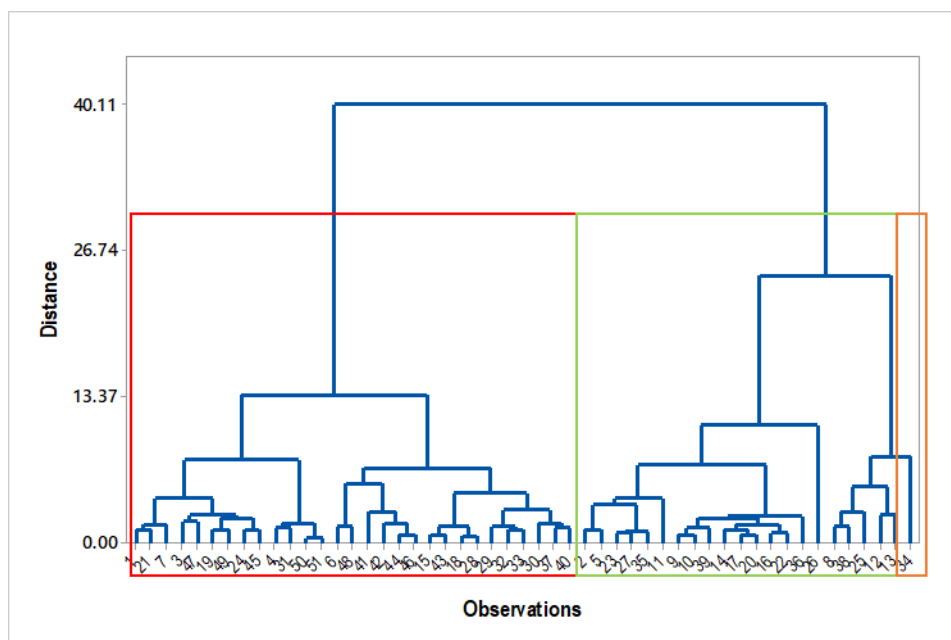


Figura 5. Modo Q, método Ward.

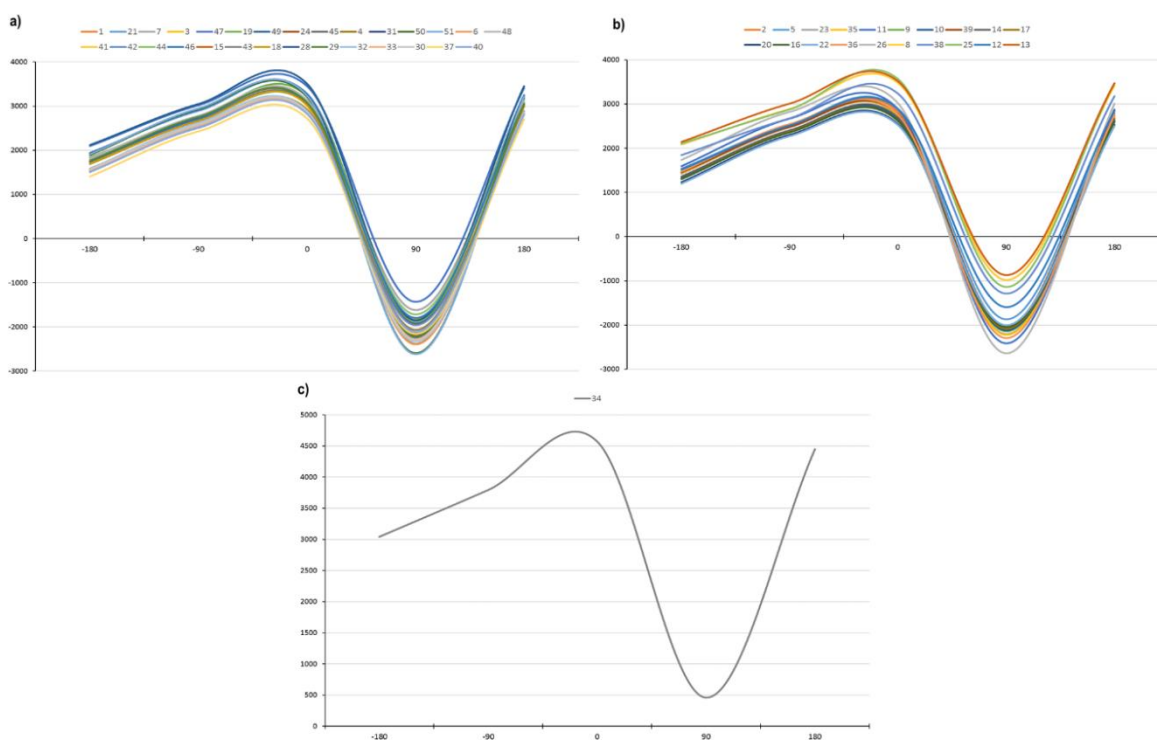


Figura 6. Curvas de Andrews. a) Región 1, b) Región 2 y c) Región 3.

DISCUSIÓN

El uso de métodos estadísticos multivariados como es el Análisis de Componentes Principales, ha sido empleado para la determinación de regiones homogéneas y para la cuantificación de variables en regiones con escasa información hidrométrica y climática (Loebis y Bagiwani, 2002; Álvares *et al.*, 2011). En el presente estudio de homogeneización de microcuencas, las variables más importantes que determinan las condiciones tanto topográficas como climáticas fueron la evapotranspiración anual, la precipitación media anual, la altura mínima y el volumen de escurrimiento, siendo en la mayoría variables referentes al balance hidrológico de una cuenca, lo que hace a este proceso un determinante en la regionalización dada la importancia de sus componentes (Ghandhari y Alavi, 2011).

Este estudio a través de los dos primeros Componentes Principales, se logró obtener una varianza acumulada de 88.9 %, lo que minimiza la intervención de variables en la homogeneización, el estudio de García *et al.*, (2017), identificaron una varianza del 80 % hasta con cinco Componentes, si bien Cliff (1987) propuso la retención de componentes que explique más del 70 % de la varianza, el supuesto del Análisis por Componentes se basa en minimizar la cantidad de variables, lo que se visualizó en este estudio.

Tavakkoli y Hashem (2014) en su estudio de homologación de áreas en Irán a través del método Ward, identificaron que cuatro de las 17 variables iniciales fueron las que más importancia presentaron, estas fueron, la precipitación media anual, área, altura media y la pendiente, situación semejante la que se presentó en este análisis, donde la precipitación y la altura fueron variables con gran importancia para la regionalización de las microcuencas.

Las curvas de Andrews permiten visualizar e interpretar los grupos principales obtenidos a través del dendrograma, donde debe tomarse en consideración que estas curvas representan funciones armónicas, cuyos coeficientes están definidos por los valores calculados de n

variables y que el orden de las variables influye de manera importante en los resultados (Embrechts y Herzberg, 1991). Las tres regiones homogéneas identificadas en este estudio, agruparon 29, 21 y una microcuenca, caso similar al encontrado por (París y Zucarelli, 2004) donde de igual manera una microcuenca presentó un comportamiento diferente a las otras dos agrupaciones a través de la validación visual con curvas de Andrews.

Si bien, en este estudio se contemplaron 10 variables que caracterizan a una cuenca hidrológica, es posible aumentar parámetros para que a través de ellas se diluya error que presente una variable que no presente gran importancia, (García *et al.*, 2017) en su estudio de delimitación de regiones en Colombia, comenzaron con 20 variables de interés hidrológico, hasta trabajar únicamente con 13, donde resalta el uso de temperatura, rendimiento hídrico y evaporación, variables no contempladas en la homogeneización en la cuenca alta del Nazas, pero que pudieran aportar más y mejor información.

Estudios con temática hidrológica en la cuenca alta del río Nazas, se vuelven de gran importancia debido a que es una zona productora de agua y abastece de recurso hídrico a La Comarca Lagunera para satisfacer las actividades agrícolas, pecuarias, domésticas e industriales (Cerano *et al.*, 2012), y diversos modelos de escenarios de cambio climático, sugieren un incremento en la aridez para las siguientes décadas, situación que provoca un incremento en la temperatura y un déficit en la disponibilidad de agua en el norte de México (Seager *et al.*, 2009).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en estas microcuencas para la región alta del Nazas en el estado de Durango, con varios métodos multivariados, han permitido identificar regiones hidrológicas homogéneas de manera consistente y corroborar mediante la expresión de Andrews, la influencia que tiene el ordenamiento de variables, para así, obtener mejores representaciones gráficas. La

información generada, tanto cartografía como de información puntual espacial y de homogenización, servirá a la generación de mejores estrategias en el ordenamiento territorial de la cuenca alta del Nazas, como se visualizó en este estudio, la precipitación, el volumen de escurrimiento superficial, la evapotranspiración y la altura máxima, fueron las variables más importantes y que definieron el orden de la función de Andrews, por lo tanto el balance hidrológico de esta cuenca en especial, define en gran medida el comportamiento general y las actividades enfocadas a la conservación del recurso hídrico promoverán a mejorar las condiciones en las microcuencas y por consiguiente obtener beneficios en la parte baja la cual es aprovechada en gran medida por el sector agropecuario. A pesar de que esta es una cuenca instrumentada, de manera espacial mediante datos históricos interpolados, se pueden determinar parámetros importantes con diversas aplicaciones hidrológicas, climáticas y sociales, tal y como se demostró en este estudio.

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio fue apoyado con recursos con fondos sectoriales SEP-CONACYT del proyecto No 283134 "Red dendrocronológica mexicana: aplicaciones hidroclimáticas y ecológicas". También se agradece a los revisores anónimos que enriquecieron al presente trabajo.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

Andrews DF (1972). Plots of High Dimensional Data. *Biometrics*, 28:125-136. <https://doi.org/10.2307/2528964>

Alencar V, Fleischmann A, Frediani P, Mainardi F, Collischonn W (2016). IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an open-source environment. *RBRH* 21(1):274-287. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p274-287>

Álvarez-Olguín G, Sustaita-Rivera E, Hotait-Salas N (2011). Identificación de regiones hidrológicas homogéneas mediante análisis multivariado. *Ingeniería Investigación y Tecnología* 11(3):277-284. <http://www.revistas.unam.mx/index.php/ingenieria/article/view/27034> Fecha de consulta 21 de octubre de 2019.

Cerano J, Villanueva J, Valdez D, Constante V, González J, Estrada J (2012). Precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del río Nazas, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(10): 7-23. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v3n10/v3n10a2.pdf> Fecha de consulta 25 de octubre de 2019.

Cliff N (1987). *Analyzing multivariate data*. USA: Harcourt, Brace, Jovanovich.

CNA (1998). *Cuencas hidrológicas*. Escala 1:250000. México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> Fecha de consulta: 21 de octubre de 2019.

CNA (2000). Norma Oficial mexicana NOM-011-CNA-2000: Conservación del recurso agua. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015 Fecha de consulta 22 de octubre de 2019.

Díaz-Padilla G, Sánchez-Cohen I, Guajardo-Panes R, Barbosa-Moreno F, Gómez-Cárdenas M, Uribe-Bernal J (2012). Modelación espacial de la producción de agua superficial de lluvia en la zona sur del estado de Puebla, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3, 69-84. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353531980005> Fecha de consulta 23 de octubre de 2019.

Dourojeanni A, Jouravlev A, Chávez G (2002). *Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica*. Chile: Comisión

- Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). <https://www.cepal.org/es/publicaciones/6407-gestion-agua-nivel-cuencas-teoria-practica> Fecha de consulta 23 de octubre de 2019.
- Embrechts P, Herzberg A (1991). A variations of Andrew's plots. *International Statistical Review* 52(2): 175-194. <https://www.jstor.org/stable/1403442>
- ESRI (2014). Software ArcGIS versión 10.3
- Fick SE, Hijmans RJ (2017). Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37(12): 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- García P, Méndez J, Zárate M (2017). Delimitaciones de regiones hidrológicas en Colombia Ingeniería y Desarrollo 35(1): 132-151. <http://dx.doi.org/10.14482/inde.35.1.8946>
- Ghandhari A, Alavi S (2011). Water balance principles: A review of studies on five watersheds in Iran, *Journal of Environmental Science and Technology* 4(5):465-479. <http://doi.org/10.3923/jest.2011.465.479>
- IMTA (2005). Extractor rápido de información climatológica. Versión 3.2.
- INEGI (2013). Continuo de elevaciones Mexicano 3.0. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/> Fecha de consulta: 22 de octubre de 2019.
- INEGI (2014). Conjunto de datos vectoriales edafológico, escala 1:250000 Serie II. Aguascalientes, México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> Fecha de consulta 28 de octubre de 2019.
- INEGI (2016). Carta de uso de suelo y vegetación serie VI. México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> Fecha de consulta: 21 de octubre de 2019.
- Loebis J, Bagiawani I (2002). Prediction of runoff in ungaged catchment using geographic information systems and digital terrain model. *PUB IAHS Decade on prediction in ungaged basins*.
- Lozares C, López P (1991). El análisis multivariado: definición, criterios y clasificación. *PAPERS, Revista de Sociología* 37:9-27. <http://dx.doi.org/10.5565/rev/papers/v37n0.1594>
- Nathan RJ, McMahon TA (1990). Identification of Homogeneous Regions for the Purposes of Regionalization. *Journal of Hydrology*, 121:217-238. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(90\)90233-N](https://doi.org/10.1016/0022-1694(90)90233-N)
- Olivares B (2014). Aplicación del análisis de Componentes Principales (ACP) en el diagnóstico socioambiental. Caso: sector Campo Alegre, municipio Simón Rodríguez de Anzoátegui. *Multiciencias* 14(4):364-374. <http://produccioncientificaluz.org/index.php/multiciencias/article/view/19470> Fecha de consulta 22 de octubre de 2019.
- Paris MC, Zucarelli GV (2004). Regionalización de caudales. Propuesta metodológica para la identificación de regiones homogéneas. *Tecnología y Ciencias del Agua* 19(4):5-19. <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/973> Fecha de consulta 22 de octubre de 2019.
- Peña D (2002). Análisis de datos multivariantes. España. McGrawHill. pp. 219-243.
- Seager M, Ting M, Davis M, Cane N, Nike J, Nakamura C, Lie E, Cook E, Stahle D (2009). Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmosfera* 22(1): 1-31. <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8616> Fecha de consulta 26 de octubre de 2019.

- Smithers JC, Schulze RE (2001). A Methodology for the Estimation of Short Duration Design Storms in South Africa Using a Regional Approach Based on L-Moments. *Journal of Hydrology*, 241.pp. 42-52.
[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00374-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00374-7)
- Thornthwaite CW (1948). An approach toward a rational classification of climate. *American Geographical Society* 38(1): 55-94. <https://doi.org/10.2307/210739>
- UNAM (2011.) Temperatura media (1903-2011). Atlas Climático Digital de México. <http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/kml/> Fecha de consulta 23 de octubre de 2019.
- Uribe E (2015). El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). pp. 13-20. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/39855-cambio-climatico-sus-efectos-la-biodiversidad-america-latina> Fecha de consulta 27 de octubre de 2019.