

# SERVICIOS AMBIENTALES HIDROLÓGICOS EN LA SIERRA DE LA CANDELA DURANGO, MEXICO

## HYDROLOGICAL ENVIRONMENTAL SERVICES IN SIERRA DE LA CANDELA, DURANGO, MEXICO

José Luis González Barrios<sup>1</sup>; Ramón Trucíos Caciano<sup>1</sup>; Aldo Saúl Mojica Guerrero<sup>2</sup>; Luis Manuel Valenzuela Nuñez<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> INIFAP CENID-RASPA. AP 225-3 Parque Industrial Gómez Palacio Dgo. C.P. 35070. México. <sup>2</sup> INIFAP Campo Experimental Delicias. Km 2 Carr. Delicias Rosales Col. Centro: Cd. Delicias Chihuahua C.P. 33000. [gonzalez.barrios@inifap.gob.mx](mailto:gonzalez.barrios@inifap.gob.mx)

**RESUMEN.** El objetivo de la investigación fue mostrar los aspectos biofísicos más relevantes de la Sierra de la Candela y de la cuenca experimental Ciénega de la Vaca, con el objetivo de mostrar los servicios ambientales hidrológicos que se han cuantificado en ellas. Una selección de resultados con diferentes herramientas y métodos (pluviometría con pluviómetros de acumulación, aforos volumétricos de arroyos y manantiales, infiltrometría en el suelo con infiltrómetro de discos tipo TRIMS, análisis fisicoquímicos en laboratorio) muestran que la Sierra de la Candela recibe al año unos 700mm de lluvia promedio equivalentes a 840 millones de metros cúbicos de agua. El agua de escurrimiento superficial y el de los manantiales toma parte activa de los servicios hidrológicos. Dos manantiales afloran un gasto promedio de 30 litros por segundo durante todo el año equivalentes a un volumen de agua cercano al millón de metros cúbicos. La calidad del agua es buena y similar tanto en los manantiales como en el arroyo. Las observaciones de los "caminos" que toma el agua al inicio y durante la época de lluvias, muestran que el estado de la superficie del suelo es determinante en la hidrodinámica de la cuenca. Existe un funcionamiento "bimodal" en la superficie del suelo ya que esta es repelente al agua cuando se encuentra seca y por el contrario se vuelve hidrófila una vez que se ha humectado. El estado biofísico del bosque de pino encino es crucial para el buen funcionamiento de los servicios ambientales hidrológicos que ofrece la Sierra de la Candela y en particular la cuenca Ciénega de la vaca que albergan además un importante número de especies propias del ecosistema forestal. Es necesario por ello implementar medidas urgentes de conservación del suelo y de la vegetación para garantizar la perennidad de esta importante fuente de agua en el Norte árido de México.

**Palabras clave:** Manejo de cuencas, Hidrología, Infiltración y Escurrimiento

**SUMMARY.** This document shows the more relevant biophysical aspects of the Sierra de la Candela and its experimental watershed Cienega de la Vaca in order to expose their environmental hydrological services. A selection of results with different methods and devices (rainfall measurement with cumulus pluviometers, volumetric measurement in streams and springs, infiltration test on soil surface with disc infiltrimeters (TRIMS), physicochemical analysis in laboratory) show that Sierra de la Candela catches about 700mm of an average year meaning about 840 million cubic meters of water. Runoff from stream and springs take an active part in the hydrological services. Two springs give out in average about 30 liter per second all the year meaning almost one million cubic meters of water supply. Water quality is quite good in stream as well as in springs. The water-ways at the beginning and during the rain period show that the soil surface is very important in the watershed hydrodynamics. There is a bimodal functioning of the soil surface with pine-oak humus because it is water-repellent when dry and water permeable when wet. The good health of pine-oak wood is crucial for the good functioning of the environmental hydrological services. Moreover, the Sierra de la Candela houses many forest species. So it is urgent to implement good practices of soil and vegetation conservation in order to assure the durability of this water source in the arid northern Mexico.

**Key words:** Watershed management, Hydrology, Infiltration and runoff

### INTRODUCCION

La Sierra de la Candela forma parte de la cadena montañosa que conforma la Sierra Madre Occidental en el estado de Durango, Mexico. En ella se localizan todavía importantes recursos forestales maderables que

desde mediados del siglo XX se aprovechan con fuerte intensidad lo que ha llevado a disminuir considerablemente sus áreas de bosque denso de pino-encino (Descroix y Nouvelot, 1997; Rodríguez, 1997). Desde la década de 1980 el estado de Durango se ha proclamado principal productor de madera en México

con una cifra anual de 2.3 millones de m<sup>3</sup> de madera en rollo (SAGARPA, SEMARNAT, INEGI, citados por Viramontes *et al.*, 2004), pero que supera a menudo los 5 millones de m<sup>3</sup> (Viramontes *et al.*, 2004). Mucha de esta madera proviene de la Sierra de la Candela y de sus áreas montañosas vecinas.

La importancia del bosque denso de pino-encino es crucial para los servicios ambientales hidrológicos que brinda la Sierra de la Candela ya que recibe una gran cantidad de agua de lluvia que conduce a través del escurrimiento superficial y de la infiltración profunda hacia reservas de agua superficial y subterránea que le dan perennidad a arroyos, manantiales y acuíferos (González *et al.*, 2008).

Desde 1993, la Sierra de la Candela ha sido objeto de numerosos estudios por el equipo de investigación del INIFAP CENID-RASPA y sus socios científicos (IRD, USARS, UJED-ISIMA, UANL) en pequeñas cuencas experimentales instrumentadas (Descroix *et al.*, 2004). Esos estudios permiten determinar la importancia de mantener en buen estado las condiciones biofísicas de la Sierra de la Candela para no perturbar o destruir los servicios ambientales hidrológicos que ella ofrece.

El objetivo de la investigación fue mostrar de manera general los servicios ambientales hidrológicos que se han cuantificado en la Sierra de la Candela y enunciar las principales recomendaciones para conservar el medio biofísico que es importante en la transferencia superficial y subterránea del recurso agua.

## MATERIALES Y METODOS

### Ubicación del área

La Sierra de la Candela está ubicada en el norte del Estado de Durango, México (entre los 25°30.849' y los 25°26.958' de latitud Norte y los 105°35.531' y los 105°34.776' de longitud Oeste) abarcando parte de los municipios de Guanaceví, Santa María del Oro y Tepehuanes (Figura 1); tiene una extensión de aproximadamente 1200 km<sup>2</sup> a una altitud comprendida entre los 2500 y los 3200 metros sobre el nivel medio del mar. Su forma es algo alargada de norte a sur con una geomorfología caracterizada por vertientes accidentadas, con algunos valles y mesetas en el macizo montañoso de Riolita-Ignimbrita que forma a la Sierra Madre Occidental (Tardy, 2004, SEMARNAT, 2007).



**Figura 1.** Localización de la Sierra de la Candela en el Norte del estado de Durango, México (imagen de Google Earth).

La cantidad de lluvia que recibe la Sierra de la Candela en Durango, México, combinada con la altitud, latitud y geomorfología, hacen que su clima sea de tipo sub-húmedo continental de altitud (Descroix *et al.*, 1997) y que las condiciones biofísicas del medio sean propicias para la vida de numerosas especies biológicas que ocupan una diversidad de nichos en el ecosistema forestal.

La vegetación de la Sierra de la Candela es la de un bosque denso de pino-encino desarrollada sobre suelos de tipo Cambisol, Leptosol y Feozem con un espesor variable y una textura generalmente areno-arcillo-limosa (González, *et al.*, 2004; SEMARNAT, 2007).

### Cuenca hidrológica

La red hidrológica de la Sierra de la Candela drena el agua de escurrimiento superficial hacia los principales arroyos y ríos (río Sixtin-el Oro al norte y al este; río Tepehuanes al sur y al oeste; río Ramos al sureste) que alimentan a la gran presa regional Lázaro Cárdenas.

Los estudios en la Sierra de la Candela han tenido como objetivo conocer el funcionamiento hidrológico del ecosistema forestal y valorar el impacto de las principales actividades productivas como el aprovechamiento forestal y la ganadería (González *et al.*, 2007). Para ello, se instrumentaron ocho cuencas experimentales desde 1993; en las que se han medido de manera casi continua los parámetros más sobresalientes del balance hidrológico: Precipitación con pluviómetros de acumulación; Evaporación con tanque evaporímetro tipo A internacional; Escurrimiento con medición de flujo y gasto en secciones de aforo con molinete y con dispositivos tipo parshall, Infiltración con infiltrómetros de disco tipo TRIMS y Erosión con muestreo de aguas de escurrimiento y determinación de los sólidos suspendidos en ellas.

Una de las cuencas experimentales que mas interesa para este trabajo es la "Ciénega de la vaca" por ubicarse en la parte mas alta de la Sierra de la Candela, con una topografía accidentada y altitudes comprendidas entre los 2700 y 3180 metros sobre el nivel medio del mar; esta cuenca experimental de aproximadamente 18 km<sup>2</sup> se desarrolla sobre rocas eruptivas dominadas por Riolita, Ignimbrita y Toba acida.

La vegetación de la cuenca esta dominada por un bosque de pino y encino con elementos de *Pseudotsuga*. En los valles de la cuenca existen pastizales que son aprovechados por el ganado local. Sin embargo la carga animal no parece tomar en cuenta la capacidad real del área forrajera. Para lo cual fueron instaladas áreas de exclusión al ganado, y poder evaluar con ellas la

capacidad natural del suelo para ofrecer biomasa forrajera.

Existe un área de manantiales que se localiza en la parte mas baja de la cuenca, que tiene la particularidad de aflorar agua de excelente calidad durante todo el año y alimentar con ella varias zonas húmedas donde se desarrollan turbas acida ricas en especies vegetales de la familia Ciperaceae.

La instrumentación con equipo de medición hidro-climatológica permanente en esta cuenca abarca los siguientes aparatos: 11 pluviómetros totalizadores, un limnógrafo, un pluviógrafo y una red de 9 piezómetros.

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Cuenca hidrológica

La Sierra de la Candela recibe al año unos 700mm de lluvia promedio (periodo de 1993 a 2008) pero con una fuerte variación interanual y espacial. Esto equivale a unos 840 millones de metros cúbicos de agua captados en su extensión territorial. La mayor parte de este volumen vuelve a la atmósfera en forma de vapor de agua. Una parte importante se infiltra en el suelo donde se almacena temporalmente y sirve como fuente hídrica para el desarrollo de la vegetación; parte del volumen infiltrado percola hasta alcanzar las reservas de agua subterránea someras y profundas; Eventualmente existen resurgencias de esa agua en forma de manantiales intermitentes o perennes como el que se vera a continuación. Otra parte importante del agua de lluvia escurre sobre la superficie del suelo, hacia cauces y arroyos intermitentes que llegan a obras de almacenamiento de agua superficial como bordos, presones y represas. En su camino, el agua superficial entra en contacto con diversos materiales de la superficie del suelo y arrastra las partículas más finas del suelo, así como los elementos que puedan ser llevados a su paso. Esto le confiere al agua una marca geoquímica particular que puede determinarse en el análisis fisicoquímico realizado.

El agua de escurrimiento superficial y el de los manantiales toma parte activa de los servicios hidrológicos que ofrece la Sierra de la Candela y en particular la cuenca Ciénega de la vaca. Dos manantiales en esta ultima afloran un gasto promedio de 30 litros por segundo durante todo el año aunque muestran fluctuaciones que van de los 18 litros por segundo en la época seca a 45 litros por segundo al final de la época de lluvias (Cuadro 1). Este afloramiento representa un volumen de agua cercano al millón de metros cúbicos por año es decir un 0.12 % del agua de lluvia captada en la superficie total de la Sierra de la Candela.

**Cuadro 1.** Gastos de afloramiento hídricos medidos en dos manantiales de la cuenca experimental "Ciénega de la Vaca" durante el periodo 2003-2008.

	Manantial 1	Manantial 2	Total
Gasto al final del periodo seco (lps)	15	3	18
Gasto al final del periodo de lluvias (lps)	30	15	45
Gasto promedio (lps)	22	8	30

**Cuadro 2.** Características fisicoquímicas del agua de escurrimiento en la cuenca experimental "Ciénega de la Vaca" durante el periodo 2003-2008.

Fuente	T°C	pH	CE	Ca	Mg	Na	K	CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>
M1	18	5.5	110	0.97	0.02	0.36	0.07	0.0	1.21	0.15	0.0	0.12
M2	16	5.5	100	0.92	0.02	0.36	0.07	0.0	1.24	0.10	0.0	0.18
ACIV	12.1	5.3	85	0.79	0.02	0.32	0.07	0.0	1.11	0.10	0.0	0.16

M1 = Manantial 1; M2 = Manantial 2; ACIV = Agua del arroyo de la cuenca; T°C = temperatura en ° C; CE= Conductividad eléctrica en uS/cm; iones expresados en miliequivalentes por litro excepto nitratos expresados en miligramos por litro

La calidad del agua es muy similar tanto en los manantiales como en el arroyo, con una acidez mas marcada en el agua del arroyo en tiempo de lluvias (Cuadro 2). Su temperatura es fresca (12 a 18 grados centígrados); sus contenidos en sales son muy bajos (85 a 110 uS/cm) y muestran una facies geoquímica de tipo bicarbonato cálcica. La presencia de bajos contenidos de nitratos en el agua de estas fuentes (0.12 a 0.18 mg por litro) hace pensar en la función depuradora de la vegetación que retiene este nutriente-contaminante del agua para incorporarlo en sus procesos de síntesis biológica, amortiguando con ello el impacto de la ganadería en la calidad del agua, específicamente por la gran cantidad de estiércol que produce el ganado bovino en toda la superficie de la cuenca y que es arrastrado por el agua de escurrimiento e infiltración.

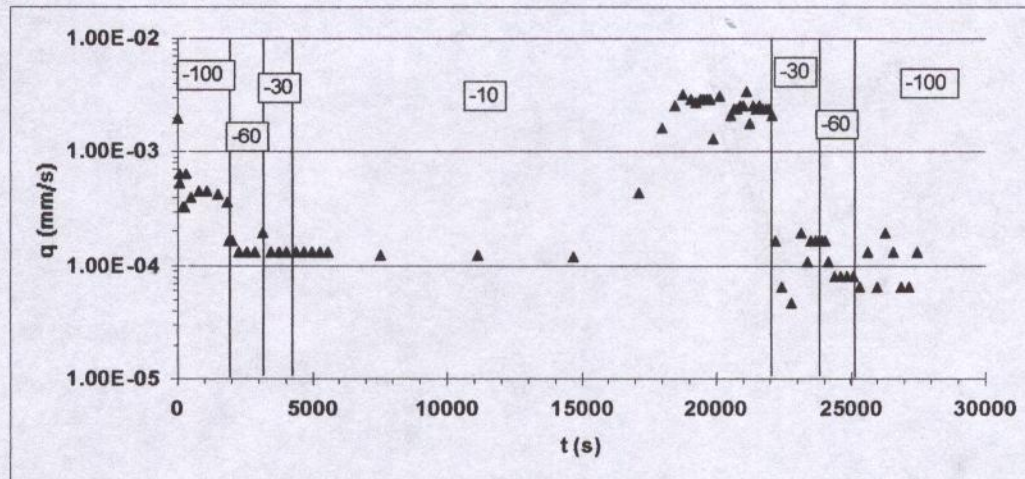
Las numerosas observaciones de los "caminos" que toma el agua al inicio y durante la época de lluvias, muestran que el estado de la superficie del suelo es determinante en la hidrodinámica de la cuenca. Existe un funcionamiento "bimodal" ya que la superficie del suelo forestal es repelente al agua cuando se encuentra seca y por el contrario se vuelve hidrófila una vez que se ha humectado. La presencia de un grueso mantillo de acículas de pino y de hojarasca de encino, rico en materia orgánica de lenta descomposición, induce un mayor efecto "bimodal" de acuerdo a los resultados de infiltrometría, realizados con el método TRIMS, que muestran (Figura 2) que luego de varias horas de imbibición por la lluvia, la superficie del suelo empieza a dejar infiltrar bien el agua. Las pruebas de infiltración

ayudaron también a medir el tiempo de imbibición tomado para varios casos de suelo con mantillo y a estimar las repercusiones en el gasto hidrológico de la cuenca cuando por erosión se pierde la capa de mantillo de la superficie forestal.

#### Uso de suelo

Un impacto negativo de las actividades productivas forestales y ganaderas consiste justamente en la perturbación y degradación de la superficie del suelo sobretodo bajo las cubiertas forestales abrigadas por una capa de mantillo. Este impacto es real y de amplia extensión en las superficies de suelo aprovechadas para extraer la madera de pino y dedicadas luego a la formación de agostaderos o de superficies cultivadas en pleno bosque. La superficie del suelo al ser perturbada es rápidamente expuesta a los efectos de la erosión hídrica con pérdida de sus partículas mas finas ricas en minerales así como de las reservas de nutrientes de origen orgánico que forman el mantillo. Todo esto induce una aridificación paulatina de la cuenca.

Así pues, los cambios de uso de suelo en medio forestal deben proscribirse en favor de un mantenimiento de los recursos forestales con actividades de reforestación obligatoria en las áreas donde se extrae la madera de importancia comercial. Mas aún, los métodos de extracción de madera deben impedir el arrastre de troncos que prácticamente destruyen la superficie del suelo como si se usara un arado que destruye también a su paso las plántulas de árboles que renuevan naturalmente el ecosistema forestal.



Succión en mm	-100	-60	-30	-10	-30	-60	-100
Infiltración final mm/s	4.77 E-4	1.39 E-4	1.31 E-4	2.53 E-3	1.59 E-4	8.72 E-5	9.82 E-5

**Figura 2.** Prueba de infiltrometría TRIMS en superficie forestal con mantillo de pino-encino. El efecto repelente se observa del tiempo (t) 2000 al t = 15000, luego un efecto hidrofílico del t = 17000 al t = 22000.

Las consecuencias hidrológicas de esos impactos negativos repercuten directamente en la capacidad de infiltración y almacenamiento temporal del agua en el suelo. Esto hace que disminuyan los gastos de base en los arroyos y que se recarguen menos los acuíferos someros y profundos.

El estado biofísico del bosque de pino encino es crucial para el buen funcionamiento de los servicios ambientales hidrológicos que ofrece la Sierra de la Candela y en particular la cuenca Ciénega de la vaca que alberga además un importante número de especies propias del ecosistema forestal. Es necesario por ello implementar medidas urgentes de conservación del suelo y de la vegetación para garantizar la perennidad de esta importante fuente de agua en el Norte árido de México.

Es necesario un mayor apoyo a estas áreas naturales y productivas que requieren recursos financieros y recursos humanos de sus usuarios para llevar a cabo los trabajos de conservación del suelo y del bosque, bajo un estricto control y supervisión técnicos.

Actualmente, el programa de protección de servicios ambientales de CONAFOR-PROFEPA y Gobierno del Estado de Durango, lleva acabo trabajos de conservación del suelo en áreas vecinas a la Sierra de la candela (en los municipios de Guanaceví y Tepehuanes, Durango que sería recomendable ampliar hacia esta Sierra antes

de que sus importantes servicios ambientales: hidrológicos, de diversidad biológica, de captura de carbono y de belleza escénica, se vean afectados por la presión de las actividades productivas.

## CONCLUSIONES

La Sierra de la Candela y la cuenca experimental Ciénega de la vaca representan un reto ambiental-productivo muy importante en la cuenca alta del río Nazas.

El aprovechamiento sostenible de los recursos forestales y forrajeros del área ofrece una oportunidad para generar productos forestales y pecuarios necesarios para el sustento de sus habitantes.

El mantenimiento de las cuencas en buen estado biofísico implica la durabilidad de los servicios ambientales hidrológicos y la sobrevivencia de especies biológicas que habitan en la Sierra de la Candela.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las instituciones que participaron en el financiamiento de los trabajos de investigación en la Sierra de la Candela, en particular al CONACYT, al IRD y a la red de agua y suelo del INIFAP.

## LITERATURA CITADA

- Descroix ; L., Nouvelot, F. y Estrada, J. 1997. Geografía de las lluvias en una cuenca del Norte de México: Regionalización de las precipitaciones en la región hidrológica 36. ORSTOM. INIFAP CENID – RASPA Gómez Palacio Dgo., México. Folleto Científico No. 8:52 p.
- Descroix, L. y Nouvelot, F. 1997. Esguerrimiento y erosión en la Sierra Madre Occidental. INIFAP-ORSTOM. Ediciones INIFAP CENID –RASPA Gómez Palacio Dgo. México. Folleto Científico No. 7:50 p.
- Descroix L.; González Barrios, J. L. y Estrada, J. 2004. La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada. INIFAP-IRD Gómez Palacio, Dgo. México. 300 p.
- González Barrios, J.L.; Descroix, L.; Viramontes, D.; Poulenard, J.; Plenecassagne, A.; Macias, L.; Boyer, C.; Bollyer, A. y Jasso, R. 2004. Condiciones que favorecen la erosión y el esguerrimiento en manto. *In*: Descroix; L., J.L. González Barrios, J. Estrada (ed). 2004. La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada. INIFAP-IRD Gómez Palacio, Dgo. México. 161-178 p
- González Barrios, J.L.; Descroix, L.; Jasso, R.; Estrada, J.; González Cervantes, G.; Sánchez Cohen, I.; Vandervaere, J.P.; Domergue, C. y Solís, R. 2008. Hidrología experimental como fuente de información para el manejo integral del agua en cuencas hidrológicas. *In*: Sánchez I. G. Chebhouni (comp.). Procesos hidrológicos en zonas áridas y semiáridas. De la investigación a la acción. INIFAP-IRD. Gomez palacio Dgo. México. 64-85 p
- González Barrios, J.L.; Vandervaere, J.P.; Sánchez Cohen, I.; González Cervantes, G. y Descroix, L. 2008. Infiltration assessment for better watershed management in Northern Mexico. *In*: Transactions of the 13<sup>th</sup> IWRA World Water Congress. Montpellier, France. 2008:1-6 p
- Rodríguez, M.G.1997. Determinación de la cobertura vegetal en la Sierra Madre Occidental para su calibración por percepción remota. Tesis UJED, Escuela de ciencias Forestales. Durango, Dgo., México. 60 p.
- SEMARNAT. 2007. Ordenamiento ecológico del Estado de Durango. Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente del Estado de Durango. Durango, Dgo. México. 194 pp + 3 cartas
- Tardy, M. 2004. Elementos de Geología de la Sierra Madre Occidental: constitución y origen. *In*: Descroix, L., J.L. González Barrios, J. Estrada (ed). 2004. La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada. INIFAP-IRD. Gómez Palacio, Dgo., México. 19-24 p
- Viramontes, D.; Anaya, E.; García, C.; Poulenard, J.; Barral, H.; Macias, L. y Rodríguez Camarillo, M.G. 2004. Demasiado ganado y demasiados leñadores: una economía minera. *In*: Descroix, L., J.L. González Barrios, J. Estrada (ed). 2004. La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada. INIFAP-IRD Gómez Palacio, Dgo. México.183-193 p