

Revista mexicana de ciencias forestales

ISSN: 2007-1132

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas
y Pecuarias

Meléndez-Soto, Arnulfo; López-Sánchez, Carlos Antonio; López-Serrano, Pablito
Marcelo; Montiel-Antuna, Eusebio; Solís-Moreno, Raúl; Corral-Rivas, José Javier

Comparación de técnicas de rodalización en masas forestales
de la Sierra Madre Occidental en el estado de Durango

Revista mexicana de ciencias forestales, vol. 8, núm. 41, Enero-Febrero, 2017, pp. 56-81
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63454559003>

Cómo citar el artículo

Número completo

Más información del artículo

Página de la revista en redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto



Comparación de técnicas de rodalización en masas forestales de la Sierra Madre Occidental en el estado de Durango

Arnulfo Meléndez-Soto¹

Carlos Antonio López-Sánchez²

Pablito Marcelo López-Serrano²

Eusebio Montiel-Antuna³

Raúl Solís-Moreno³

José Javier Corral-Rivas^{2*}

¹Doctorado Institucional en Ciencias Agropecuarias y Forestales. Universidad Juárez del Estado de Durango. México

²Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera. Universidad Juárez del Estado de Durango. México

³Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango. México.

*Autor por correspondencia, email: jcorral@ujed.mx

Resumen:

Las divisiones dasocráticas definidas en los Programas de Manejo, de acuerdo a los lineamientos que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-152-SEMARNAT-2006, son el rodal y el subrodal. Actualmente, el método más usado para estratificar las masas forestales se basa en la fotointerpretación, lo cual implica un alto grado de discrecionalidad que afecta a los parámetros que dependen principalmente de la rodalización para calcular las existencias volumétricas, el área basal, etcétera. Para contribuir al manejo forestal sustentable es necesario conservar la misma delimitación de las unidades básicas de manejo, en particular los rodales, mediante la unificación de criterios técnicos que permitan lograr un buen seguimiento. El objetivo de este trabajo fue comparar dos técnicas de rodalización: una de fotointerpretación y otra semiautomatizada, desarrollada en el presente estudio, basada en el análisis geomorfométrico de generación de cuencas hidrológicas, a partir de tres Modelos Digitales de Elevación (Inegi, ASTER y SRTM) y el uso de técnicas de Sistemas de Información Geográfica, con el *software* ArcGIS 10.0. Se utilizaron datos de 51 polígonos de predios bajo aprovechamiento forestal de la Sierra Madre Occidental. La comparación estadística entre los valores medios de los estadísticos de zona generados a través de fotointerpretación, y de aquellos obtenidos de forma semiautomática, no mostraron diferencias significativas en la exposición ($p>0.05$), mientras que la elevación y la pendiente registraron estimaciones estadísticamente distintas ($p<0.01$). Se concluye, que la rodalización generada a partir del método semiautomatizado permite obtener delimitaciones homogéneas de rodales en cuanto a la altitud, pendiente y exposición, independientemente del MDE utilizado.

Palabras Clave: Análisis geomorfométrico, estadística zonal, fotointerpretación, masas forestales, Modelo Digital de Elevación (MDE), rodal.

Fecha de recepción: 21 de marzo de 2017

Fecha de aceptación: 22 de abril de 2017

Introducción

Los bosques del estado de Durango representan la primera reserva forestal del país. La superficie que cubren es de 5.5 millones de hectáreas y aportan más de la cuarta parte de la producción de madera en México (Corral-Rivas *et al.*, 2015). Se estima que la superficie forestal bajo aprovechamiento en Durango es de 2 millones de hectáreas (Luján *et al.*, 2016), razón por la cual, la ordenación forestal se convierte en una tarea importante para los manejadores del bosque, quienes requieren de una adecuada delimitación y clasificación de superficies a nivel de rodal y de unidad mínima de manejo (NOM-152-SEMARNAT-2006) (DOF, 2008).

La delimitación de un rodal forestal permite la planificación de actividades de manejo, conservación y el monitoreo de los tratamientos silvícolas aplicados (Nájera-Frías *et al.*, 2013). Sin embargo, tal y como señalan Hernández-Díaz *et al.* (2008), los criterios usados por cada responsable técnico para definir las unidades básicas de manejo suelen modificarse con el paso del tiempo, originando cambios en las unidades de rodalización, lo que limita drásticamente la posibilidad de dar el seguimiento temporal (trazabilidad) requerido a la sostenibilidad de las prácticas de manejo forestal, sin importar el sistema silvícola utilizado.

De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana 152-SEMARNAT-2006, un rodal es la unidad básica de manejo forestal. Su delimitación queda definida por características permanentes como el suelo, la pendiente, los parteaguas y arroyos, lo que permite monitorear las variables dasométricas en los diferentes ciclos de corta a través del tiempo, con la probabilidad de cambio en el uso del suelo en el sistema silvícola aplicado o en otras variables. González *et al.* (2004), señalan que no existe una definición precisa en los factores que se consideran para realizar la delimitación de los rodales; sin embargo, hay diferentes procesos geoespaciales para la definición de áreas homogéneas (Velasco *et al.*, 2013). Hernández-Díaz *et al.* (2008), indica que en México existen variaciones en cuanto a la forma de caracterizar y delimitar

los rodales, recomienda que deben tomarse únicamente en cuenta aquellas particularidades que sean estables en el tiempo, como las propiedades físicas del terreno (altitud, exposición y pendientes).

La delimitación de los rodales forestales se realiza, básicamente, a partir de técnicas de fotointerpretación, por lo que los resultados dependen, en gran medida, de la experiencia computacional para interpretar la realidad en campo y de la escala empleada para la digitalización (González *et al.*, 2004). Por otro lado, en la mayoría de los casos no se cuenta con insumos digitales que correspondan a las mismas fechas a nivel cartográfico, que se elaboren mapas basados en fotografía aérea u ortofotografías de baja resolución espacial o bien, que tengan presencia de nubes (Ancira-Sánchez y Treviño, 2015).

Con base en lo anterior, es necesario generar cartografía forestal homogénea a través de la definición de flujos de procesos que faciliten una correcta rodalización y que, a su vez, permita conservar (con el paso del tiempo) la misma delimitación superficial, con la finalidad de evaluar más puntualmente las actividades silvícolas planeadas dentro de los programas de manejo.

Una opción para la generación de una rodalización estandarizada de calidad, es el uso del Modelo Digital de Elevación (MDE), definido como una representación matricial regular de la variación continua del relieve en el espacio, cuya estructura en formato de celdas favorece la implementación de algoritmos matemáticos de forma eficiente y sencilla (Burrough, 1986). En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo comparar dos técnicas de rodalización, la primera generada mediante la metodología tradicional basada en la fotointerpretación y la segunda propuesta desarrollada mediante un método semiautomatizado basado en análisis geomorfométrico de generación de cuencas hidrológicas a partir del MDE, empleando metodologías de SIG con software libre (Pike, 2000; Rasemann *et al.*, 2004).

Materiales y Métodos

Área de estudio

Se ubica en la Sierra Madre Occidental (SMO), al suroeste del estado de Durango, México. Comprende parte de los municipios , Pueblo Nuevo, Durango y San Dimas en la UMAFOR 1008, entre las coordenadas extremas 106°00'0.668" O, 23°03'2.2" N y 105°11'12.2" O, 24°11'57.8" N (Figura 1).

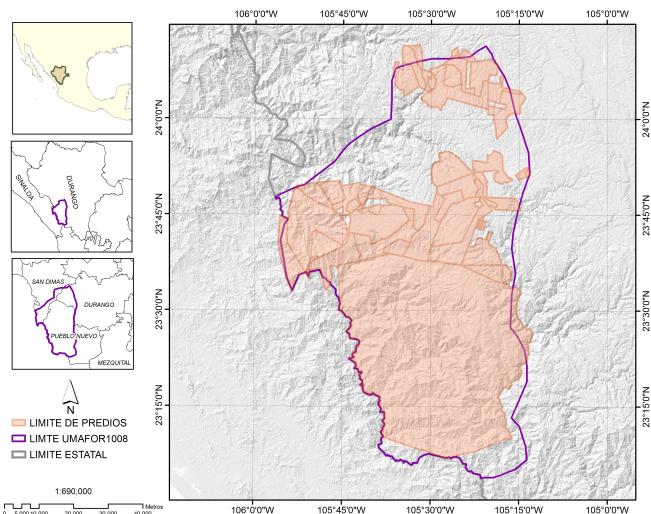


Figura 1. Localización del área de estudio.

La superficie del área de estudio es de 853 255.98 ha, localizada en la gran provincia denominada Sierra Madre Occidental. Los sistemas de topoformas que presenta son de Gran Meseta con Cañadas, Sierra Alta con Cañadas y Cañón Típico. La altitud media sobre el nivel del mar es de 1 784 m, con una máxima de 3 321 m y mínima de 242 m. Las pendientes fluctúan en un intervalo de 0 % a más de 100 %, con un promedio de 19.2 %. Los climas que se registran en la región se

representan en un 97 % por el clima C(w₂)a (templado subhúmedo con verano cálido) y el restante 3 % del territorio, el clima (A)C(w₂)(w) (semicálido subhúmedo del grupo de los templados), según la clasificación climática de Köppen modificada por García (1988). En la Figura 2, se presentan las nueve subcuencas hidrográficas que integran el área de estudio.

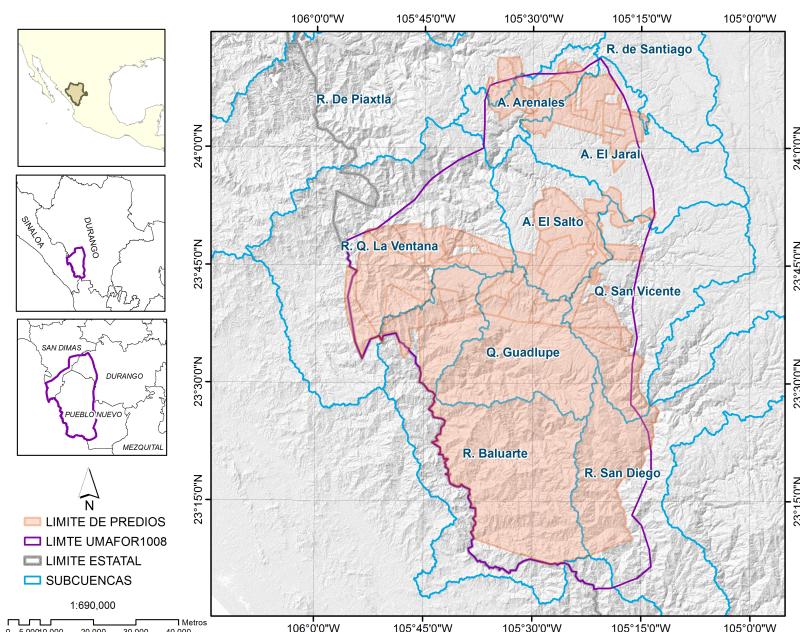


Figura 2. Subcuencas hidrográficas del área de estudio.

En la zona predominan las coberturas vegetales del tipo de bosque de pino, pino-encino y encino (85 % de cobertura), selva baja caducifolia y subcaducifolia (6 %), pastizal inducido (6 %); y agricultura de temporal, selva mediana caducifolia y subcaducifolia, asentamientos humanos y chaparral (3 % restante). Los tipos de suelo que dominan son Regosol (38 %), Litosol (34 %) y Cambisol (17 %); y en menor proporción: Acrisol (5 %), Ranker (4 %) y Vertisol (2 %).

En el presente trabajo se utilizaron dos fuentes de datos provenientes de 51 polígonos de predios forestales manejados por personal de la Unidad de Prestación de Servicios Ejidales Núm. 6 (UPSE Núm. 6). La primera base de datos consistió en

los rodales generados a partir de técnicas fotogramétricas, mediante la utilización de ortofotografías digitales (Inegi, 2013). La digitalización de los rodales fue realizada por personal técnico de la UPSE Núm. 6, con base en criterios de fotointerpretación con el programa *ArcGIS* 10.0 (ESRI, 2011), y corresponde con su rodalización más reciente (ciclo de corta 2017-2027). Para fines de comparación, se hizo la unión de los polígonos de los predios asignando un identificador único para cada rodal.

La segunda base de datos consistió en la generación de rodales con procedimientos semiautomáticos, a través de procesos geoespaciales con el programa de SIG, a partir del insumo digital correspondiente a tres Modelos Digitales de Elevación (MDE). Los MDE considerados fueron: (i) Inegi, del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Ávalos, 2004; Inegi, 2015); (ii) ASTER del satélite *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (Abrams, 2000; NASA 2015); y (iii) SRTM de la misión *Shuttle Radar Topography Mission* (Rabus *et al.*, 2003; USGS, 2015). Los MDE tienen un tamaño de pixel de 30 m x 30 m y están georreferenciados a coordenadas proyectadas UTM zona 13, *datum WGS84*.

Para la delimitación de los rodales o microcuencas se utilizaron como base las subcuencas del Geoportal de Información SIATL (2015) del Inegi, compuesta de información vectorial de la Red Hidrográfica a escala 1:50 000, la cual modela el drenaje superficial de una cuenca hidrográfica.

Rodalización mediante análisis geomorfométrico de superficies del MDE

Depuración de errores en los MDE. Los MDE utilizados en la rodalización presentan diferentes fuentes de error: (i) posicionales, deficiente localización geográfica de los puntos acotados o de la trayectoria de la curva de nivel; (ii) valores de altitud; o

(iii) relacionados con el proceso de interpolación. Los más comunes se refieren a la existencia de depresiones, áreas rodeadas por celdas con mayor altitud; y de picos (*peaks*), los cuales están rodeados por áreas o celdas con altitudes más bajas (Pérez y Mas, 2009).

Con el fin de evitar el efecto de depresiones en los MDE, se aplicó un geoprocreso de dirección de flujo (Neteler, 2005), mediante el programa *GRASS GIS®* (GRASS, 2012). Posteriormente, se llevó a cabo una prueba de medias (*t de student*) para comprobar la existencia de diferencias significativas en la variable altitud, entre los diferentes MDE analizados.

Delimitación los rodales

Los rodales se delinearon de forma semiautomática a partir de los MDE en el programa *GRASS GIS®* (Jasiewicz y Metz, 2011; GRASS, 2012). Se especificó el tamaño mínimo deseado, para ello se empleó como base la superficie media de rodal obtenida de la base de datos fotogramétrica, con 115 ha y un tamaño mínimo de 10 ha. Se consideró el tamaño del pixel de los modelos, de 30 m x 30 m (900 m² por cada celda), para una hectárea (10 000 m²) y se determinó un tamaño de 11.11 celdas ha⁻¹; por lo tanto, para delimitar cuencas con un tamaño mínimo de 10 ha se utilizó un valor de 111.11 celdas.

Una vez creada la división dasocrática, los rodales se convirtieron a formato vectorial para después suavizar la línea de borde, eliminando aquellos polígonos menores a 10 ha, mediante rutinas desarrolladas en lenguaje de programación de código abierto *PYTHON* (van Rossum y Drake, 2011), para obtener las microcuencas o rodales.

En la Figura 3, se muestra el primer modelado del terreno para la delineación semiautomática de rodales a partir de un MDE en un flujo de procesos, en el cual se definieron los polígonos base de microcuencas y la red de drenaje, con el método de

jerarquización de *Strahler*, en el cual los tramos de drenaje de primer orden reciben el agua directamente de las laderas (Zambrano *et al.*, 2011).

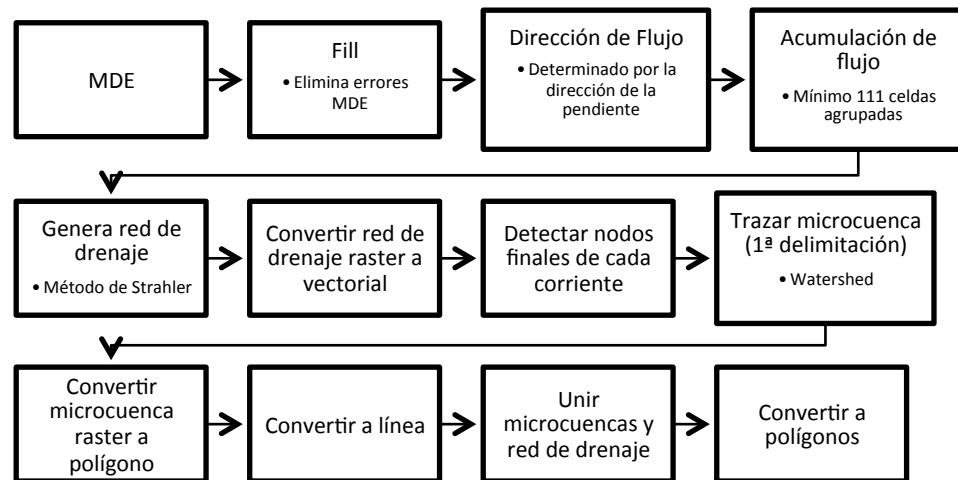


Figura 3. Bloque I: Primera fase de procesos para la delineación semiautomática de rodales.

El segundo bloque de procesos (Figura 4) muestra un ciclo con cada uno de los polígonos generados en el bloque anterior, se intersectan con la red de drenaje que contengan para realizar una subdivisión del mismo y conformar los rodales del área de estudio.



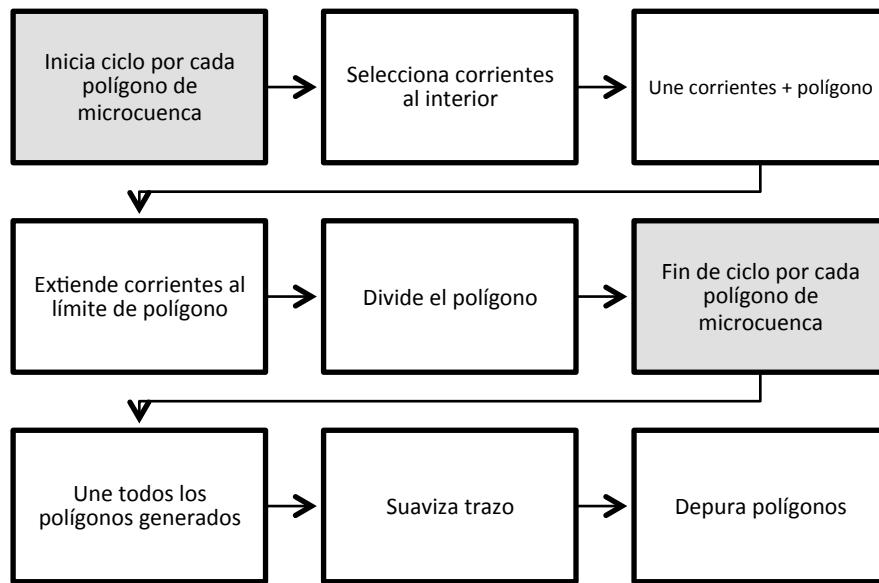


Figura 4. Bloque II: Segunda fase de procesos para la delineación semiautomática de rodales.

Con los geoprocessos de análisis espacial se derivaron los intervalos de pendientes (en porcentajes) y, a su vez, se reclasificaron y codificaron como se resume en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Asignación de clases a rangos de pendientes.

| Pendiente en grados | Definición |
|---------------------|---------------------|
| 0 | Plano |
| 1 a 5 | Relativamente plano |
| 6 a 10 | Medio |
| 11 a 20 | Fuerte |
| 21 a 30 | Escarpado |
| Más de 30 | Muy escarpado |

Posteriormente, se realizó la clasificación de los datos de exposiciones de acuerdo al Cuadro 2.

Cuadro 2. Clasificación de rangos de exposición.

| Exposición | Definición |
|---------------|------------|
| De -1 a 0 | Plana |
| 0 a 22.5 | Norte |
| 22.5 a 67.5 | |
| 67.5 a 112.5 | Este |
| 112.5 a 157.5 | |
| 157.5 a 202.5 | Sur |
| 202.5 a 247.5 | |
| 247.5 a 292.5 | Oeste |
| 292.5 a 337.5 | |
| 337.5 a 360 | Norte |

Estadísticas zonales

Se calcularon los valores de las variables altitud, pendiente y exposición media derivadas de los distintos MDE, mediante la aplicación del geoprocreso de estadístico de zona (QGIS, 2014). Este procedimiento permite estimar los estadísticos

descriptivos de los píxeles de la capa *ráster* (MDE), a través de la superposición de una capa vectorial de polígonos, correspondiente a los rodales generados.

Análisis estadístico

La comparación estadística entre los valores medios de las variables de altitud, pendiente y exposición de los rodales generados en el proceso con el uso de fotointerpretación de imágenes visualizadas en la computadora y los generados de forma semiautomática para este estudio, se realizó a través del método no paramétrico de *Kruskal-Wallis* (Kruskal y Wallis, 1952), que no asume como hipótesis la normalidad de los datos y la homogeneidad de varianza. La significancia de las diferencias se determinó considerando un nivel de confianza de 95 % ($\alpha = 0.05$). El análisis se hizo con el procedimiento *NPAR1WAY* del sistema estadístico SAS/STAT® (SAS, 2008). Asimismo, se elaboraron diagramas de caja y ejes para cada variable con el fin de facilitar la interpretación de los resultados.

Resultados y Discusión

Depuración de errores en los MD

Los resultados de la comparación estadística de la altitud media de los rodales para los MDE estudiados entre el modelo de origen y el corregido, se muestran en el Cuadro 3. En todos los casos no se observaron diferencias estadísticas significativas entre los valores medios de altitud ($p>0.05$). El MDE de Inegi no presentó ninguna diferencia, y los de la NASA (ASTER y SRTM) tuvieron diferencias mínimas.

Cuadro 3. Estadísticos descriptivos de los MDE antes y después de corregidos.

| Estadístico | Inegi | | ASTER | | SRTM | |
|-------------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|
| | O | C | O | C | O | C |
| Mínima | 113 | 113 | 110 | 110 | 114 | 114 |
| Máxima | 3 107 | 3 107 | 3 127 | 3 127 | 3 120 | 3 120 |
| Media | 1 952.28 | 1 952.28 | 1 966.25 | 1 967.06 | 1 960.2 | 1 960.35 |
| Desv. Est. | 641.09 | 641.09 | 643.7 | 643.86 | 641.39 | 641.3 |

O= Modelo de origen; C = Modelo corregido.

Comparación de las técnicas de rodalización

En el Cuadro 4 se presentan los estadísticos descriptivos correspondientes a las variables de altitud, pendiente y exposición para los rodales o microcuencas generados a partir de cada una de las técnicas de rodalización evaluadas. La técnica fotogramétrica genera un mayor número de rodales, en comparación con el método semiautomatizado.

El análisis de la altitud media de los rodales, mediante el método semiautomatizado registra una variación de 18 a 93 m entre los MDE ASTER y SRTM, con respecto al del Inegi. Los intervalos de pendiente de los rodales variaron en el primer modelo, describieron un terreno escarpado. En la variable exposición no se observan variaciones importantes, el resultado fue una exposición predominante al sur.



Cuadro 4. Estadísticos descriptivos de los rodales obtenidos con el método semiautomatizado y con el empleo de la técnica de fotointerpretación, a partir de los 51 polígonos de los predios utilizados en este trabajo.

| Indicador | Método | | Técnica | |
|------------------|-------------------------|-------------|-----------------------|--------------|
| | semiautomatizado | | fotogramétrica | |
| | ASTER | SRTM | Inegi | Inegi |
| Núm. de Rodales | 2 199 | 2 188 | 2 194 | 3 750 |
| Altitud media | 1 772 | 1 754 | 1 847 | 2 113 |
| Altitud mínima | 292 | 252 | 242 | 312 |
| Altitud máxima | 2 847 | 2 827 | 2 811 | 2 891 |
| Pendiente media | 22 | 22 | 23 | 19 |
| Pendiente mínima | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Pendiente máxima | 42 | 47 | 49 | 50 |
| Exposición media | 175 | 178 | 175 | 177 |

En la Figura 5, se observa continuidad y homogeneidad en el trazado de los rodales correspondientes a los tres MDE generados con el método semiautomatizado basado en el análisis geomorfométrico de superficies de los distintos MDE analizados.



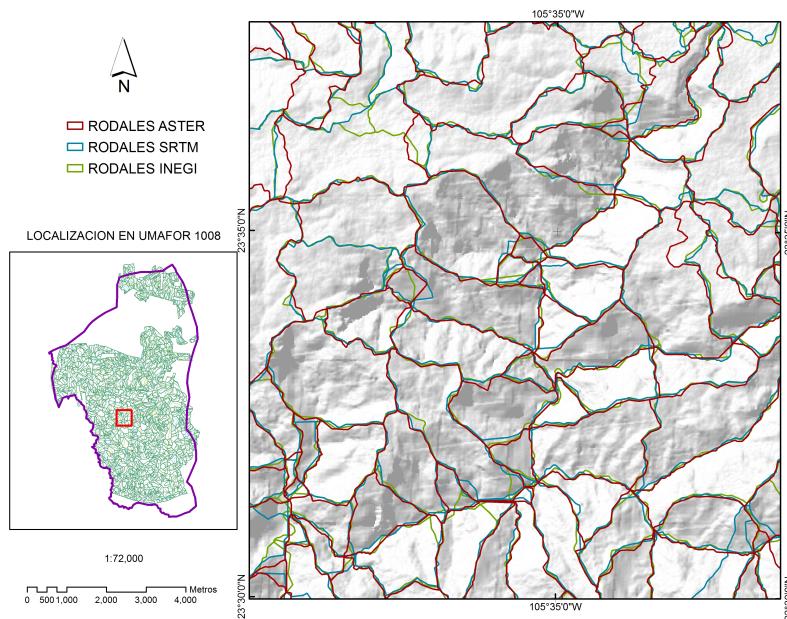


Figura 5. Rodales generados a partir de los MDE ASTER, SRTM e Inegi mediante el método semiautomatizado.

Los resultados de la prueba no paramétrica de *Kruskal-Wallis*, realizada para evaluar diferencias significativas en la generación de rodales mediante la técnica fotogramétrica y el método semiautomatizado, en el análisis geomorfométrico de superficies de los diferentes MDE, se muestran en el Cuadro 5. Se determinaron diferencias altamente significativas ($p<0.01$) entre los MDE para las variables altitud y pendiente, mientras que para la exposición no hubo diferencias significativas ($p>0.05$).

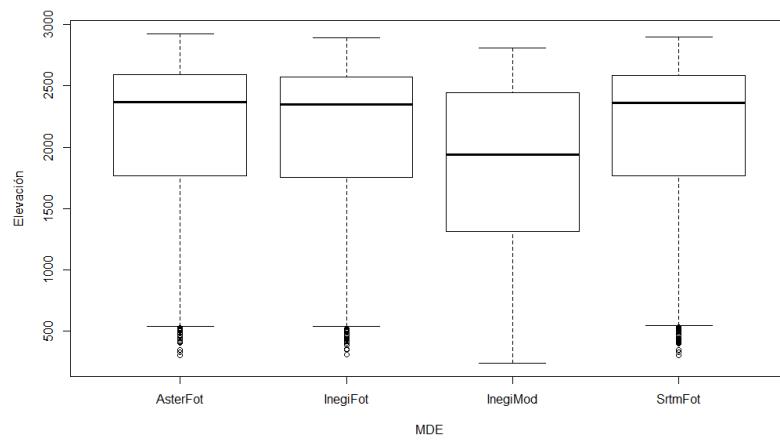


Cuadro 5. Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para evaluar diferencias en las variables consideradas entre los rodales generados mediante técnicas fotogramétricas, y el método semiautomático de análisis geomorfométrico de superficies de los diferentes MDE.

| MDE | Altitud | Pendiente | Exposición |
|---------------------|---------|-----------|------------|
| InegiFot - InegiMod | <0.0001 | <0.0001 | 0.2648 |
| InegiFot - AsterMod | <0.0001 | <0.0001 | 0.1928 |
| InegiFot - SrtmMod | <0.0001 | <0.0001 | 0.5875 |

Fot = MDE de los rodales generados mediante técnicas fotogramétricas; Mod = MDE de los rodales generados mediante el método semiautomático de análisis geomorfométrico de superficies.

En la Figura 6, se presentan los valores medios de cada variable y MDE a través de gráficos de caja y eje.



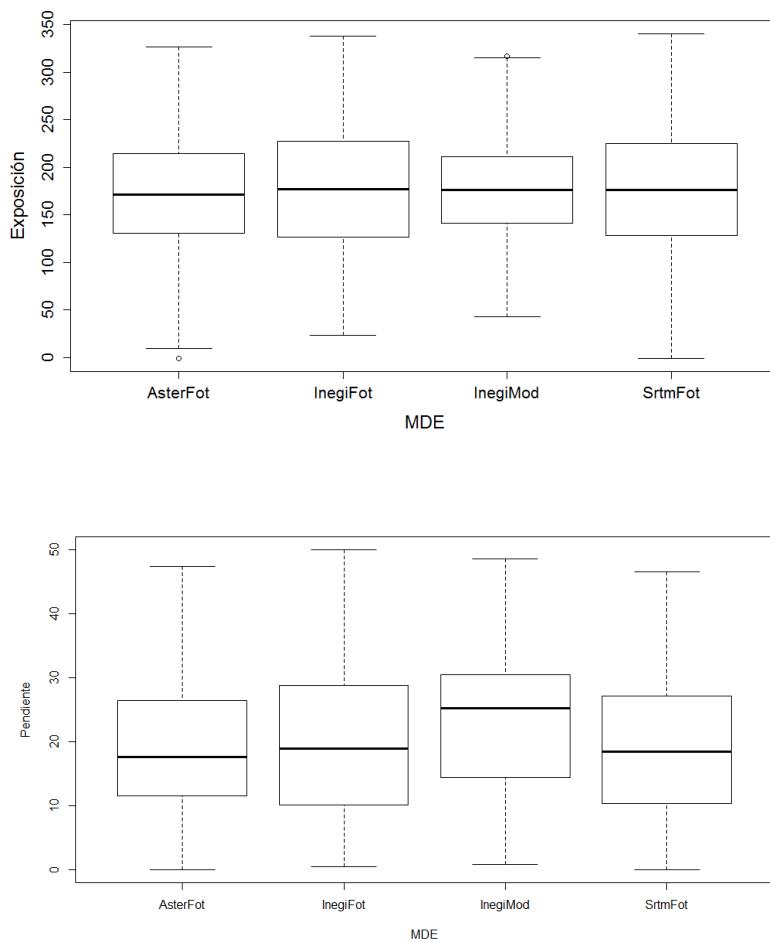


Figura 6. Gráfico de caja y ejes para las variables estimadas para rodales fotogramétricos (InegiFot) y los generados por el método semiautomatizado de análisis geomorfométrico de superficies de los tres MDE.

Sobresale que no existen diferencias significativas en la variable exposición, entre los rodales generados mediante la técnica de fotointerpretación y la obtenida con el método semiautomático propuesto, debido a que en todos los casos se considera la red hidrológica como el rasgo principal para la rodalización. Sin embargo, González *et al.* (2004) documentan una fuerte influencia de la exposición en la definición de los rodales. Por otra parte, la variable exposición, al ser relativamente fácil de

fotointerpretar de manera directa sobre la computadora, se convierte en el principal rasgo del terreno que sirve de apoyo para delimitar los rodales.

A partir del método semiautomatizado basado en los MDE, se genera una definición de la agrupación de valores de exposición de forma precisa y una delimitación de áreas similares a la que se realiza mediante métodos tradicionales. La Figura 7 ilustra una comparación visual de la delimitación de los rodales realizada por la técnica de fotointerpretación y el método semiautomatizado de análisis de geomorfométrico de superficies a partir del MDE del Inegi, considerando la exposición como la principal variable de entrada de los modelos. En la Figura 7 no se aprecian diferencias importantes en la delimitación de rodales respecto a la exposición con las dos técnicas de rodalización evaluadas.



Figura 7. Superposición de las capas de rodales generadas a partir de la variable exposición sobre una imagen de *Google earth* con técnicas fotogramétricas (color fucsia) y el método semiautomatizado de análisis geomorfométrico de superficies del MDE del Inegi (color rojo).

Los estadísticos de zona para las variables pendiente y altitud estimados por el método semiautomatizado difirieron significativamente de los valores obtenidos con la técnica de fotointerpretación. Bajo el supuesto de que la capa de rodales generados por esta última representa la situación deseada, se podría decir que el método semiautomatizado propuesto origina estadísticos de zona que difieren estadísticamente de los producidos en la rodalización a través del método tradicional.

Estas diferencias podrían explicarse debido a que mediante la fotointerpretación, el técnico forestal no logra capturar toda la variabilidad para la pendiente y la altitud en el área de estudio (Ancira-Sánchez y Treviño, 2015). Sin embargo, existen otros aspectos importantes por considerar, los cuales tendrían lugar durante el proceso de rodalización y ser causantes de la existencia de diferencias, por ejemplo: la subjetividad del fotointérprete, malos trazos o desfases en los límites de rodales, con respecto a las curvas de nivel o cotas de pendiente, uso de fotografías aéreas u ortofotografías de baja resolución espacial (Aguirre, 2013; Ancira-Sánchez y Treviño, 2015). Una alternativa viable para mejorar la técnica de fotointerpretación de rodales consistiría en el empleo de imágenes aéreas o satelitales de muy alta resolución espacial que favorezcan la identificación de objetos ubicados en la superficie, pero presenta el inconveniente de representar costos altos de inversión (Ancira-Sánchez y Treviño, 2015; Valdez *et al.*, 2006).

Por otra parte, los estadísticos de zona para las variables pendiente y elevación generados mediante el método semiautomatizado presentan la ventaja de que se obtienen con los mismos criterios y en un tiempo considerablemente más corto, comparado con la técnica fotogramétrica, por lo que se visualiza como una herramienta útil y con potencial para apoyarse y supervisar la cartografía de los programas de manejo forestal. Su uso también permite obtener una delimitación estandarizada de polígonos asegurando la continuidad de límites contiguos al exterior de los predios.

Las diferencias de trazo en la delimitación de rodales entre los métodos descritos se aprecian en la Figura 8, la cual se obtuvo al exportar la delimitación de ambas capas a formato KML de *Google Earth* y, posteriormente, visualizarlo con un factor de altitud para observarlo en 3D. Los rodales generados con el I método semiautomatizado a partir de los MDE muestran una mejor delineación en las partes altas de los predios, así como en los arroyos, donde la pendiente es pronunciada; aunque, no delimitan, en forma clara, las zonas de valles, o áreas relativamente planas. Por otro lado, se observa que la delimitación de rodales por técnicas fotogramétricas presenta diferencias de continuidad en los límites de los predios adyacentes, lo que es corregible empleando la metodología propuesta.

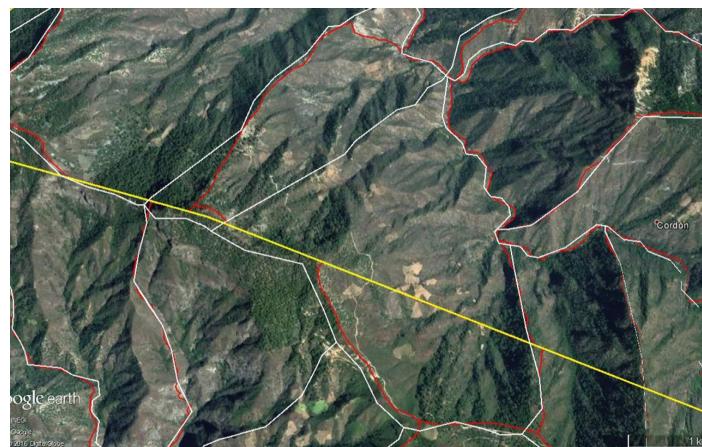


Figura 8. Detalle comparativo de la rodalización: sobre una imagen de *Google Earth* con técnicas fotogramétricas (color rojo) y el método semiautomatizado basado en el análisis geomorfométrico de superficies a partir del MDE-Inegi (color blanco); en amarillo el límite de predio.

Con base en los resultados de este trabajo, se recomienda el empleo de los MDE como insumo base para la generación de microcuencas, independientemente, de la fuente de generación (ASTER, STRM e Inegi), dado que todas mostraron resultados

similares, son de libre acceso y su cobertura es nacional o global. La depuración de los errores a través de método aquí presentado es relativamente sencilla, a diferencia de generar el modelo a partir de curvas de nivel (González *et al.*, 2004). Existen diversos estudios comparativos (Szabó *et al.* 2015; Forkuor y Maathuis, 2012; Huggel *et al.* 2008) para los MDE de ASTER y SRTM, en los que se concluye que ambos son factibles de usarse en aplicaciones de geomorfología.

Conclusiones

La comparación realizada en los 51 polígonos de predios, entre las técnicas de generación de rodales mediante técnicas de fotointerpretación y el método semiautomático de análisis geomorfométrico de superficies de los tres MDE analizados, no mostró diferencias estadísticas significativas en la variable exposición, mientras que para altitud y pendiente se observaron estimaciones estadísticamente distintas.

Se concluye que, la rodalización generada a partir de métodos semiautomatizados permite obtener delimitaciones de rodales homogéneos en cuanto a las características de altitud, pendiente y exposición para los MDE Inegi, ASTER y SRTM.

La metodología semiautomatizada, basada en análisis geomorfométrico, es de fácil aplicación, no conlleva costos adicionales y puede ser implementada en programas libres o comerciales. Su empleo no excluye la intervención del usuario para editar los polígonos y realizar una extracción con buen nivel de confiabilidad, sobre todo en las áreas planas.

Se recomienda emplear la metodología propuesta con la finalidad de asegurar homogeneidad y continuidad de los límites perimetrales contiguos de los predios, así como para tener delimitaciones permanentes de polígonos a nivel de rodal que

posibiliten el seguimiento de trazabilidad temporal requerido, respecto a la sostenibilidad de las prácticas de manejo forestal.

Agradecimientos

Se agradece al Conacyt por el apoyo financiero otorgado al primer autor para estudiar en el programa de Doctorado Institucional en Ciencias Agropecuarias y Forestales (DICAF).

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por Autor

Arnulfo Meléndez-Soto: preparación de cartografía, diseño e implementación del algoritmo y elaboración del manuscrito; Carlos Antonio López-Sánchez: diseño e implementación del algoritmo, revisión del manuscrito y análisis estadístico; Pablito Marcelo López-Serrano: preparación de cartografía, diseño e implementación del algoritmo y elaboración del manuscrito; Eusebio Montiel-Antuna: apoyo en resultados y discusión del escrito; Raúl Solís-Moreno: revisión y sugerencias del manuscrito en lo relativo a los resultados, discusión y conclusiones; José Javier Corral-Rivas: elaboración del manuscrito, análisis estadístico y coordinación de las revisiones.

Referencias

- Abrams, M. 2000. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. *International Journal of Remote sensing* 21(5):847-859.
- Aguirre S., C. A. 2013. Modelación geoespacial de variables de densidad forestal. Doctoral dissertation. Universidad Autónoma de Nuevo León. San Nicolás de los Garza, N.L., México. 105 p.
- Ancira-Sánchez, L. y E. J. Treviño G. 2015. Utilización de imágenes de satélite en el manejo forestal del noreste de México. *Madera y Bosques* 21 (1):77-91.
- Ávalos N., D. 2004. Continúo de Elevaciones Mexicano. *Revista Cartográfica* (78/79):49-51.
- Burrough, P. A. 1986. *Principles of Geographic Information Systems for Land Resource Assessment*. Monographs on Soil and Resources Survey. Oxford Science Publications. New York. NY USA. pp. 37-52.
- Corral-Rivas, S., J. G. Álvarez-González, J. J. Corral-Rivas y C. A. López-Sánchez. 2015. Characterization of diameter structures of natural forests of northwest of Durango, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 21(2):221–236.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2008. Norma Oficial Mexicana NOM-152-SEMARNAT-2006. Semarnat. 17 octubre 2008. México, D. F., México. 24 p.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). 2011. *ArcGIS Desktop: Release 10*. Environmental Systems Research Institute. Redlands, CA USA. n/p.
- Forkuor, G. and B. Maathuis. 2012. Comparison of SRTM and ASTER Derived Digital Elevation Models Over Two Regions in Ghana-Implications for Hydrological and Environmental Modeling. <http://cdn.intechopen.com/pdfs/32991.pdf> (4 de enero de 2016).

García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Serie Libros. Núm. 6. Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F., México. 90 p.

González M., R., E. J. Treviño G., O. A. Aguirre C., J. Jiménez P., I. Cantú S., y R. Foroughbakhch Pournavab. 2004. Rodalización mediante sistemas de información geográfica y sensores remotos. *Investigaciones Geográficas* 53: 39-57.

Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) 2012. Geographic Resources Analysis Support System Development Team. Software Version 6.4.1. Open Source Geospatial Foundation. <http://grass.osgeo.org> (29 de agosto de 2012).

Hernández-Díaz, J. C., J. J. Corral-Rivas, A. Quiñonez-Chávez, J. R. Bacon-Sobbe y B. Vargas-Larreta. 2008. Evaluación del manejo forestal regular e irregular en bosques de la Sierra Madre Occidental. *Madera y Bosques* 14(3):25-41.

Huggel, C., D. Schneider, P. J. Miranda, H. Delgado G. and A. Kääb. 2008. Evaluation of ASTER and SRTM DEM data for lahar modeling: a case study on lahars from Popocatépetl Volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 170 (1-2):99-110.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). 2013. Ortofoto digital Aspectos teóricos/metodológicos.

<http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/Preview.aspx> (20 de febrero de 2015).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). 2015. "Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0".

<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx> (9 de marzo de 2015).

Jasiewicz, J. and M. Metz. 2011. A new GRASS GIS toolkit for Hortonian analysis of drainage networks. *Computers & Geosciences* 37 (8):1162-1173.

Kruskal, W. H. and A.W. Wallis. 1952. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association* 47(260):583-621.

Luján Á., C., J. M. Olivas G., H. G. González H., S. Vázquez Á., J. C. Hernández D. y H. Luján Á. 2016. Desarrollo forestal comunitario sustentable en la región norte de México y su desafío en el contexto de la globalización. *Madera y Bosques* 22(1):37-51.

Nájera-Frías, J., A. Pinedo-Álvarez, F. Cruz-Cobos, S. Corral-Rivas, y R. Meraz-Alemán. 2013. Modelación geoespacial del potencial natural de bosques templados en Pueblo Nuevo, Durango. *Tecnociencia Chihuahua* 7(1):39-48.

National Aeronautics and Spatial Administration (NASA). 2015. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/#utf8=%E2%9C%93&spatial_map=satellite&spatial_type=rectangle (22 de mayo de 2014).

Neteler, M. 2005. GRASS 6: una guia de inicio. Geospatial Open Source. University of Minnesota, Minneapolis. https://www.grassbook.org/wp-content/uploads/neteler/osg05/g63_nutshell_v1_1_es.pdf (21 de abril de 2015).

Pérez V., A. y J. F. Mas. 2009. Evaluación de los errores de modelos digitales de elevación obtenidos por cuatro métodos de interpolación. *Investigaciones Geográficas*. 69: 39-57.

Pike, R. J. 2000. Geomorphometry - diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography* 24(1):1-20.

QGIS. 2014. Quantum Gis. Documentación.

http://docs.qgis.org/2.2/es/docs/user_manual/plugins/plugins_zonal_statistics.html (4 de noviembre de 2014).

Rabus, B., M. Eineder, A. Roth and R. Bamler. 2003. The shuttle radar topography mission a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 57(4):241-262.

Rasemann S., J. Schmidt, L. Schrott and R. Dikau. 2004. Geomorphometry in mountain terrain. *In:* Bishop, M. P. and J. F. Shroder (ed.). GIS & Mountain Geomorphology, Springer. Berlin, Germany. pp. 101-145.

Statistical Analysis System (SAS). 2008. User's Guide. SAS/ETS® Version 9.2. SAS Institute Inc. Cary, NC USA. 2861 p.

Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL). 2015. Red hidrográfica. http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/# (5 de mayo de 2015).

Szabó, G., S. K. Singh, and S. Szabó. 2015. Slope angle and aspect as influencing factors on the accuracy of the SRTM and the ASTER GDEM databases. Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C 83-84: 137-145.

United States Geological Survey (USGS).2015. <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>. (20 de abril de 2015).

Valdez L., J. R., M. D. J. Gonzalez G. y H. M. de los Santos-Posadas. 2006. Estimación de cobertura arbórea mediante imágenes satelitales multiespectrales de alta resolución. Agrociencia 40(3):383-394.

van Rossum, G., and F. L. Drake. 2011. The python language reference manual. Ed. Network. Lewiston, NY USA. 150 p.

Velasco H., J. A., J. G. Flores-Garnica, B. Márquez A y S. López. 2013. Áreas de respuesta homogénea para el muestreo de combustibles forestales. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 4(15):41-52.

Zambrano R., A., J. Torres C. y J. Ibarra G. 2011. Delimitación, codificación de las cuencas hidrográficas según los métodos de Pfafstetter y Strahler utilizando Modelos de Elevación Digital y técnicas de Teledetección. *In:* XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR-INPE. 30 de abril a 5 de maio de 2011. Curitiba, Parana, Brasil. pp. 1105-1112.