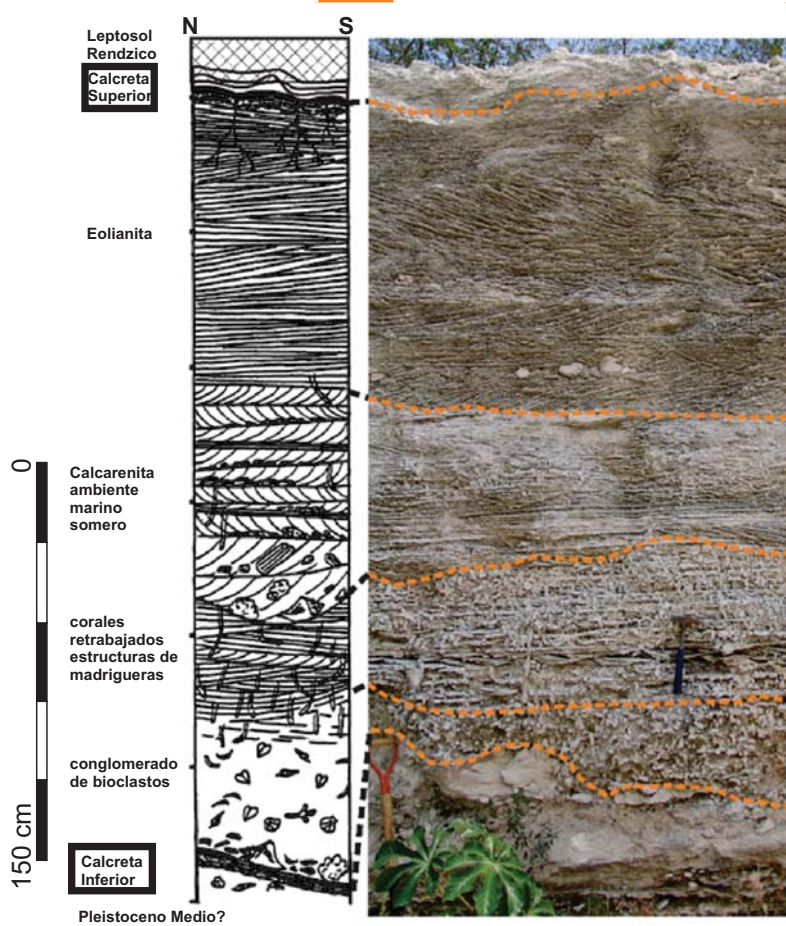




GEOS

<http://www.ugm.org.mx/geos.html>

BOLETÍN INFORMATIVO DE LA UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C.

GEOS se publica dos veces al año patrocinada por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y editada conjuntamente por la UGM y el CICESE.

UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C. Mesa Directiva 2016-2017

Dra. Xyoli Pérez Campos
Instituto de Geofísica, UNAM
Presidenta

Dra. Ligia Pérez Cruz
Instituto de Geofísica, UNAM
Vicepresidenta

Dra. Vanesa Magar Brunner
División de Oceanología, CICESE
Secretaria General

Dr. Edgardo Cañón Tapia
División de Ciencias de la Tierra, CICESE
Secretario de Investigación

Dra. Dora Celia Carreón Freyre
Centro de Geociencias, UNAM
Secretaria de Difusión

Dra. Marina Manca
Centro de Geociencias, UNAM
Secretaria de Educación

Dr. Juan Américo González Esparza
Instituto de Geofísica, UNAM
Secretario de Vinculación

Dr. Víctor Manuel Wong Ortega
Unión Geofísica Mexicana
Tesorero

Editores Principales

Luis A. Delgado Argote
ldelgado@cicese.mx
CICESE

Dora C. Carreón Freyre
freyre@geociencias.unam.mx
UNAM

Comité Editorial

Harald Böhnelt, UNAM
Noel Carbajal Pérez, IPICYT
Oscar Campos, UNAM
Gerardo Carrasco, UNAM
Ana Luisa Carreño, UNAM
Carlos Flores Luna, CICESE
Juan García Abdeslem, CICESE
René Garduño, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
Gustavo Tolson, UNAM
Felipe Escalona, Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, UAZ

Apoyo Técnico Editorial

Humberto S. Benítez Pérez
Angel Daniel Peralta Castro
María Cristina Álvarez Astorga

GEOS, boletín informativo de la Unión Geofísica Mexicana (UGM), se edita conjuntamente por la UGM y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) bajo el patrocinio del CICESE. Se publica dos veces al año, contiene artículos originales de investigación, artículos de divulgación, notas cortas, aspectos relevantes para la difusión de la actividad científica, tecnológica y docente en las Ciencias de la Tierra, así como noticias de interés para los miembros de la UGM. Las instrucciones para los autores se encuentran al final de cada número y en <http://www.ugm.org.mx/geos.html>. GEOS (ISSN 0186-1891) se edita en la División de Ciencias de la Tierra, CICESE, Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas 22860, Ensenada B.C., México.

Dirigir toda correspondencia a:
Editorial GEOS
División de Ciencias de la Tierra, CICESE
ldelgado@cicese.mx
Tel. en Ensenada B.C.: (646)175-0500, Ext. 26060

Título: GEOS

Periodicidad: semestral

ISSN: 0186-1891

Editado en la División de Ciencias de la Tierra, CICESE, Carret. Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas 22860, Ensenada B.C., México.

EDITORIAL

El ambiente académico en tiempos difíciles	...263
---	--------

**SECCIÓN ESPECIAL: CONTRIBUCIONES AL ANÁLISIS DE SUELOS
EN EL SUR DE MÉXICO**

Distribución de Suelos en ambientes tectokársticos en la porción este de la Península de Yucatán, México.	...265
Fragoso Servón Patricia, Francisco Bautista, Alberto Pereira y Oscar Frausto	

Suelos, agua, inundaciones y cambio climático en zonas de karst: el caso de Quintana Roo, México.	...275
Pereira Corona Alberto, Patricia Fragoso Servón, Oscar Frausto Martínez	

Carbonatos secundarios en las calcretas del noroeste de la península de Yucatán: formas, procesos e implicaciones en la pedogénesis de geosistemas cársticos.	...291
Cabadas Báez Héctor Víctor, Jorge Federico Landa Arreguín, Sergey Sedov, Elizabeth Solleiro Rebolledo	

Los costos ambientales de la pérdida de suelo en la reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Guanajuato.	...309
Bautista Francisco, Alma Barajas, José Luis Cortés, Luis D. Olivares, Ángeles Gallegos, Azucena Pérez	

DIVULGACIÓN

Monitoreo sísmico en tiempo real para la alerta temprana, el caso de SeiscomP.	...317
Jhon Leandro Pérez	

REPORTE

La Olimpiada XXI de Ciencias de la Tierra: Energía	...329
Frez José y Daniel Peralta	

COMUNICACIONES

POLÍTICA EDITORIAL	...347
---------------------------	--------

El ambiente académico en tiempos difíciles

La actuación de las *clases dirigentes* de nuestro país ante condiciones adversas es tan desconcertante que crea un ambiente de franca preocupación. No es éste un comentario nacido de la lectura de las notas de primera plana acerca de la suerte de periodistas, o de la captura de capos-funcionarios que mientras estaban en el ejercicio de sus puestos cometían fechorías y caminaban tan orondos por la calle. El tema aquí es la falta de imaginación y/o la ofensiva simpleza con que se reacciona a las predecibles amenazas económicas del presente año. No es fácil encontrar un calificativo preciso para tal simpleza y falta de imaginación. Desde septiembre del año pasado se anunciaba que se canalizarían 12.1 por ciento más recursos al pago de deuda, mientras que el gasto de inversión del gobierno, que debe leerse como crecimiento, sería 26.8 por ciento menor al aprobado para 2016. En su momento, ese anuncio significaba una reducción de 10.6 por ciento para Educación Pública (que aparentemente no incluye los bebederos para las escuelas), 10.8 en el ramo de salud, 30.7 en cultura, 29 en agricultura, 28 en comunicaciones y transportes y, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, 23.3 por ciento menos que en el año anterior. Debería sobrar decir (pero no sobra) que al mismo tiempo se programaron incrementos para el Poder Legislativo, la Auditoría Superior, la Suprema Corte y otras dependencias imprescindibles, mismas que cualquiera pensaría que son capaces de detonar el crecimiento económico, social y cultural del país.

Entre los países que forman la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), el nuestro se encuentra en el último lugar en lo que se refiere a fondos destinados a la ciencia y tecnología. La proporción del PIB no ha pasado del 0.4 por ciento. De hecho, nuestro mejor año fue 2015, cuando disfrutamos de un 0.34 por ciento. Si el país está ante un escenario económico muy complejo, la reacción natural debería movernos hacia la suficiencia alimentaria y energética, hacia verdaderos cambios en el sistema educativo, hacia mejores programas de salud pública que, por ejemplo, contengan la dañina obesidad asociada con los alimentos chatarra. No es redundante afirmar que el costo del atraso y la ignorancia es mucho mayor que el monto de la inversión en investigación científica y en educación en general. Muchas páginas se han escrito en las que se describen las bondades de invertir en el conocimiento. Muchos ejemplos de países exitosos se han presentado en los que se resalta la aplicación de modelos diseñados en cada uno de ellos de acuerdo con su historia y su idiosincrasia. Nuestro país alguna vez lo hizo y tuvo ritmos de crecimiento notables que motivaron el orgullo nacional.

Las cosas han cambiado rápida y dramáticamente. En 2017, al desgaste económico y anímico, se suman los incrementos a los precios de las gasolinas, transporte carretero, gas LP y tarifas eléctricas industriales y domésticas de alto consumo. En su conjunto, esto se traduce en una inflación del orden del 6 por ciento. Lo anterior ha creado un

ambiente de enojo en el país entero. Cada sector, cada gremio, cada grupo, tiene una mala historia que contar, historia que supera con creces a la propaganda oficial de "lo bueno casi no se cuenta pero cuenta mucho". El ambiente académico, formado por los investigadores y los estudiantes de posgrado, constituye uno de esos grupos decepcionados, entre otras cosas, porque sus ingresos vía SNI (para los primeros) y en becas para los pertenecientes a los programas de posgrado registrados en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC), se han visto drásticamente afectados. Dichos ingresos se calculaban en "veces el salario mínimo" pero, al aumentar éste en 9.6 por ciento, se optó por "desindexarlo" y usar la unidad de medida y actualización (UMA) que por ahora es 5.7 por ciento menor. Otro desafortunado ajuste ocurrió en marzo, cuando oficialmente se afirmaba públicamente que "México está transitando a ser una sociedad del conocimiento, en la que el diseño de las políticas públicas y programas gubernamentales se inspiren en la evidencia científica". Entonces, el CONACYT resolvió suspender becas a distintos posgrados, pues sólo ha podido mantener el compromiso de que entregará el mismo número de apoyos que el año pasado. La directora adjunta de Posgrado y Becas del organismo dijo que "se deberá someter a concurso exactamente el mismo número de becas que el año anterior en todas las instituciones y programas; aplicar una estrategia de reasignación de becas, ya sea entre programas o instituciones, y aplicar medidas de eficiencia presupuestal en el pago de las mismas".

Ante esta situación una pregunta obligada es hasta dónde es conveniente seguir haciendo promoción a nuestros posgrados si no se puede garantizar el pago de becas, aunque también cabría plantear la conveniencia de seguir apoyando con fondos del erario a los programas de posgrado de las instituciones privadas o peor, a la solución de proyectos que la iniciativa privada puede y debe financiar. El crecimiento de la población requiere de un crecimiento paralelo en las facilidades para atender las demandas de estudiantes en todos los niveles. Esa analogía desafortunada entre los recursos naturales y la fábula de la gallina de los huevos de oro, es molesta por lo falsa e irresponsable y en su lugar, deben presentarse argumentos sólidos, basados en la experiencia y en principios académicos para darle una dirección correcta a la política educativa y científica del país.

Pero, como también hay que "contar lo bueno", en este número aparecen cuatro Contribuciones al Análisis de Suelos en el Sur de México derivadas de la sesión sobre Ciencias del Suelo organizado por Patricia Fragoso Servón y Yameli Aguilar Duarte, durante la Reunión Anual 2015 de la Unión Geofísica Mexicana. El trabajo de Patricia Fragoso como coeditora de esos estudios sobre suelos hizo posible que las conferencias de la reunión pasaran al formato de artículos arbitrados. Esperamos que esa experiencia sea repetida por colegas de otras disciplinas.

Distribución de Suelos en ambientes tectokársticos en la porción este de la Península de Yucatán, México.

Fragoso-Servón Patricia¹, Francisco Bautista², Alberto Pereira¹, Oscar Frausto¹

¹Universidad de Quintana Roo

pfragoso@uqroo.edu.mx,

²Centro de Investigación en Geografía Ambiental.

Universidad Nacional Autónoma de México. Morelia, Michoacán

Resumen

La Península de Yucatán se caracteriza por ser una zona kárstica y por la presencia de gran cantidad de fracturas y fallas. Para analizar la distribución de los suelos de la porción este de la península se utilizó el enfoque geomorfoedafológico por dos vías: por un lado, el análisis morfométrico y por otro, la evaluación de la información edafológica, considerando los datos del sitio de muestreo, la descripción de perfiles y los resultados analíticos.

Los ambientes donde se combinan altas densidades de procesos de disolución y fracturamiento se encuentran en tres áreas: a) en las planicies subhorizontales al norte de Quintana Roo, sobre unidades litológicas recientes, donde la vegetación dominante es de selva mediana subperennifolia, predominan los Leptosoles solos o combinados con Luvisoles e incluso Vertisoles en los que hay gran cantidad de depresiones kársticas; b) en planicies acolinadas del centro-oeste del Estado, en formaciones del Eoceno, donde los suelos dominantes son Phaeozems/Luvisol/Cambisol y Leptosol/Luvisol, que son utilizados para pastizales y cultivos; finalmente c) en las unidades litológicas más antiguas, sobre lomeríos y montañas al suroeste, los suelos dominantes son Leptosoles/ Phaeozems/ Vertisoles en los que se desarrolla una selva mediana subperennifolia.

Al norte de Quintana Roo, los suelos delgados y pedregosos, aunados a la densa karsticidad y las fallas, conforman una zona muy susceptible a colapsos y procesos erosivos, lo que restringe el uso potencial del suelo. Actualmente el turismo de cenotes, cavernas y el senderismo son intensos en esta zona, además, hay agricultura sobre Cambisoles y Luvisoles. Al suroeste del Estado, en lomeríos, se presentan los suelos más profundos (Phaeozems y Vertisoles) en las zonas bajas del relieve, donde el uso de suelos se ve restringido por el relieve. En el centro-oeste del Estado, en planicies acolinadas hay suelos potencialmente más productivos y sin la limitante del relieve relativamente pronunciado, por lo que son susceptibles a mayor diversidad de usos.

Palabras clave: Karst, Fallas, Suelos, Ambientes

Introducción

En México el desarrollo de karst ocupa el 20% del territorio nacional. La Península de Yucatán, en el sureste del país, es la zona kárstica más extensa. A pesar de su importancia, por su relación con las aguas subterráneas, el impacto de la construcción de viviendas y vías de comunicación, así como del desarrollo turístico, no han sido suficientemente estudiados (Gutiérrez, 2008).

Son pocos los estudios sobre karst en la península. Entre ellos sobresalen los trabajos de Gaona et al. (1980), Lugo et al. (1992), Héraud-Piña (1996), Bautista et al. (2011), Bauer et al. (2011). En el estado de Yucatán destacan los realizados por Bautista et al. (2004), Aguilar (2014); en Campeche el de Palacio et al. (2005); en Quintana Roo, los trabajos de García et al. (2000), Frausto e Ihl (2008), Fragoso (2014) y estudios espeleológicos en cuevas y cenotes como los de Coke (2004), Mecham (2005, en QRSS, 2012) y Ordoñez y García (2010).

El relieve kárstico se forma por la disolución de rocas calcáreas formadas por calcita, y dolomita y evaporitas como el yeso. Se caracteriza por la formación de depresiones cerradas (de tamaños que van desde formas milimétricas como los lapices, hasta grandes extensiones como los poljes) por la rápida infiltración del agua, la casi nula presencia de corrientes superficiales, un sistema subterráneo de agua y la abundancia de cuevas y cavernas (de Waelle, et al, 2011).

De acuerdo a los trabajos sobre karst en la península de Bocco et al (1996), Bautista et al. (2004), Frausto e Ihl (2005), Aguilar et al. (2010) y Fragoso et al. (2014) las depresiones exokársticas mayores (dolinas, uvalas y poljes) son las que se han desarrollado principalmente en la región y ocupan una gran área.

La Península de Yucatán no ha dejado de emerger. La actividad neotectónica ha provocado levantamiento de bloques, algunos de ellos basculados (Morales, 2009), lo que ha originado un sistema de fracturas orientadas al

norte y noroeste. Las fracturas y las fallas son las estructuras que controlan la posición de las formas kársticas, debido a que en ellas se promueve la disolución más intensa (Lugo et al., 1992; Bautista et al., 2004).

La distribución de fallas y fracturas y formas kársticas no es homogénea. Por el contrario, a pesar de encontrarse distribuidas en gran parte de la península, tienden a concentrarse más en algunos sitios (Fragoso et al., 2014). Los sitios que tienen procesos avanzados de disolución kárstica y donde se concentra más la presencia de fallas y fracturas pueden ser denominadas sitios tectokársticos.

son escasos los estudios sobre los suelos que se desarrollan sobre relieves kársticos a escalas mayores a 1:250,000. El desarrollo de nuevos métodos de análisis y de nuevos enfoques en la generación y manejo de datos, así como el uso de criterios morfológicos, permiten hoy en día elaborar una cartografía especializada y actualizada, como en los trabajos de Bautista et al. (2004), Aguilar et al. (2010) en la parte norte de la península y en la porción este, como en los trabajos de Fragoso (2015) y Reyes (2016).

El objetivo de este trabajo fue analizar la distribución espacial de los suelos de la porción este de la península, considerando los factores formadores y elaborar el mapa de los suelos en un ambiente que combina condiciones de alta densidad kárstica y densidad alta y media de fallas y fracturas, a escala 1: 50,000, utilizando la nomenclatura de la base referencial mundial del recurso suelo (WRB) 2007.

Zona de estudio

La porción este de la Península de Yucatán está ocupada por el estado de Quintana Roo, el que se encuentra entre los paralelos 17°49' y 21°36' norte y los meridianos 86°44' y 89°24' oeste, en una superficie de 50 843 km² y 865 km de litorales hacia el este con el Mar Caribe.

El clima dominante es cálido subhúmedo (Aw), distribuyéndose cerca de la costa el más húmedo (Aw_2) y gradualmente hacia el oeste el más seco (Aw_0).

La península es una estructura sedimentaria formada durante el Mesozoico, sobre la cual se depositaron arenas y estructuras de origen orgánico marino a lo largo del terciario (Ordoñez y García, 2010). Está formada por rocas carbonatadas, evaporíticas y clásticas como la caliza, la dolomita, el yeso y la arenisca (López-Ramos, 1975). Las formaciones más antiguas (Cretácico y Paleoceno) se ubican en el sur y las más recientes (Plioceno y Cuaternario) en el norte y este del territorio.

En el norte y el este de la península predominan las planicies (Figura 1), y hacia el oeste se van presentando planicies y mesetas kársticas, ondulaciones y lomeríos bajos con hondonadas, con una altura media de 50 msnm (Lugo-Hubp et al., 1992; Cervantes et al., 1990).

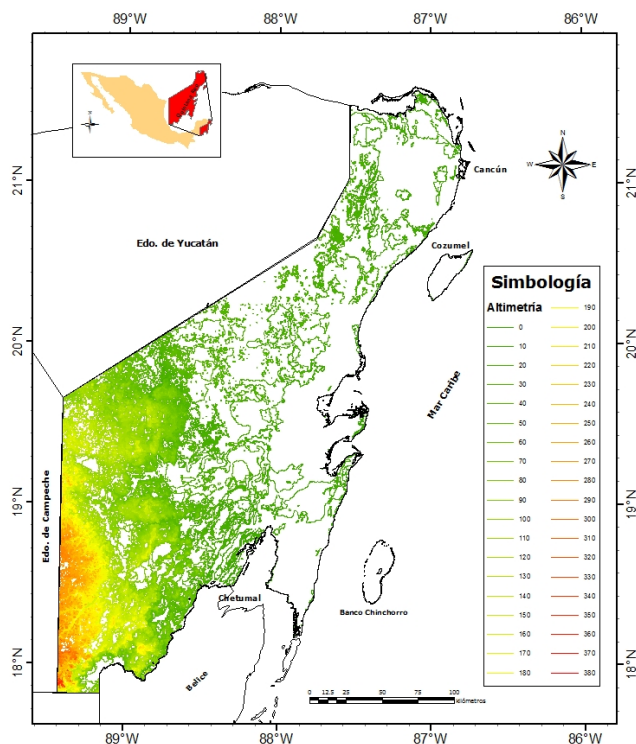


Figura 1. Curvas de nivel de Quintana Roo. La base de datos es del INEGI (2005)

La vegetación está constituida por asociaciones vegetales características de clima cálido. En la parte norte, el área más seca presenta vegetación de selva baja caducifolia, hacia el sur, con un aumento en la precipitación y presencia de suelos más profundos, la vegetación cambia a selva mediana subperennifolia y perennifolia en donde se encuentran especies de importancia maderable; en el extremo sur la vegetación es de mayor altura, llegando a encontrarse zonas con selva alta subperennifolia. Son también notables las zonas de sabana en lugares con inundación temporal y la vegetación de duna costera.

Metodología

Para la caracterización de los ambientes en la parte este de la Península de Yucatán se utilizó el enfoque geomorfoedafológico desarrollado por Zinck (1989; 2012) en el cual se parte de la premisa de que las geoformas y los suelos comparten los mismos factores formadores. Los aspectos morfológicos y edáficos tienen una gran importancia en la delimitación de unidades y en la regionalización natural del terreno, permitiendo una adecuada representación espacial de la distribución de suelos. Al utilizar este enfoque se pudieron definir con precisión los ambientes morfogenéticos (Zinck, 2012).

De acuerdo a este enfoque se trabajó en dos vías: el análisis morfométrico y la evaluación de la información edafológica.

Para el análisis morfométrico se analizaron 80 cartas topográficas vectoriales en formato shape de ESRI a escala 1:50,000 del INEGI, se consultaron imágenes de satélite Landsat 7 ETM de 2010 para la definición de geoformas y la distribución de las depresiones kársticas, fracturas y fallas.

Las depresiones kársticas fueron clasificadas por su tamaño, utilizando el índice de compacidad de Gravelius; para la densidad un algoritmo de convolución utilizando un núcleo ortogonal y para la clasificación en categorías se usó el algoritmo de Jenks (Fragoso et al., 2014).

Definidas las zonas de alta densidad kárstica y densidades media y alta de lineamientos estructurales (fallas o fracturas) que aquí llamaremos fallas, se realizaron más de 100 muestreos, con descripción de perfiles, análisis fisicoquímicos y verificaciones de campo.

Se analizó la información geomorfológica y edáfica de manera conjunta para elaborar el mapa de distribución de suelos, a través de un análisis de agrupamiento utilizando el coeficiente de Gamma de Goodman-Kruskal y un análisis de clasificación en el programa Weka 3.

Resultados

Los ambientes tectokársticos son morfométricamente complejos, presentan zonas con una densidad media y alta de fallas y una densidad alta de depresiones kársticas.

La distribución de fallas en la porción este de la península no es homogénea. Por el contrario, a pesar de que se encuentran repartidas en la mayor parte del área de estudio, tienden a concentrarse más en las zonas norte y centro y ser más dispersas en el sur (Figura 2). Como cabría esperar, las zonas con densidad media abarcan áreas bien definidas y distribuidas alrededor de las zonas de alta densidad y en la parte medio-oeste del estado, principalmente.

Las dolinas, uvalas y poljes son las formas kársticas dominantes en el área de estudio. Las formas más frecuentes son las uvalas (58.8%), es decir aquellas depresiones con menos de 1 km² y formas alargadas, seguida por las dolinas (de forma circular) y en menor proporción (5.9%) los poljes (presentan áreas de más de 1 km²). Las zonas con mayor densidad kárstica (Figura 3) se encuentran distribuidas de forma heterogénea, principalmente del centro del Estado y hacia el norte, en las zonas cercanas a la costa y en el extremo sur.

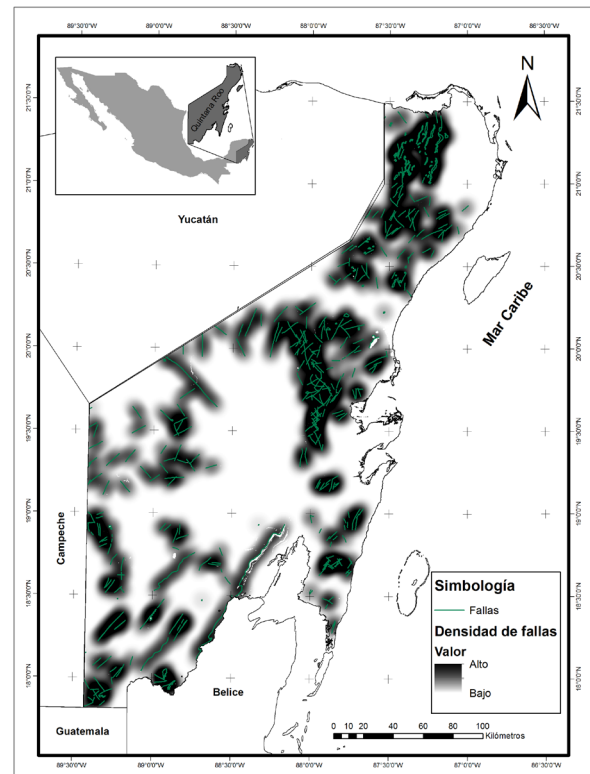


Figura 2. Densidad de fallas y fracturas a partir de la base de datos del INEGI (2005).

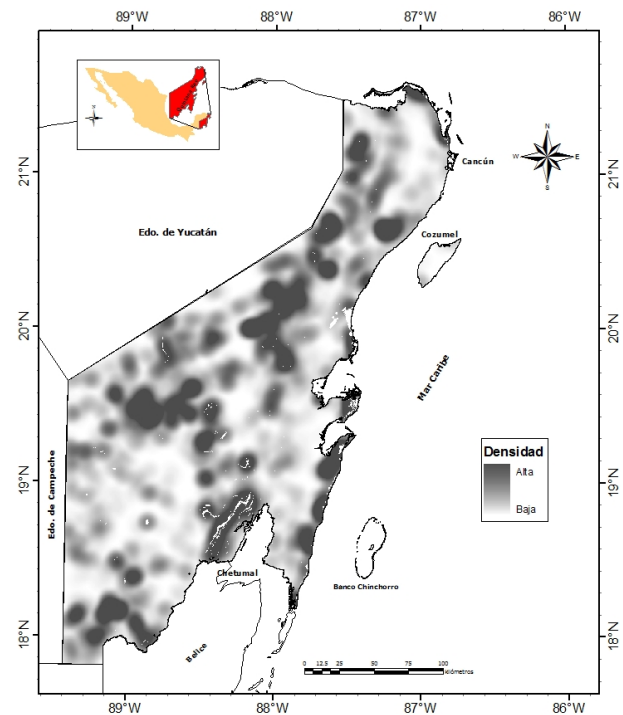


Figura 3. Densidad de depresiones kársticas según Fragoso et al. (2014)

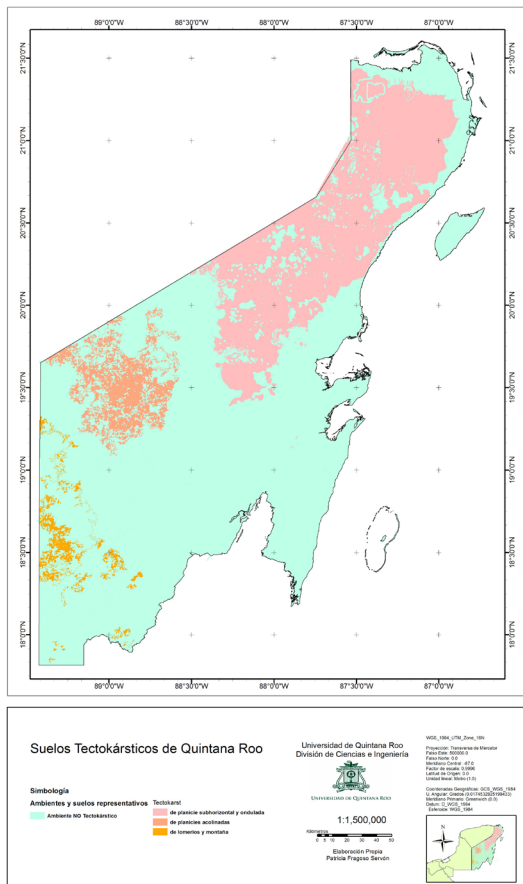


Figura 4. Zonas con alta densidad kárstica y alta a media densidad de fallas

Las zonas con alta densidad kárstica y alta y media densidad de fallas se encuentran en tres áreas (Figura 4).

Los análisis de interpolación utilizados para la construcción de los mapas de densidad tomaron como base un algoritmo de convolución simple (Krigin), dado que los puntos de cada uno de los cuerpos de agua y depresiones kársticas fueron considerados en función de su extensión, lo que hizo posible considerar los diferentes grados de desarrollo del proceso de disolución.

Para el caso de la construcción de las poligonales usadas para la asignación de atributos, la técnica propuesta por Priego et al. (2010) fue ajustada para usar datos a escala 1:50,000, resultando una zonificación morfométrica más precisa, que fue verificada en campo antes de ser usada como marco para la asignación de los demás atributos.

En las planicies subhorizontales al norte de Quintana Roo, sobre formaciones geológicas recientes (Plioceno y Cuaternario), con una vegetación dominante de selva mediana subperennifolia, los suelos que ocupan una mayor área son los Leptosols, solos o combinados con Luvisols e incluso Vertisols. En el extremo noroeste, donde hay gran cantidad de depresiones kársticas (Figura 5), se encuentra una zona dominada por suelos rojos debida a la presencia de óxidos de hierro, Luvisols asociados con Cambisols y suelos color café oscuro, como

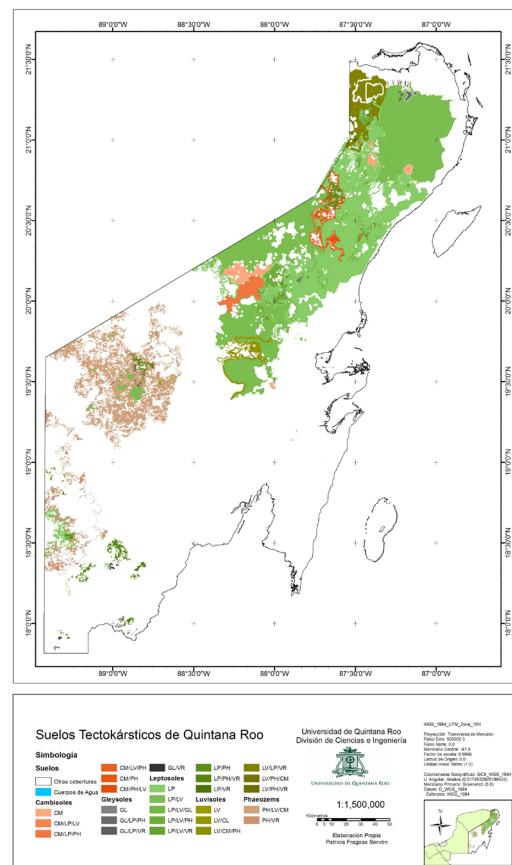


Figura 5. Suelos presentes en el ambiente tectokárstico de Quintana Roo.

los Phaeozems y Vertisols. Hacia el sur, donde se encuentran zonas de transición, la roca calcárea es más resistente al intemperismo y se encuentran los Cambisols como suelo primario, que también están asociados con Luvisols y Phaeozems, sobre los que se practican actividades agrícolas.

En planicies acolinadas del centro-oeste del Estado, en formaciones del Eoceno, se presentan suelos con mayor profundidad. En esta zona los suelos dominantes son Phaeozems/Luvisols/Cambisols y Leptosols/Luvisols que son utilizados para pastizales y cultivos. En algunas zonas se presentan suelos que se inundan o tienen mal drenaje como los Gleysols.

La tercera zona se encuentra en las formaciones más antiguas, sobre lomeríos y montañas bajas (de acuerdo con su disección vertical) al suroeste del Estado. Allí los suelos dominantes son Leptosols, Phaeozems y Vertisols donde se desarrolla selva mediana subperennifolia. Los Leptosols dominan en las zonas con mayor pendiente y, en zonas con menor inclinación, se desarrollan los Phaeozems, mientras que en las zonas bajas se acumulan materiales que han favorecido el desarrollo de suelos más profundos como los Vertisols.

Discusión y Conclusiones

Los procesos kársticos y la presencia de fallas junto con el relieve son factores que explican la variabilidad ambiental y la presencia de ciertos grupos de suelos en la porción este de la Península de Yucatán. De acuerdo con Lugo et al. (1992) la ruptura de las rocas forma fisuras, fracturas, fallas y diaclasas que facilitan que la disolución de las rocas calcáreas sea más intensa. Por su parte, Bautista et al. (2004) señalan que la abundancia de precipitaciones y la bien conservada vegetación de esta parte de la península, favorecen la disolución de la roca y con ello la acumulación de materiales que ayudan al desarrollo de horizontes petrocálcicos en la parte baja del perfil, dando inicio al desarrollo de Leptosols.

Dependiendo del tipo de roca y su pureza, su disolución puede originar otros suelos como los Cambisols. En ellos la disolución de la roca es más intensa, el perfil muestra una gran cantidad de fragmentos de roca mezclada con tierra fina de color café a rojo y, en perfiles de suelos más desarrollados, los fragmentos de roca se encuentran a una mayor profundidad respecto al nivel de superficie predominando las coloraciones rojizas en la parte superior. En estados más avanzados de desarrollo se acumula arcilla en los horizontes Bt dando origen a los Luvisols. Esta es la secuencia de procesos que dominan en la parte norte del área de estudio.

Sobre las planicies, los Leptosols son los suelos dominantes en las zonas con una alta karsticidad y alta densidad de fallas, formando una zona muy susceptible a procesos erosivos verticales y colapsos de dolinas. Bautista et al. (2011, 2015) y Aguilar (2014) reportaron la presencia de los mismos suelos para la porción norte del estado de Yucatán, donde se registran condiciones semejantes. En el estado de Campeche, Palacio et al. (2005) caracterizaron ambientes kársticos considerando el relieve (pero no las fallas), reportando los mismos suelos en las zonas de planicie.

Hacia el sur y al oeste de Quintana Roo, el relieve pasa de planicies subhorizontales a planicies onduladas, acolinadas y lomeríos, donde la disolución de la roca es más intensa, originando otros tipos de suelos.

En la parte centro-oeste, en planicies onduladas y acolinadas, dominan los Phaeozems y, como suelos secundarios, Cambisol, Luvisol y Vertisol que, con el efecto de un relieve suave de mediana energía, son los suelos con mayor desarrollo en esta parte del Estado.

En este estudio se encontró que hacia el sur, en la zona de lomeríos se dan las condiciones para el desarrollo de Leptosols, Phaeozems y suelos más profundos como los Luvisols, Vertisols e incluso Gleysols en las zonas bajas del relieve. En

esta zona el uso de suelos se ve restringido por el relieve.

La porción este de la península se caracteriza por la karstificación y por una gran cantidad de fracturas y fallas que incrementan la rugosidad del terreno a escalas grandes, lo que favorece la acumulación de materiales, tanto de origen orgánico como inorgánico, que permiten el desarrollo de diversos suelos.

El uso potencial del suelo lo restringen las condiciones y procesos antes descritos. Actualmente en el norte del Estado, el turismo de cenotes, cavernas y el senderismo son intensos como lo destaca Reyes (2016). Sobre los manchones de suelos más desarrollados de Cambisoles y Luvisoles se practica la agricultura.

Hacia el centro y sur del Estado, donde hay suelos más desarrollados hay una mayor diversidad de usos posibles sobre los suelos dominantes.

Los resultados muestran que, de los suelos presentes en el Estado, aquellos con mayor potencial de uso se han desarrollado en condiciones intermedias de energía del relieve, densidad de fallas y densidad de karstificación, mismos que corresponden a las áreas que se definen como tectokársticas.

Resta verificar si bajo el mismo conjunto de condiciones se presenta igual variedad de suelos con alto potencial de uso en otros espacios de la Península de Yucatán, como las zonas bajas de Campeche en el oeste o la zona de colinas del sur de Yucatán.

En los ambientes tectokársticos de la porción este de la Península de Yucatán el relieve juega un papel importante en la distribución de los suelos. En las planicies del norte dominan los Leptosols y Cambisols, en la base de los lomeríos del sur Phaeozems con Vertisols y en las zonas intermedias (planicies acolinadas) es donde se encuentra la mayor diversidad de suelos.

Agradecimientos

Al proyecto “Programa estatal de acción ante el cambio climático de Quintana Roo” y al Proyecto “UQROO_FOMIX-2012” por las facilidades dadas para el uso de la información cartográfica, salidas de campo y uso de equipo informático para el análisis estadístico.

Referencias

- Aguilar, Y. 2014. Modelo conceptual y cartográfico de la vulnerabilidad a la contaminación de aguas subterráneas en karst tropical, con un enfoque geopedológico y uso de árboles de decisión. Tesis Doctoral. Centro de Investigación en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. 204 p.
- Aguilar, Y., Mendoza, M., Frausto, O., Bollo, M., Bautista, F. 2010. Spatial distribution of karstic depressions in tropical karst plains. Presentado en la Reunión anual de la Unión Geofísica Mexicana, Geos, México, pp. 115–116.
- Bauer, P., Gondwe, B., Charvet, G., Marí, L., Rebolledo, M., Merediz, G. 2011. The Yucatan Peninsula karst aquifer, México. *Hydrogeology Journal* 19(3):507-524
- Bautista, F, Frausto, O, Ihl, T., Aguilar, Y. 2015. Actualización del mapa de suelos del estado de Yucatán, México: enfoque geomorfopedológico y WRB. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 2(6): 303-315.
- Bautista, F., Estrada, H., Jiménez, J.J., González, J.A. 2004. Relación entre el relieve y unidades de suelo en zonas cársticas de Yucatán. *Terra Latinoamericana* 22: 243–254.

- Bautista, F., Palacio, G., Quintana, P., Zinck, J.A. 2011. Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico. *Geomorphology* 135, 308–321.
- Bocco, G., Mendoza, M.E., Velázquez, A., Torres, A., Torres, M.A. 1996. Regionalización ecológica del estado de Michoacán. Informe Técnico. DERN. Morelia, Michoacán. 98 p.
- Cervantes, Y., Cornejo, S., Lucero, R., Espinosa, J., Miranda, E., Pineda, A. 1990. Atlas Nacional de México volumen II. Instituto de Geografía, UNAM.
- Coke, J. 2004. Geography of caves in Quintana Roo. *Association for Mexican Cave Studies Activities Newsletter* 27, 93–97.
- De Waele, J., Gutiérrez, F., Parise, M., Plan, L. 2011. Geomorphology and natural hazards in karst areas: a review. *Geomorphology* 134, 1–8.
- Frausto, O., Ihl, T. 2008. Capítulo 2. Mapa de formas exocársticas del norte de Quintana Roo a escala 1: 50000. In: *Estudio Geohidrológico Del Norte de Quintana Roo, México*. pp. 41–54.
- Fragoso, P. 2015. Análisis espacial de los suelos de Quintana Roo con un enfoque geomorfoedafológico. Tesis Doctoral. Universidad de Quintana Roo, México. 163 p.
- Fragoso, P., Bautista, F., Frausto, O., Pereira, A. 2014. Caracterización de las depresiones kársticas (forma, tamaño y densidad) a escala 1:50000 y sus tipos de inundación en el Estado de Quintana Roo México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, V, 31, num 1, p. 127-137
- García, G., Padilla, J., Salazar, E. 2000. Reconocimiento geomorfológico e hidrográfico del estado de Quintana Roo. In: Vester, F.M.H. (Ed.), *Influencias de Huracanes En El Paisaje de Yucatán Consideraciones Para El Diseño de Corredores Biológicos Y Su Monitoreo*. Reporte de trabajo, CICY, UQROO, UNAM, ECOSUR, pp. 32–53.
- Gaona, S., Gordillo, T., Villasuso, M. 1980. Cenotes, karst característico: mecanismos de formación. *Revista del Instituto de Geología*, V, 4, num 1, p. 32-36.
- Gutiérrez, M. 2008. *Geomorfología*. Pearson/Prentice Hall, Madrid. 885 p.
- Héraud-Piña, M. 1996. *Le Karst du Yucatan: Pays des mayas*. Presses Universitaires de Bordeaux, Bordeaux. 88 p.
- INEGI. 2005. *Cartas Topográficas, 1:50000*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- López-Ramos, E. 1975. Geological Summary of the Yucatan Peninsula. In: Nairn, A.E.M., Stehli, F.G. (Eds.). *The Gulf of Mexico and the Caribbean*. Springer US, pp. 257–282.
- Lugo-Hubp, J., Aceves, J., Espinosa, R. 1992. Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. *Revista del Instituto de Geología*. UNAM 101, 143–150.
- Mecham, 2005. Quintana Roo Speleological Survey [Documento WEB]. URL <http://www.caves.org/project/qrss/qrss.htm> (consultado 12.19.13).
- Morales, J.J. 2009. La península que surgió del mar. Secretaría de Educación del Gobierno del Estado de Yucatán, México. 152 p.
- Ordóñez, I., García, M. 2010. Formas kársticas comunes de los cenotes del Estado de Quintana Roo (México). *Revista Electrónica de Medioambiente* pp. 15–35.

- Palacio, G., Medina, V., Bautista, F. 2005. Diagnóstico ambiental de la costa del estado de Campeche: enfoques geomorfológico, pedológico y geopedológico. In: Caracterización Y Manejo de Suelos en La Península de Yucatán. UACAM-UADY-INE, México pp. 59--72.
- Priego Santander, Á., Bocco, G., Mendoza, M.E., Garrido, A. 2010. Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisajes 1st ed., México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología. Disponible en: <http://books.google.es/books?id=VaoA4Tg6mYEC>.
- QRSS. 2012. Quintana Roo Speleological Survey [www Documento]. URL <http://www.caves.org/project/qrss/qrssesp.htm>
- Reyes, N. 2016. Identificación y caracterización de los suelos del área protegida de X'Cacel-X'Cacelito. Tesis de Licenciatura. Universidad de Quintana Roo. México. 98 p.
- Weka 3. Data Mining Software in Weka, <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/index.html>
- Zinck, J.A. 1989. Physiography and Soils. ITC, Netherlands. 155 p.
- Zinck, J.A. 2012. Geopedología. ITC, Enschede, Netherlands. 123 p.

Manuscrito recibido: 26 enero de 2016

Recepción del manuscrito corregido: 6 enero de 2017

Manuscrito aceptado: 20 enero de 2017

Suelos, agua, inundaciones y cambio climático en zonas de karst: el caso de Quintana Roo, México

Pereira-Corona Alberto¹, Patricia Fragoso-Servón¹, Oscar Frausto-Martínez²

¹Universidad de Quintana Roo, División de Ciencias e Ingeniería, Departamento de Ciencias.
Boulevard Bahía s/n esquina Ignacio Comonfort, col. Del Bosque, C.P. 77019, Chetumal, Quintana Roo.
Alberto Pereira C.: apereira@uqroo.edu.mx

²Universidad de Quintana Roo, División de Desarrollo Sustentable, Departamento de Ciencias y Humanidades.
Av. Andrés Quintana Roo s/n, Col. San Gervasio, CP 77600, Cozumel, Quintana Roo.

Resumen

La gestión de riesgos implica la capacidad de establecer la probabilidad de manifestación de un peligro particular en un sitio determinado y, con base en ello, instrumentar acciones para impedir dicha manifestación o reducir la afectación a la población o los recursos de los que ella depende. Las inundaciones son resultado de un conjunto de factores que interactúan en un espacio dado, entre los cuales las características del suelo y subsuelo, la precipitación pluvial, la orografía y más recientemente las obras humanas, son fundamentales. Recientemente se ha empezado a estudiar y entender el cambio climático (CC); el comportamiento de la temperatura global es relativamente predecible, no así la precipitación pluvial. Desde el punto de vista de la planeación, es necesario prepararse para muy diferentes condiciones dada la incertidumbre de los escenarios de CC en cuanto a la precipitación. El objetivo del presente documento es presentar un modelo multicriterio con información geográfica para la identificación de zonas sujetas a inundaciones como resultado de la concurrencia de factores geológicos, geomorfológicos, edafológicos y climáticos. Mediante un SIG se evaluaron los sitios con mayor peligro de inundación en función de su orografía, edafología y proyecciones pluviométricas de acuerdo con los escenarios de CC usados. El mapa resultante fue contrastado con el registro histórico de inundaciones y precipitaciones pluviales de los últimos 20 años para verificar la certeza en la definición de las áreas en peligro de inundación; se sobrepuso la información de población por asentamiento para estimar la población expuesta y la probabilidad de afectación.

Los resultados muestran que el modelo y el mapa tienen una certeza cercana al 75% en la proyección de sitios con posibilidades de inundarse; ello permite priorizar la atención para los sitios con probabilidades mayores a 65%, enfocando los esfuerzos en las áreas donde el peligro es más probable y la población más vulnerable.

Abstract

TRisk management implies the ability to establish the probability of manifestation of a particular hazard in a given site and based on this, implement actions to prevent such manifestation or reduce the impact on the population or the resources on which it depends. Floods are the result of a set of factors that interact in a given space, among which the characteristics of soil and subsoil, rainfall, orography and, more recently, human works are fundamental. Recently we have begun to study and understand climate change (CC); the behavior of global temperature is relatively predictable, but not rainfall. From the point of view of planning, it is necessary to be prepared for very different conditions given the uncertainty of CC scenarios in terms of precipitation. The objective of this paper is to present a multicriteria model with

geographic information for the identification of areas subject to floods because of the concurrence of geological, geomorphological, soil and climatic factors. Using a GIS sites most likely to be flooded for its topography, soil and rainfall projections per CC scenarios used they were evaluated. The resulting map was contrasted with the historical record of floods and rainfall of the last 20 years to verify the certainty in the definition of areas in danger of flooding; information on the population settlement was overlapped to estimate the exposure of the population and the chance of damages to occur.

The results show that the model and the map have a certainty close to 75% in the projection of sites with possibilities of flooding, allowing to prioritize the attention for sites with probabilities greater than 65%, focusing efforts in the areas where the danger is most likely and the population is most vulnerable.

Introducción

En el caso de la población humana, el riesgo, como producto de la probabilidad de manifestación de un peligro. La vulnerabilidad de la población o sistema expuesto a él no es un fenómeno natural, sino una construcción consecuente con los patrones de desarrollo de la misma y la ocupación de espacios en los cuales se manifiestan dichos peligros (Aven, 2008; Cardona, 2003; Cavazos, 2015).

La gestión moderna de riesgos implica la capacidad de medir o proyectar la probabilidad de que un conjunto de condiciones en un sitio determinado sea suficientemente grande como para ameritar la ejecución de acciones tendientes, ya sea a impedir la manifestación de un peligro específico o bien, a construir las condiciones para reducir la afectación a la población o los recursos de los que ella depende (Blaikie et al., 2014).

Las características del suelo y subsuelo, la precipitación pluvial, la orografía y más recientemente las obras humanas, son los principales factores que interactúan para dar como resultado inundaciones. Estas pueden tener diferente origen en función de la manifestación de los atributos mencionados. Particularmente, se tienen ya bien identificados por su velocidad como súbitas o paulatinas, o por los procesos de origen, ya sea por acumulación de precipitaciones, por desbordamiento de ríos y otros cuerpos de agua interiores, por las marejadas de tormenta en las zonas costeras, tal como lo refieren diferentes textos y trabajos de

Apel et al. (2004), CENAPRED (2009), Kundzewicz y Takeuchi (1999), Messner y Meyer (2006), Plate (2002) y Sayers et al. (2013), entre muchos otros. Sin embargo, hay procesos de inundación que no tienen su origen directo en ninguno de estos procesos individualmente, sino en una combinación de los mismos, junto con otros factores específicos del espacio geográfico, los cuales no han sido adecuadamente tipificados o descritos.

Las inundaciones derivadas de forzamientos en el comportamiento del agua subterránea han sido muy someramente descritas para otras regiones del planeta (Kreibich y Thielen, 2008) incluyendo aquellas con sistemas kársticos, como lo atestiguan estudios realizados en zonas kársticas de yeso en Inglaterra (Hughes et al., 2011; Robins y Finch, 2012) o karst de carbonatos en Francia (Jourde et al., 2014).

Si bien este trabajo no pretende llegar a la tipificación y descripción fina de estos fenómenos en la península de Yucatán, da cuenta de inundaciones que no tienen su origen directo en los procesos superficiales mencionados, sino que se encuentran íntimamente ligadas al comportamiento sinérgico de esos procesos con las aguas subterráneas en una zona kárstica de la península de Yucatán.

Desafortunadamente, como hacen notar Hughes et al. (2011) no hay ni métodos ni datos suficientes y adecuados para poder hacer una valoración del riesgo de inundaciones derivado de cambios en el comportamiento de las aguas subterráneas.

El cambio climático (CC) es un hecho que recientemente empezamos a estudiar y tratar de entender. Si bien el comportamiento de la temperatura global es relativamente predecible con las herramientas disponibles, no lo es así el de la precipitación pluvial (Conde Álvarez y Gay García, 2008; García, 2012; Golicher y Morales, 2004; Magaña et al., 1999; Petrișor, 2011; Tejeda-Martínez et al., 2008; Vörösmarty et al., 2013), de modo que desde el punto de vista de la planeación, es necesario prepararse para actuar en muy diferentes condiciones dada la incertidumbre de los escenarios de CC en cuanto a la precipitación pluvial (Amendola, 2004; Campos et al., 2014; Costanza, 2001; Lerer, 2008).

La gestión moderna de riesgos implica la capacidad de establecer la probabilidad de que un conjunto de condiciones permita la manifestación de un peligro en un sitio determinado y haga necesario intervenir para impedir la manifestación del peligro, o bien, construir las condiciones para reducir la afectación a la población o a los recursos de los que ella depende en caso necesario (mitigación de efectos).

Esta gestión del riesgo implica no solo conocer la probabilidad de que el peligro se manifieste, sino que involucra el poder localizar geográficamente

esa posibilidad y determinar las medidas o estrategias de acción más adecuadas para manejarlo en función de la población afectada y su vulnerabilidad.

Esta tarea se complica cuando los peligros están en extremos opuestos de la escala respecto a un mismo elemento o factor, como en el caso de las sequías y las inundaciones (Figura 1).

El objetivo de este trabajo fue determinar a partir de la información disponible de geomorfometría, edafología, precipitaciones, información de campo y los escenarios extremos de CC, las probabilidades de que se produzcan inundaciones en Quintana Roo, su ubicación y magnitud, para estimar las áreas y la población que puede resultar afectada.

Metodología

Mediante la superposición de las diferentes capas de datos en un sistema de información geográfica (SIG) se evaluaron los sitios con mayor probabilidad de inundarse en función de su orografía, edafología y proyecciones pluviométricas de acuerdo con los escenarios de CC usados.



Figura 1. Dos vistas del mismo espacio en el norte de Quintana Roo, la primera durante una sequía, la segunda durante una inundación. Fotos A. Pereira C.

La información orográfica fue derivada del Modelo Digital de Terreno (MDT) del INEGI (2013) con la técnica de Priego Santander et al. (2010) modificada por Fragoso-Servón et al. (2014), la cual permite la descripción geomorfométrica semiautomatizada de grandes espacios con escasa disección vertical.

La información geológica se derivó de la información cartográfica del INEGI (2000) en escala 1:250,000 por ser la única existente en una escala relativamente adecuada para el Estado y fue utilizada para calificar la información topográfica, geomorfométrica y edafológica generada en escala 1:50,000.

Para hacer comparables la información de fallas y fracturas en escala 1:50,000 generada por Oscar Frausto y Thomas Ihl (comunicación personal, 2014) y la información de depresiones kársticas y cuerpos de agua en la misma escala por Fragoso-Servón et al. (2014) se elaboraron por interpolación de datos, coberturas de la densidad por kilómetro cuadrado (considerando la extensión proporcional) de estos atributos para todo el Estado y se sobrepusieron en un SIG. El resultado ubica espacios en los cuales las densidades medias y altas de estos procesos coinciden.

Uno de los aspectos determinantes en la manifestación de este peligro radica en la naturaleza de los suelos y subsuelos sobre los cuales se acumulan las precipitaciones de modo que se incorporó como base edafológica el mapa de suelos 1:50,000 recientemente producido por Fragoso-Servón (2015).

Los escenarios de CC utilizados fueron los escenarios extremos de precipitación para el estado de Quintana Roo producidos para el Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático (PEACC; Pereira et al., 2013) los cuales ya presentan los escenarios extremos de sequías y de máximos de precipitación de acuerdo con Orellana et al. (2009) y los modelos internacionalmente aceptados para la

construcción de escenarios de CC con diferentes supuestos de comportamiento de la atmósfera (Pereira et al., 2013).

Toda la información cartográfica se utilizó en proyección Universal Transversa de Mercator para simplificar los procesos de análisis y el manejo de distancias y superficies asociadas a la evaluación del riesgo de inundación. El mapa resultante fue contrastado con el registro histórico de inundaciones de los últimos 20 años (reportes de CONAGUA, CAPA, periódicos, etc.) y con la información obtenida en campo mediante entrevistas para otros proyectos en los años de 1999, 2002, 2008 y 2010 (D.O.F., 2012; UQRoo, 2000 y 2004), para determinar la confiabilidad del mismo y establecer la probabilidad de inundación. Posteriormente se sobrepuso la información de población por asentamiento humano para estimar la población expuesta al peligro y la probabilidad de afectación.

Resultados y discusión

La construcción del modelo geomorfométrico al igual que otros estudios previos (Frausto e Ihl, 2008), muestra para el norte de Quintana Roo una serie de planicies escalonadas que se encuentran separadas por acumulaciones de materiales orientadas de manera aproximadamente perpendicular al radio que va desde la zona de deformación atribuida al impacto del meteorito de Chicxulub hacia el este sureste y aproximadamente paralelas a la dirección general de lo que se conoce como sistema de fracturas de Holbox.

El análisis de la densidad de fallas muestra tres áreas en las cuales se concentra una gran cantidad de eventos por unidad de superficie (Fragoso et al., 2014): una en la zona norte está asociada al sistema de fracturas de Holbox en altitudes de hasta 40 metros sobre nivel medio del mar (msnm) (Frausto e Ihl, 2008), otra hacia el centro del Estado en donde se inicia el ascenso hacia la parte alta del mismo con cotas

entre los 50 y 70 msnmm donde, de acuerdo con la información geológica disponible, afloran los contactos entre capas de diferente antigüedad para el Estado y otra al sur en la porción geológicamente más antigua del Estado.

Las manifestaciones externas a la karsticidad se concentran igualmente en tres áreas en el sur, donde se asocian con una orografía de mediana energía en la cual las formaciones principales son lomeríos mediana y fuertemente disecionados. Las formas de disolución en este caso se encuentran en los valles y hondonadas en las que la acumulación de escurrimientos superficiales incrementa la velocidad de disolución de la masa kárstica.

El resto es un sistema con variaciones en densidad, que corre desde la parte norte del Estado, en donde se encuentra asociado con el sistema de fallas de Holbox y que discurre en dirección norte-noreste a sur-suroeste hacia el punto de inicio de los acolinamientos en la cota, entre los 50 y 70 msnmm en la parte central y en la porción sur en zonas con lomeríos (Fragoso et al. 2014).

Cuando se califican las formaciones kársticas con los elementos geológicos (por fallamiento), son dos los espacios en los cuales claramente coinciden las mayores densidades por unidad de superficie para ambos procesos: el sistema de fracturas de Holbox en la parte norte y centro del Estado (Figura 2) presenta condiciones diferentes en cuanto a inundaciones, pues en el agrupamiento al norte sobre el sistema de fallas de Holbox las inundaciones se presentan principalmente por precipitaciones torrenciales, mientras que en la porción central del Estado, por precipitaciones en combinación con escurrimientos hacia los valles kársticos, aunque en menor cuantía.

El siguiente aspecto analizado se deriva de la combinación de la orografía con los tipos de suelo predominantes en la porción norte del Estado, que es en donde se hallaron los espacios

más amplios de coincidencia entre los procesos de fallamiento y de disolución kárstica, como lo reporta (Fragoso, 2015). Las estructuras orográfica (Figura 3) y geológica definidas como las depresiones kársticas y los sistemas de fallas y fracturas (Figura 2), aportaron información sobre las características del flujo de agua en las capas superiores del sustrato, permitiendo explicar los fenómenos de inundación por escurrimiento en la zona sur y aquellos derivados de precipitaciones pluviales intensas en el centro y el norte del Estado.

La velocidad de infiltración de las precipitaciones se ve influida también por la naturaleza del suelo que hay sobre ese basamento geológico con o sin fracturas y disoluciones. Así, los suelos más impermeables como los Gleysoles se encuentran asociados a sistemas o unidades litológicas que quedan sumergidas al menos por una parte del año, es decir, son sitios naturalmente inundables por la impermeabilidad del suelo; en el norte de Quintana Roo se encuentran asociados a los sistemas de humedales y otros espacios con inundaciones temporales o permanentes que coinciden con zonas que representan mínimos altitudinales locales en la estructura del terreno.

Para el caso de los sitios de interés, la cartografía de suelos muestra dominancia de Leptosoles (Fragoso, 2015); sin embargo, en los lugares en los que se forman depresiones, ya sea por procesos de disolución o por fractura del basamento rocoso, los suelos dominantes son Gleysoles que, al no alcanzar un mínimo de superficie en su cobertura respecto al área representada, no son reportados como suelos principales.

La verificación de los tipos de suelo a escalas mayores se tomó de los informes técnicos y el trabajo de campo realizados para la elaboración del programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la Zona Continental de Isla Mujeres (UQRoo, 2000) (datos de 1999), el Programa Estatal de Ordenamiento Territorial de Quintana Roo (UQRoo, 2004) (datos de 2002), el Programa de Ordenamiento Ecológico Local del Municipio

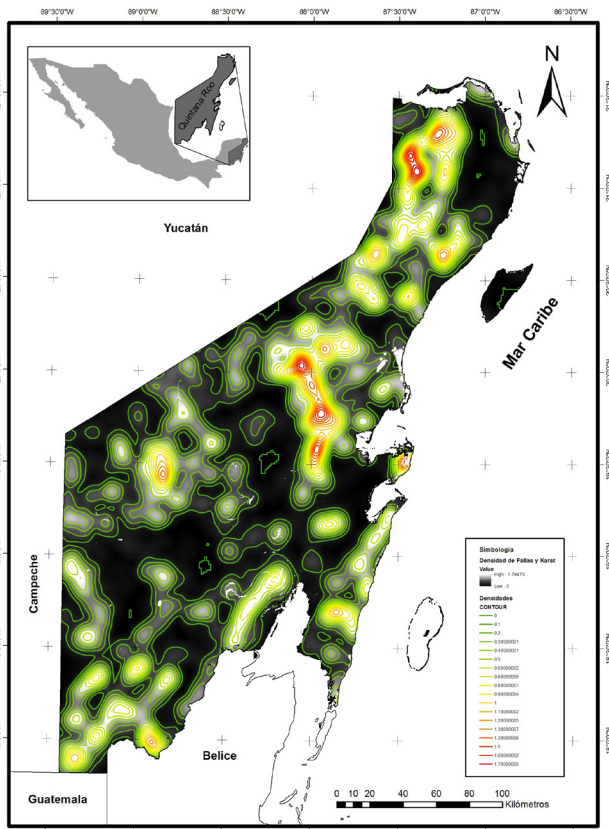


Figura 2. Mapa resultante de la combinación visual de la densidad de fallamientos y fracturas y la densidad de formaciones kársticas negativas en Quintana Roo.

de Lázaro Cárdenas (por decretarse) (datos de 2008) y el Programa de Ordenamiento Ecológico Marino y Regional del Golfo de México y Mar Caribe (D.O.F., 2012) (datos de 2010). Durante la realización de dichos ordenamientos se hicieron entrevistas en campo en localidades y poblados que se encuentran dentro de los espacios en los que confluyen los atributos mencionados de orografía, fallamiento y karsticidad. En dichas entrevistas los habitantes manifestaron que con frecuencia en la temporada de lluvias y de nortes se presentan inundaciones en los así llamados “bajos” sin que haya llovido en las cercanías. Igualmente, los entrevistados de la zona que se encuentra hacia Pac-Chen al sur-suroeste del sistema de fracturas de Holbox manifestaron que en muchas de esas ocasiones lo que sucede es que empieza a brotar agua del suelo provocando la inundación (Figura 4).

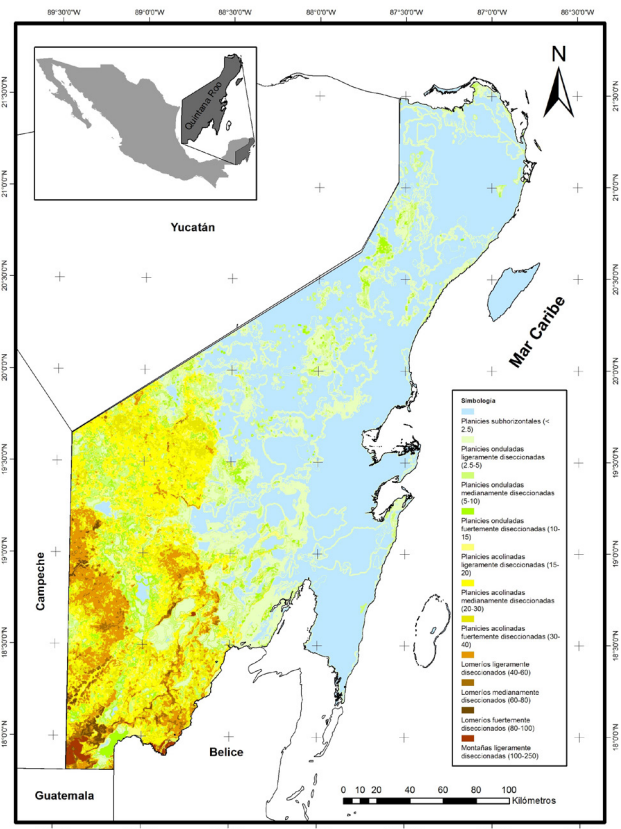


Figura 3. Estructura geomorfométrica de Quintana Roo. Elaboración propia.

Los elementos detectados en los trabajos mencionados en los párrafos anteriores hacen suponer que los procesos que están generando el forzamiento en el comportamiento del acuífero, responden a los tipos 1 y 4 de los mencionados por Hughes et al. (2011), es decir, precipitaciones muy intensas o prolongadas, o bien una configuración particular de las estructuras subterráneas que crea barreras y canaliza subsuperficialmente los aportes de zonas distantes hacia esos puntos de menor altura local antes mencionados, pudiendo muy posiblemente, ser una combinación de ambos.

Una revisión del terreno en dichos sitios mostró la abundancia de fracturas menores y procesos superficialmente pequeños de disolución kárstica, además de la presencia de materiales calcáreos superficiales intemperizados, consolidados y

parcialmente cementados conocidos como caliche o calcreto en las partes que rodean las depresiones y los poblados, frecuentemente debajo de una capa de suelos delgados de tipo Leptosol. Si bien se da por hecho que el caliche es una formación sedimentaria que se ha consolidado en un clima árido, la presencia de dichas formaciones inmediatamente por debajo de suelos delgados en la península de Yucatán ya se ha documentado anteriormente por otros autores como Bautista y Palacio (2005) y Sedov et al. (2008 y 2007), y bien podrían representar esa conformación particular del subsuelo que, al impedir la infiltración de las precipitaciones hacia capas más profundas de la masa kárstica favorece su desplazamiento de manera subsuperficial hacia los sitios de menor altura topográfica.

La intersección de las zonas en las que se manifiestan los atributos hasta ahora mencionados define el conjunto de sitios en los cuales esta inundación por aguas subterráneas puede presentarse.

Al combinar todos estos elementos se obtiene una zona al norte del Estado en donde se presenta una forma particular de inundación, en la cual no hay precipitaciones suficientes que la justifiquen, pues éstas se presentan más al norte o al oeste según testimonio de los habitantes de la zona (Figura 4).

Al comparar el mapa resultante con los registros históricos de reportes de inundaciones para la zona en la que confluyen los atributos estudiados, se obtuvo una alta coincidencia (superior al 70%) entre los poblados incluidos en la zona determinada como área de concurrencia de estos fenómenos y los reportes de poblados aislados por inundaciones en diferentes años desde 1996, como se muestra en sombreado gris de la Figura 4. El resultado anterior puede ligarse fácilmente con la gestión de riesgos, en este caso particular, con la prevención de daños y pérdidas en la población que habita esta zona por efecto de inundaciones, ya no solo por precipitaciones torrenciales in situ, sino también

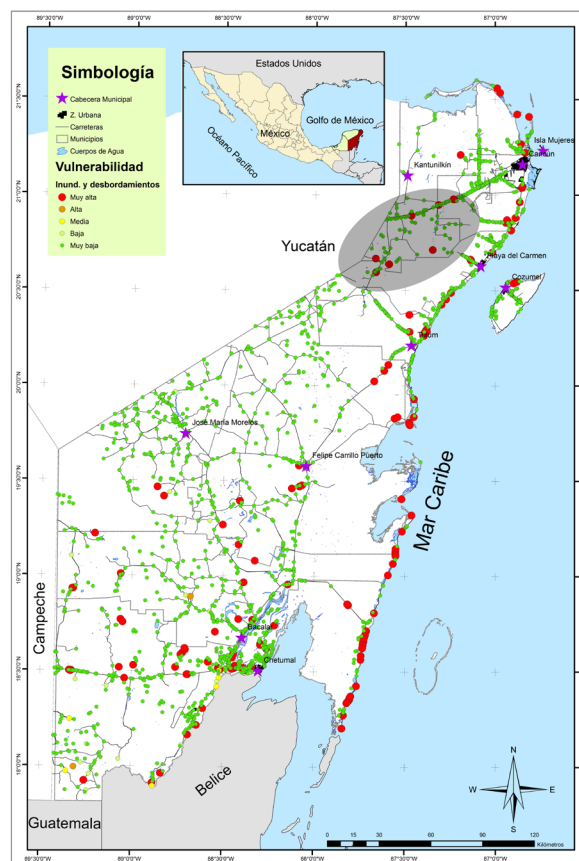


Figura 4. La zona sombreada muestra el área de Pac-chén, donde confluyen alta densidad de fallas y fracturas, alta densidad de formas kársticas negativas, presencia de caliches, suelos delgados y reportes de inundaciones por agua que surge del suelo en el norte de Quintana Roo. Elaboración propia.

por el efecto de precipitaciones cercanas que fluyen subsuperficialmente hacia la zona.

Desde el punto de vista de la planeación y la prevención de esos riesgos de inundación, se utilizaron los escenarios climáticos construidos por Orellana et al. (2009) para el Atlas de Cambio Climático de la Península de Yucatán considerando los dos escenarios más extremos en cuanto a precipitaciones pluviales.

Los escenarios climáticos extremos seleccionados muestran dos condiciones que permiten orientar los esfuerzos para la reducción de riesgos en la zona de interés. El primero de ellos (Figura 5) muestra una probabilidad media de que las precipitaciones para esa zona de la península

se incrementen pasando a conformar un clima más húmedo con aumento de las precipitaciones tanto en verano como en invierno, lo que significaría un mayor peligro de inundaciones. El segundo escenario extremo (Figura 6) muestra las condiciones en el supuesto de aridización de la península. En este caso las precipitaciones de verano serían complementadas con un ligero incremento en las precipitaciones invernales por efecto de los nortes, en cuyo caso las probabilidades de inundaciones se conservarían en los niveles actuales, mismos que ya obligan a tomar medidas para la protección de la población actualmente asentada en ese espacio (Pereira et al., 2013).

En la Tabla 1 se muestran las anomalías de precipitación registradas por las estaciones meteorológicas en la zona de estudio. Es de hacer notar que los años en los que se presentan estas anomalías coinciden con los años en que hay reportes para al menos un subconjunto de más de diez de los poblados que caen dentro de la zona más baja de la microcuenca. Coincidentemente, las estaciones que se encuentran al norte y al oeste de la zona en la que se presentan las inundaciones por aguas subterráneas están en los sitios topográficamente más altos de las microcuencas (Zona Alta), en tanto que las que se encuentran al este y al sur están a menor altura topográfica dentro de la zona.

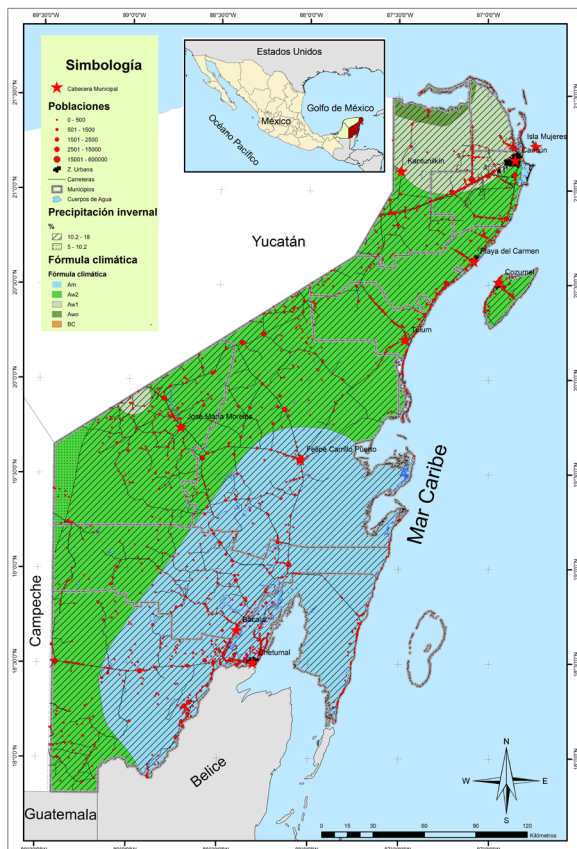


Figura 5. Escenario de cambio climático mostrando la zona que incrementaría sus precipitaciones. Fuente: Pereira C. et al. (2013) con base en datos vectoriales de Orellana et al. (2009).

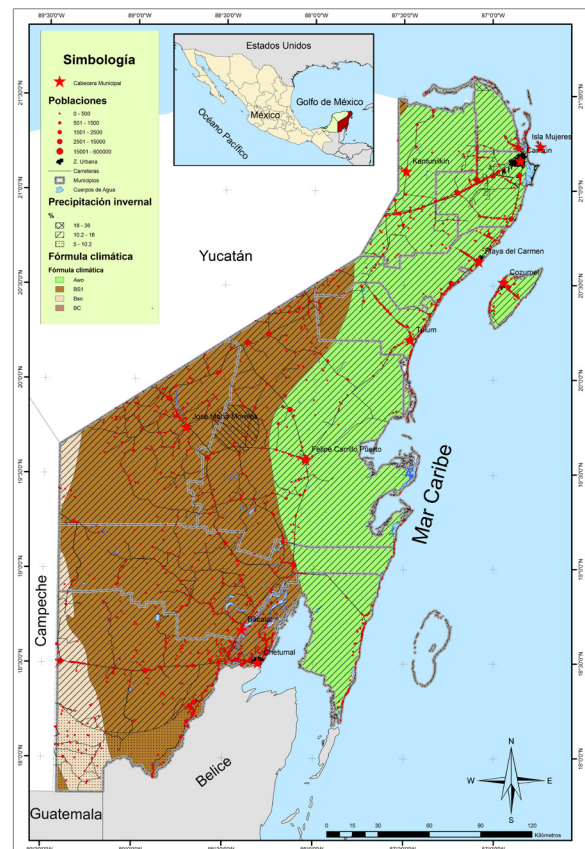


Figura 6. Escenario de cambio climático mostrando la zona que reduciría sus precipitaciones. Fuente: Pereira C. et al. (2013) con base en datos vectoriales de Orellana et al. (2009).

A partir de la información derivada de los escenarios seleccionados se construyó el mapa de peligros de inundación por incremento de las precipitaciones (Figura 7) el cual muestra que si bien en la zona específica no es de esperarse un incremento substancial en las mismas, el incremento en las zonas cercanas, particularmente al norte de la zona de interés, podría aumentar la frecuencia de aparición de estas inundaciones por agua subterránea en los sitios donde se registran mínimos altitudinales locales.

En la Tabla 2 se pueden ver los huracanes que han afectado Quintana Roo y la coincidencia casi completa que hay entre la presencia de eventos

con categoría de huracán y el incremento de precipitaciones, alcanzándose para dichos años de coincidencia los máximos mensuales y también varias de las precipitaciones máximas diarias, lo que puede indicar que estos fenómenos extremos son parte de la causa del forzamiento en el comportamiento del acuífero en esta zona.

La zona delimitada por el análisis abarca un total de 110 asentamientos en Quintana Roo y 19 en Yucatán. De estos 129, 65 se encuentran en las zonas más bajas o en el fondo de las microcuencas locales y de ellos, 48 (73% aproximadamente) han reportado inundaciones súbitas en diferentes años por aguas subterráneas ("agua que sale del suelo" - en palabras de los pobladores).

Tabla 1. Normales mensuales y extremas mensuales y diarias e3 precipitación en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos del smn.

Estación	Nombre	ELEMENTOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
23012	COBA														
	Zona Baja	NORMAL	52.7	38.2	40.4	59.9	99.7	138.2	106.5	152.3	194.4	134.9	66.4	36.6	1,120.20
Latitud	20°29'19" N.	MAXIMA MENSUAL	171	119.5	177.5	372.9	293.8	344.9	250.8	323.5	359.1	431.1	132.4	197.7	
Longitud	087°44'15" W.	AÑO DE MAXIMA	1994	2002	1990	2010	2001	1993	2005	2000	1994	1998	1997	1972	
Altura	5.0 MSNM.	MAXIMA DIARIA	60	78.7	69	103.8	112	100	87	86.7	84.8	80	117.3	78.3	
		FECHA MAXIMA DIARIA	01/1974	11/2008	19/1990	21/2010	27/2001	16/1993	21/2005	19/1973	03/1974	10/1995	30/2001	31/1972	
23027	VICTORIA														
	Zona Baja	NORMAL	60.3	49	46.7	53.3	119.7	183	113.2	167.3	207.9	180.1	88	60.1	1,328.60
Latitud	20°47'26" N.	MAXIMA MENSUAL	166.2	232.5	181	160.5	633.7	377	364.5	312.6	388.5	478.7	388.7	309.5	
Longitud	087°16'49" W.	AÑO DE MAXIMA	1998	2002	1987	1989	1984	1969	2010	2007	1995	2005	1997	1976	
Altura	5.0 MSNM.	MAXIMA DIARIA	114	61	90	85	99	160	160	112	150	305	114	81.2	
		FECHA MAXIMA DIARIA	10/2009	24/1990	23/1989	28/1993	03/1966	16/1982	05/2010	31/1973	14/1988	23/2005	02/2004	19/1976	
23157	IDEAL														
	Zona Alta	NORMAL	58.1	43.6	62	44.1	111.7	163.9	168.4	189.2	222.9	183.8	74.5	46.6	1,368.80
Latitud	20°52'56" N.	MAXIMA MENSUAL	151	176	296	166	285.9	349.5	289	412	335.8	496	225	118	
Longitud	087°32'47" W.	AÑO DE MAXIMA	1994	1997	1994	2004	1993	2010	2001	2000	1992	1995	1997	2004	
Altura	22.0 MSNM.	MAXIMA DIARIA	100	65	260	60	112	73.2	115	82	68	218.5	68	100	
		FECHA MAXIMA DIARIA	23/1995	22/1991	28/1994	12/2004	24/2003	10/2008	17/2005	05/2000	19/1998	23/2005	23/1997	23/2004	
23030	NUEVO XCAN														
	Zona Alta	NORMAL	52.9	42.2	45.2	55.4	100.4	137.9	125	156.4	180.5	128	67.8	54.3	1,146.00
Latitud	20°53'00" N.	MAXIMA MENSUAL	110	120	135	277.1	252	420	294.5	467	357	246	202	173.5	
Longitud	087°35'00" W.	AÑO DE MAXIMA	1978	1965	1969	1962	1974	1961	1989	1973	1963	1962	1968	1990	
Altura	26.0 MSNM.	MAXIMA DIARIA	47	80	60	101	120	120	108	123	104	140	69	100	
		FECHA MAXIMA DIARIA	11/1962	22/1965	21/1969	09/1962	22/1974	12/1965	29/1989	05/1990	17/1967	08/1971	15/1970	10/1966	
23011	KANTUNILKIN														
		NORMAL	46.2	39.5	43.2	50.7	112.8	192.4	177.6	195	224.3	170.6	70.2	44.8	1,367.30
Latitud	21°05'45" N.	MAXIMA MENSUAL	292	130	148	262	410.1	565.9	453.5	419	521.5	569.5	295.5	203.7	
Longitud	087°29'08" W.	AÑO DE MAXIMA	1988	2009	1993	1985	1984	1953	1989	2009	1988	2005	1988	1964	
Altura	15.0 MSNM.	MAXIMA DIARIA	100	120	98	90.5	110.5	365.8	174	131	248	310	120	62	
		FECHA MAXIMA DIARIA	10/1988	02/2009	07/1993	16/1966	28/2001	16/1982	29/1989	20/2009	30/1995	21/2005	21/1988	12/1964	
23023	SOLFERINO														
		NORMAL	51.5	41.6	32	48.3	93.8	167.5	157.8	162.4	209.3	142	82.3	54.2	1,242.70
Latitud	21°20'45" N.	MAXIMA MENSUAL	177.1	156.3	157.5	225.5	410.2	483.2	309.4	279.8	450	599.5	251.7	205.4	
Longitud	087°25'49" W.	AÑO DE MAXIMA	1983	2002	1981	1995	1984	1982	1989	1973	1995	2005	1988	1976	
Altura	14.0 MSNM.	MAXIMA DIARIA	95.2	108.5	104.4	160	145	111.5	175.5	84.7	164.8	300	180	70	
		FECHA MAXIMA DIARIA	15/1972	24/1974	08/1981	27/1995	27/1998	17/1993	29/1989	18/1973	09/1970	21/2005	20/1988	09/1978	
23014	LEONA VICARIO														
	Zona Baja	NORMAL	51.5	46.8	36	53.8	82.8	149.6	116.3	134.8	187.4	157.4	76	51.4	1,143.80
Latitud	20°59'18" N.	MAXIMA MENSUAL	117	257.6	137.6	271.3	218	566.8	230.3	308	487.2	418.4	243	199.5	
Longitud	087°12'16" W.	AÑO DE MAXIMA	1966	2007	1981	2010	1974	1982	1998	2007	1997	1999	1997	1964	
Altura	8.0 MSNM.	MAXIMA DIARIA	70	85.5	73.1	117	87	262.6	90	126	176	97.5	73	100	
		FECHA MAXIMA DIARIA	17/1991	28/1992	07/1981	14/2010	20/1973	16/1982	09/2010	24/1977	04/1974	03/2003	09/1975	27/2000	
31068	CHAN CENOTE														
	Zona Alta	NORMAL	38	39.3	41	51.9	79.7	160.1	184.6	174.9	191.1	139.1	62.2	46.1	1,208.00
Latitud	20°59'27" N.	MAXIMA MENSUAL	115	109	176.7	231	275.5	302.1	321.4	298.4	338	389.5	204.2	173.7	
Longitud	087°47'02" W.	AÑO DE MAXIMA	1994	1997	2004	1989	1984	1988	2005	1992	1991	2005	1991	1982	
Altura	30.0 MSNM.	MAXIMA DIARIA	60	61	149.2	105.4	80.1	95	140.5	94.3	100	156	74.2	88.7	
		FECHA MAXIMA DIARIA	03/1985	08/1985	19/2004	28/2004	24/2003	16/1994	17/2005	27/1980	14/1988	22/2005	11/1979	15/2005	

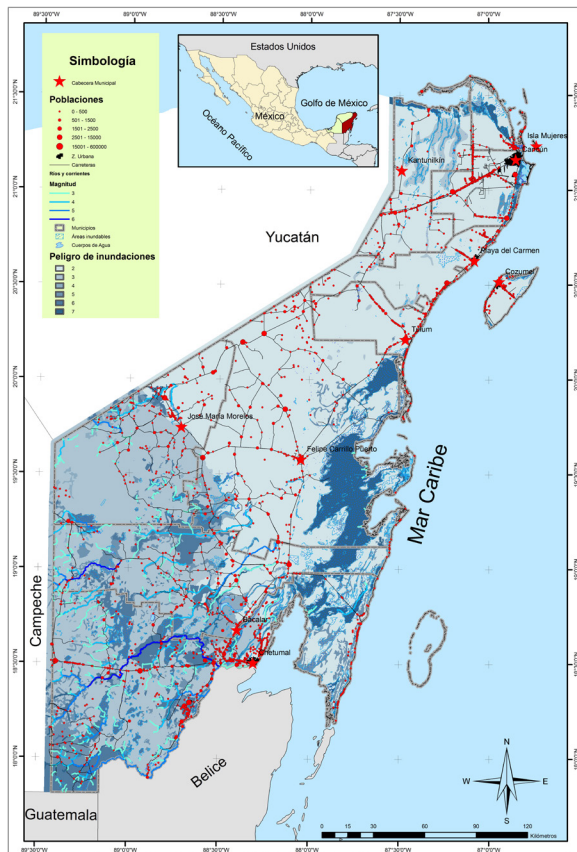


Figura 7. Escenario de cambio climático mostrando el peligro de inundaciones. Fuente: Pereira C. et al. (2013) con base en datos vectoriales de Orellana et al. (2009).

Dentro del área delimitada por el análisis se encuentran poblaciones con carácter urbano como son Leona Vicario y Nuevo Xcan donde la problemática no es tan grave por hallarse en sitios relativamente altos respecto al resto del área; además, ambos presentan grados de marginación relativamente bajos comparados con los demás asentamientos, que son eminentemente rurales y con grados de marginación altos y muy altos, lo que los hace más vulnerables.

La comparación de los sitios reportados con inundaciones súbitas por aguas subterráneas contra la zona delimitada con el análisis muestra una certeza cercana al 75% en la identificación de sitios con posibilidades de inundarse por este fenómeno. Ello permite establecer sitios prioritarios de atención para los cuales el mapa presenta probabilidades por encima de 65%

Tabla 2. Huracanes que han afectado Quintana Roo. Fuente: Elaboración propia.

Año	Nombre	Categoría
1995	Roxane	3
1998	Earl	t
1999	Katrina	t
2000	Gordon	t
2001	Chantal	t
2002	Isidoro	2
2003	Bill	d
	Larry	d
	Claudette	1
2004	Ivan	5
2005	Emily	5
	Wilma	5
2006		
2007	Dean	5
2008	Dolly	2
2009	Ida	2
2010	Karl	3
	Paula	2
2011	Don	t
	Rina	1
2012	Ernesto	2
2013	Karen	t
2014	Dolly	t

permitiendo enfocar los esfuerzos inicialmente de prevención y posteriormente de mitigación en las áreas en las cuales el peligro es más probable y la población es más vulnerable.

En total, considerando los 129 asentamientos, se tienen poco más de 25,000 personas en Quintana Roo expuestas a inundaciones por aguas subterráneas, de las cuales, poco menos de 15,000 se encuentran en los asentamientos de la parte baja de las microcuencas y expuestas con mayor probabilidad y frecuencia a dichas inundaciones que, en ocasiones, pueden aislar

los asentamientos involucrados por varios días y en casos extremos, más de una semana.

Esta investigación ha permitido establecer tres tipos de problemas que se presentan en el territorio que genéricamente son todos catalogados como inundaciones. Específicamente se ha detectado inundaciones por precipitación, por escurrimiento y problemas de inundación por afloramiento (que no habían sido reportados en México), que se presentan en sitios donde el material kárstico subyacente presenta procesos de hundimiento y fracturación extensos y que al mismo tiempo se encuentra formando un mínimo altitudinal local, lo que permite que el agua precipitada a varias decenas de kilómetros, al infiltrarse en las primeras capas del basamento, se desplace hacia estos sitios aflorando como si se tratara de manantiales provocando inundaciones importantes e imprevistas sin que haya precipitación en el sitio específico.

El razonamiento, considerando el relieve y la geología de la zona es el siguiente: para un sistema kárstico con un manto freático superficial, los sistemas de disolución (karsticidad), así como las fallas y fracturas representan, desde un punto de vista funcional, sitios en los cuales la infiltración de las precipitaciones tiene lugar a mayor velocidad dado que a la permeabilidad del medio se suman las discontinuidades formadas por los procesos de disolución y fallamiento.

No obstante, dicha permeabilidad incrementada no implica en manera alguna un flujo unidireccional. Por el contrario, se convierte en un sistema tanto de conducción como de alivio de la presión hidrostática para el acuífero subyacente, de forma semejante a lo descrito por Bonacci et al. (2006) en una zona kárstica de Croacia.

En estas condiciones, los sistemas fracturados en sitios de mayor altura relativa y que rodean esos valles kársticos en la parte más profunda de los escalonamientos descritos, reciben las precipitaciones y el líquido se moviliza entre la

capa de caliche superficial y la masa calcárea subyacente, que es menos porosa, de manera semejante a lo descrito para el caso de Francia en cuanto al origen de los forzamientos del acuífero por precipitaciones anormalmente abundantes (Jourde et al., 2014), desplazándose por gravedad hacia los puntos más bajos en donde la presión hidrostática lo obliga a fluir por los puntos de disolución y las fracturas con el gradiente de presión y contra la gravedad, es decir, hacia el exterior.

Tratando de aventurar una explicación más o menos fina del fenómeno, es posible inferir que cuando las precipitaciones que se presentan en zonas cercanas a este sitio son anormalmente abundantes (Hughes et al., 2011; Robins y Finch, 2012; Jourde et al., 2014) como las ocasionadas por los huracanes (Pereira et al., 2013 y Tablas 1 y 2) y penetran rápidamente la capa superficial de suelos delgados, llegan al material parental o de soporte de dicho suelo. En la zona se reportan calcretos que superyacen al material parental (Bautista y Palacio, 2005; Sedov et al., 2008; 2007), en donde a través de fracturas de diversos tamaños penetran hacia el subsuelo, donde se desplazan rápidamente entre la capa de calcreto y el material calcáreo subyacente, el cual presenta generalmente en la capa de contacto un aspecto pulverulento donde las partículas, por tensión superficial, envuelven las gotas de agua infiltradas y permiten su movilización horizontal entre ambas capas (caliche y caliza subyacente) antes de que la saturación del sistema induzca una mayor presión y se inicie el mojado de la capa calcárea no cementada que soporta el sistema.

Este movimiento subsuperficial de agua desemboca entonces en los sitios en los cuales la capa superior de calcreto se ha roto, ya sea por obras civiles como la construcción de inmuebles, u otras infraestructuras de servicios comunes en poblados pequeños. Otro de los factores que favorece la ruptura de estas capas de caliche es la tala de las selvas bajas y medianas originales para ganadería o para actividades agrícolas, ya que la quema posterior fractura rápidamente los

calcretos, facilitando que aflore el agua que se mueve subsuperficialmente.

Finalmente, en esta porción del norte del Estado, donde se presentan estos escalonamientos basculados en las planicies, la gravedad hace que esas aguas fluyan hacia los sitios donde se presentan mínimos altitudinales locales (los llamados bajos) en los que al estar fracturada la capa superficial por la actividad antrópica, permite que el agua continúe su fluir superficialmente hacia las hondonadas, en las que se encuentran suelos más impermeables, como los Gleysols, produciendo inundaciones por “agua que surge del suelo”, en lugar de las típicas producidas por escurrimiento o precipitación.

Conclusiones

El trabajo refleja la importancia de contar con una buena base de datos en lo que se refiere a edafología, geología, geomorfología, hidrología y población en el manejo de este tipo de riesgos para la población en Quintana Roo.

Los escenarios de cambio climático usados presentan un incremento en la pluviosidad, incremento en frecuencia y volúmenes precipitados en verano y asociados a los huracanes para el caso de oscilación hacia un clima más húmedo e incremento en la cantidad de precipitaciones invernales y asociadas a nortes en el caso de tender hacia la aridización y un clima más extremo. En ambos casos el incremento en el volumen precipitado y las alteraciones en cuanto a su distribución temporal hacen suponer un incremento en la frecuencia de aparición de volúmenes mayores a las medias normales para la zona y por tanto mayor probabilidad de que se presente este fenómeno.

Se documenta un proceso de inundación compuesto por pequeños fenómenos reportados anteriormente en forma independiente y que da origen a una forma de inundación que no se había documentado, al menos para Quintana Roo, que es la inundación súbita por afloramiento o inundación por aguas subterráneas.

Se obtuvo un mapa base de peligros de inundación susceptible de usarse como base en la construcción de un modelo dinámico que permita la simulación de los procesos, mismo que se está elaborando y alimentando con la información disponible.

Con base en el mapa de peligros de inundación presentado y los datos históricos de precipitaciones extremas ligadas particularmente al paso de huracanes, se puede estimar que la población afectada por estos peligros es de alrededor de 15,000 habitantes, distribuidos en poco más de 45 asentamientos principalmente.

Con la información actualmente disponible es posible construir un modelo para definir estas zonas de inundación y su comportamiento, el cual puede ser una herramienta útil en las dependencias ligadas a Protección Civil, para reducir los peligros a los que está expuesta la población del Estado.

Finalmente, a modo de reflexión, es necesario indicar la necesidad de mejorar y afinar el modelo, hacer más específica la información y a mayor escala con el fin de construir una herramienta más robusta para su uso en planeación del desarrollo y en las actividades de Protección Civil.

Agradecimientos

Se agradece al proyecto FOMIX-UQROO-2011-2 cuyo equipamiento fue usado en parte del trabajo de campo y colecta de datos, así como el procesamiento posterior de los mismos, al Proyecto del Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático (PEACC) por las facilidades otorgadas para el uso de una parte importante de la información base. Igualmente se agradecen los comentarios y sugerencias hechos por los revisores para mejorar el manuscrito original, así como el invaluable apoyo del Dr. Luis Delgado Argote en la parte de edición.

Referencias

- Amendola, A., 2004, Management of change, disaster risk, and uncertainty: an overview. *Journal of Natural Disaster Science*, 26(2), 55–61.
- Apel, H., Thieken, A. H., Merz, B., Blöschl, G., 2004, Flood risk assessment and associated uncertainty. *Natural Hazards and Earth System Science*, 4(2), 295–308.
- Aven, T., 2008, Risk analysis: assessing uncertainties beyond expected values and probabilities. Chichester, England ; Hoboken, NJ: Wiley.
- Bautista Zúñiga, F. y Palacio, A. G., 2005, Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. Campeche, Camp; Mérida, Yuc; México: Universidad Autónoma de Campeche: Universidad Autónoma de Yucatán: Instituto Nacional de Ecología].
- Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., Wisner, B., 2014, At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters. Routledge. https://books.google.com.mx/books?hl=en&lr=&id=4M6AAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=modern+natural+risk+management&ots=xkz7190_id&sig=LZpMTaxWmVvsHJWOnv2qFzo9CvM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Bonacci, O., Ljubenkov, I., Roje-Bonacci, T., 2006, Karst flash floods: an example from the Dinaric karst (Croatia). *Natural Hazards and Earth System Science*, 6(2), 195–203.
- Campos, M., Velázquez, A., McCall, M., 2014, Adaptation strategies to climatic variability: A case study of small-scale farmers in rural Mexico. *Land Use Policy*, 38, 533–540. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.12.017>
- Cardona, O. D., 2003, The need for rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: a necessary review and criticism for effective risk management. *Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People*, 17.
- Cavazos, M. T. P. (Ed.), 2015, *Conviviendo Con La Naturaleza* (1st ed.). México, D.F. Ensenada, B.C., México: INECC. http://www.researchgate.net/profile/Tereza_Cavazos/publication/281375691_Conviviendo_con_la_Naturaleza_El_problema_de_los_desastres_asociados_a_fenmenos_hidrometeorologicos_y_climticos_en_Mxico/links/55e47e3108ae6abe6e902813.pdf
- CENAPRED, 2009, Inundaciones. CENAPRED-SG.
- Conde Álvarez, A. C., Gay García, C., 2008, Guía para la Generación de Escenarios de Cambio Climático a Escala Regional, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.
- Costanza, R., 2001, Visions, Values, Valuation, and the Need for an Ecological Economics: All scientific analysis is based on a “preanalytic vision,” and the major source of uncertainty about current environmental policies results from differences in visions and world views. *BioScience*, 51(6), 459–468.
- D.O.F., 2012, Programa de Ordenamiento Ecológico Marino y Regional del Golfo de México y Mar Caribe, Diario Oficial de la Federación 292.
- Fragoso Servón, P., 2015, Análisis espacial de los suelos de Quintana Roo con un enfoque Geomorfoedafológico, Tesis Doctorado, Universidad de Quintana Roo, Chetumal, México.

- Fragoso-Servón, P., Bautista, F., Frausto, O., Pereira, A., 2014, Caracterización de las depresiones kársticas (forma, tamaño y densidad) a escala 1: 50,000 y sus tipos de inundación en el Estado de Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 31(1), 127–137.
- Frausto, O. e Ihl, T., 2008, Capítulo 2, Mapa de Formas Exocársticas del Norte de Quintana Roo a escala 1: 50000. En: *Estudio Geohidrológico del Norte de Quintana Roo, México* (pp. 41–54). <http://biblioteca.coqcyt.gob.mx/bvic/Captura/upload/.../ESTUDIO-GEOHIDROLOGICO-LIBRO.pdf#page=41>
- Frausto, Oscar y Thomas Ihl, comunicación personal 2014, Mapa de Fallamientos y Fracturas en Quintana Roo. Cozumel, Q. Roo, México.
- García, E., 2012, Distribución de la precipitación en la República Mexicana. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía*, (50). <http://132.247.146.34/index.php/rig/article/download/30432/28253>
- Golicher, J. D. and Morales, J., 2004, Correlations between precipitation patterns in the state of Chiapas and the El Niño sea surface temperature index. 2004), *El Agua En La Frontera México-Guatemala-Belice*, San Cristobal de Las Casas, Chiapas, El Colegio de La Frontera Sur.
- Hughes, A. G., Vounaki, T., Peach, D. W., Ireson, A. M., Jackson, C. R., Butler, A. P., Bloomfield, Finch, J., Wheeler, H. S., 2011, Flood risk from groundwater: examples from a Chalk catchment in southern England. *Journal of Flood Risk Management*, 4(3), 143–155.
- INEGI. (2000). *Cartas Geológicas 1:250000. Vector Data*, México, D.F.: INEGI.
- INEGI. (2013). *Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0)*. Electronic, Aguascalientes, México: INEGI.
- Jourde, H., Lafare, A., Mazzilli, N., Belaud, G., Neppel, L., Dörfliger, N., Cernesson, F., 2014, Flash flood mitigation as a positive consequence of anthropogenic forcing on the groundwater resource in a karst catchment. *Environmental Earth Sciences*, 71(2), 573–583.
- Kreibich, H. and Thieken, A. H., 2008, Assessment of damage caused by high groundwater inundation: Assessment of Damage Caused by High Groundwater. *Water Resources Research*, 44(9), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2007WR006621>
- Kundzewicz, Z. W. and Takeuchi, K., 1999, Flood protection and management: quo vadimus? *Hydrological Sciences Journal*, 44(3), 417–432.
- Lerer, S., 2008, Estimation of actual evapotranspiration using remote sensing data for the Yucatan Peninsula, Mexico (M.Sc. Thesis). Technical University of Denmark.
- Magaña, V., Amador, J. A., Medina, S., 1999, The midsummer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 12(6), 1577–1588.
- Messner, F. and Meyer, V., 2006, Flood damage, vulnerability and risk perception—challenges for flood damage research. Springer. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-4598-1_13

- Orellana, R., Espadas-Manrique, C., Conde, C., Gay-García, C., 2009, Escenarios de Cambio Climático en la Península de Yucatán. (1st ed.). Mérida, Yucatán: Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. <http://www.cicy.mx/libros-en-venta/atlas-escenarios-de-cambio-climatico-en-la-peninsula-de-yucatan>
- Pereira C., A., Prezas H., B., Olivares M., J. A., Fragoso S., P., Niño T., C. A., 2013, Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático (Quintana Roo) - Statewide Program of Action on Climate Change (Quintana Roo) (Alessio Zanier Visintin, Trans.) (1st ed.). Quintana Roo, México: Universidad de Quintana Roo.
- Petrişor, A. I., 2011, GIS-based assessment of the distribution of 2100 predicted changes of precipitations and influence on biodiversity and natural protected areas in Romania. *Studia Universitatis Vasile Goldis, Life Sciences Series*, 21(2), 389-398. Plate, E. J., 2002, Flood risk and flood management. *Journal of Hydrology*, 267(1), 2–11.
- Priego Santander, Á., Bocco, G., Mendoza, M. E., Garrido, A., 2010, Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisajes (1st ed.). México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología. <http://books.google.es/books?id=VaoA4Tg6mYEC>
- Robins, N. S. and Finch, J. W., 2012, Groundwater flood or groundwater-induced flood? *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 45(1), 119–122.
- Sayers, P., Y. L.i, G. Galloway, E. Penning-Rowsell, F. Shen, K. Wen, Y. Chen, T. Le Quesne. 2013. Flood Risk Management: A Strategic Approach. Paris, UNESCO. <https://openaccess.adb.org/handle/11540/81>
- Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E., Fedick, S. L., Gama-Castro, J., Palacios-Mayorga, S., Vallejo Gómez, E., 2007, Soil genesis in relation to landscape evolution and ancient sustainable land use in the northeastern Yucatan Peninsula, Mexico. *Atti Soc. tosc. Sci. nat. Mem. Serie A*, 112, 115–126.
- Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E., Fedick, S. L., Pi-Puig, T., Vallejo-Gómez, E., de Lourdes Flores-Delgadillo, M., 2008, Micromorphology of a soil catena in Yucatán: pedogenesis and geomorphological processes in a tropical karst landscape. In *New Trends in Soil Micromorphology* (pp. 19–37). Springer. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-79134-8_3
- Tejeda-Martínez, A., Conde Álvarez, Conde Álvarez, L., García López, T., Guadarrama Oliveira, M. E., Gutiérrez Bonilla, A., López Flores, E., Magaña Rueda V., Ochoa Martínez, C.A., Salas Cisneros, G. V., Salazar Lizán, S., Welsh Rodríguez, C.M., 2008, Guía para la elaboración de Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático (PEACC). http://www2.inecc.gob.mx/sistemas/peacc/descargas/guias_prog_est.pdf
- UQRoo (Universidad de Quintana Roo), 2000, Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la Zona Continental de Isla Mujeres (Reporte Técnico) (p. 174). Quintana Roo, México: Universidad de Quintana Roo.
- UQRoo (Universidad de Quintana Roo), 2004, Programa Estatal de Ordenamiento Territorial (Reporte Técnico) (p. 3987). Quintana Roo, México: Universidad de Quintana Roo.

Vörösmarty, C. J., Bravo Guenni, L., Wollheim, W. M., Pellerin, B., Bjerklie, D., Cardoso, M., D'Almeida, C., Green, P., Colon, L., 2013, Extreme rainfall, vulnerability and risk: a continental-scale assessment for South America. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(2002), 20120408. <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0408>

Manuscrito recibido: 25 enero de 2016

Recepción del manuscrito corregido: 20 enero de 2017

Manuscrito aceptado: 25 enero de 2017

Carbonatos secundarios en las calcretas del noreste de la península de Yucatán: formas, procesos e implicaciones en la pedogénesis de geosistemas cársticos.

Cabadas-Báez Héctor Víctor¹, Jorge Federico Landa-Arreguín², Sergey Sedov³, Elizabeth Solleiro-Rebolledo³

¹Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México. 50110, Toluca, Edo. México, México.

hvcabadasb@uaemex.mx

²Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México. 04510, Ciudad de México, México.

yicckko@hotmail.com

³Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. 04510, Ciudad de México, México.

serg_sedov@yahoo.com; solleiro@geologia.unam.mx

Resumen

Las calcretas o caliches de la península de Yucatán son interpretadas por el registro sedimentario, como evidencias de exposición subaérea durante los períodos de emersión de la plataforma carbonatada. Es necesario realizar investigaciones enfocadas en la pedogénesis y otros procesos implicados (disolución y recristalización de carbonatos, así como la participación de los factores bióticos). Se estudiaron calcretas en secuencias carbonatadas litorales del noreste del estado de Quintana Roo, México (en canteras localizadas en el corredor Cancún-Tulum), las cuales se derivan de facies marinas someras y eolianitas. Las evidencias que brinda la micromorfología, como son las huellas de raíces, los relictos de estructura microgranular, e inclusive, la presencia de carbonatos aciculares (típicos de ambiente edáficos y el crecimiento de hongos) se apoyan en los valores de isótopos estables de C y O, particularmente para $\delta^{13}\text{C}$, los cuales son muy negativos para las calcretas (lo que corresponde con carbonatos pedogénicos precipitados en un ambiente de plantas tipo C3) en contraposición a las facies de calcarenitas-eolianitas que presentan valores positivos. La propuesta de que las calcretas son el derivado de procesos de formación de suelo, más que de diagénesis subaérea, necesita una mayor revisión, sobre todo, enmarcándola en el desarrollo de la edafogénesis en paisajes cársticos y en los modelos de cambios ambientales dados durante el Cuaternario tardío en las costas del Mar Caribe.

Abstract

The calcrete or caliche from the Yucatan peninsula is interpreted, from the sedimentary record, as evidence of subaerial exposition during uplifting periods of the carbonate platform. Future research need to focus in pedogenesis and other involved processes (dissolution and recrystallization of carbonates and biotic factors added). Calcretes were studied in quarries located in the Cancun-Tulum corridor in littoral carbonates sequences from the northeast of the Quintana Roo state, Mexico, which are derived from shallow marine and eolianites facies. Evidences provided by micromorphology, root traces, microgranular relict structure and even, acicular carbonate crystals (typical for soil and fungi environment) are supported by stable isotopic signatures of C and O, particularly for $\delta^{13}\text{C}$, which are markedly negative in the calcretes (corresponding to pedogenic carbonates precipitated in a C3 plant environment) opposite to calcarenite-eolianite facies showing positive values. The proposal that the calcretes are the result of soil formation processes, greater than subaerial diagenesis, needs a review in the context of edaphogenesis in karstic landscapes and models of environmental change during the Late Quaternary in the Caribbean sea coasts.

Palabras clave: calcreta, carbonatos secundarios, pedogénesis, micromorfología, península de Yucatán, isótopos estables de C y O.

Introducción

Los carbonatos pedogénicos son los depósitos de carbonatos secundarios precipitados en el suelo (Lal et al., 2000; Verrecchia, 2011). Diversos procesos están involucrados en la formación de dichos carbonatos, siendo dos los que resaltan: 1) la lixiviación de carbonatos primarios (aquellos formados por precipitación directa en ambientes acuosos o por fijación en estructuras biogénicas) a través del perfil de suelo (en los horizontes superiores, los carbonatos primarios son disueltos por el CO_2 enriquecido en agua y desplazados en solución a los horizontes más profundos donde precipitan) y 2) la transformación en ambientes superficiales de minerales primarios donde el ejemplo clásico es el intemperismo de los feldespatos por el enriquecimiento de CO_2 que lleva a la disolución de los iones de calcio y de bicarbonato. El desplazamiento en el equilibrio de las reacciones de las soluciones del suelo (Deutz et al., 2001) genera diversidad en las morfologías de carbonatos, incluyendo cementantes, películas de calcita asociada con poros (rasgos relacionados a desecación del suelo y/o succión de las raíces) e impregnaciones en la matriz por cristales de diversos tamaños (desde esparita hasta micrita).

La presencia de “calizas en forma de lajas” de estructura compacta ha sido reportada a lo largo de diversos afloramientos de la península de Yucatán, subyaciendo directamente a los suelos tipo Rendzina o Leptosoles, de los cuales se asume como su material parental. De manera genérica se ha denominado a dichas “lajas” o “costras” como calcretas o caliches, las cuales son importantes debido a su amplia distribución en ambientes continentales y por registrar información paleoambiental de los regímenes tectónicos, climáticos y sedimentarios donde se han desarrollado (Alonso-Zarza y Wright, 2010). Si bien su origen pedogénico ha sido ampliamente estudiado desde trabajos ya clásicos (Gile et al., 1966; Goudie, 1973; Machette, 1985), en la actualidad se considera que dicha génesis no es restrictiva, debido al vínculo que puede tener

con mantos freáticos someros, e incluso, con ambientes palustres (Wright y Tucker, 1991; Alonso-Zarza y Wright, 2010).

No obstante el amplio conocimiento que se tiene en la actualidad sobre la “ingeniería” de los carbonatos pedogénicos, los equilibrios físicoquímicos propuestos se mantienen fundamentalmente en la teoría y no incorporan del todo las complejidades encontradas en campo. La cinética de los sistemas carbonatados depende de muchos factores: difusión del CO_2 , relación porosidad-agua en presencia de iones específicos (como el Mg o P) e incluso y actividad biótica (biomineralización) (Wright, 1994; Alonzo-Zarza y Jones, 2007).

Independientemente de los procesos mencionados, los factores primarios clave para la acumulación de carbonatos en el suelo son los condicionados por climas áridos, semiáridos o subhúmedos (Monger, 2002). Birkeland (1999) sugiere que los carbonatos en suelo están presentes a partir de una tasa de precipitación anual menor a 500 mm.

En particular, la península de Yucatán representa la porción de una extensa plataforma carbonatada expuesta a los factores de formación del suelo, desde su emersión progresiva a partir del Cretácico. La gran variedad de suelos de la región y sus características físicas, químicas, biológicas y mineralógicas ha sido ampliamente discutida a lo largo del siglo XX e inicios del XXI (Aguilera, 1959; Quiñones, 1975; Isphording, 1978; Duch, 1991; Bautista et al., 2004). Sin embargo, los mecanismos de transformación de carbonatos no son del todo tratados, debido a la opinión persistente de que los procesos de disolución son los dominantes. La abundancia de geoformas cársticas apoya dicha hipótesis.

Quiñones y Allende (1974), consideran a las calcretas de la península de Yucatán como producto de una diagénesis tardía, debido a la transformación de aragonita en calcita. Ward (1985) y Schinle (1991) sugieren que

son el producto de diagénesis subaérea, formadas principalmente desde el Pleistoceno. Schinle (1991) propone, para las calcretas más superficiales, edades entre 35 y 19 ka A.P.

El objetivo de este trabajo es estudiar las neoformaciones de carbonatos en las calcretas mediante micromorfología, mineralogía e isótopos estables de C y O, tratando de esclarecer su génesis. El diferenciar los procesos que se dan en las calcretas, asociados a la pedogénesis, es una parte esencial del conocimiento de la Zona Crítica (National Research Council Committee on Basic Research Opportunities in the Earth Sciences, 2001) en regiones tan dinámicas y sensibles como las cársticas.

Materiales y métodos

Características del sitio de estudio

La península de Yucatán es una plataforma carbonatada que se mantuvo bajo el nivel del mar durante el Cretácico y parte del Terciario temprano. Está formada por una gruesa secuencia sedimentaria que sobreyace a un basamento cristalino del Paleozoico. Sus geoformas definen una plataforma relativamente plana, con altitudes que varían entre 25 y 35 m con la presencia de numerosas y variadas depresiones cársticas (Lugo-Hubp et al., 1992). Durante el Cuaternario, la plataforma comenzó a emerger. En consecuencia, los sedimentos costeros se restringieron a sus regiones periféricas, delineando la actual configuración de la península. En la región este, en el estado de Quintana Roo, Lauderdale et al. (1979) definieron en los carbonatos del Pleistoceno tres unidades estratigráficas, basándose en la presencia de calcretas. Cada unidad consta de diversas facies marginales de plataforma acumuladas durante las variaciones del nivel del mar asociadas a periodos glaciales e interglaciales. Ward (1985) sugiere edades que oscilan entre 800 y 200 ka A.P. basándose en edades registradas en corales. La unidad más reciente corresponde al Pleistoceno

superior y se trata de una caliza tipo grainstone pobremente consolidada, con un espesor de 3-10 m, que representa una secuencia progradacional de zona de rompiente inferior (lower shoreface) a depósitos de playa. Las estructuras sedimentarias típicas (en orden estratigráfico) son: (a) laminación cruzada de bajo ángulo con evidencias de depósitos retrabajados de tormenta, dominada por calizas tipo grainstone ricas en restos de Halimeda y moluscos; (b) una unidad intermedia con laminación cruzada de ángulo alto (multidireccional) compuesta primordialmente de grainstone y rudstone oolíticos con restos de Halimeda y moluscos; (c) una unidad superior de laminación paralela compuesta por calizas tipo grainstone con ooides bien clasificados, cubierta por una gruesa capa de calcreta a la cual sobreyace un suelo tipo Leptosol Rendzico. En particular, la unidad superior está cortada por diferentes elementos cársticos (rasgos de karren, principalmente) de diferente tamaño y configuración, frecuentemente rellenos con pedosedimentos (Cabadas-Báez et al., 2010; Solleiro-Rebolledo et al., 2015).

El clima es cálido a subhúmedo, con una temperatura media anual de 26°C y precipitación anual de 1234 mm. La temperatura y precipitación más altas son durante la temporada de julio-agosto, con una mínima de 28°C y una precipitación de 572 mm (García, 1988). La mayor parte del año, el balance de agua muestra que la evaporación es mayor (1500-1800 mm) que la precipitación, por lo que la captación de agua es muy limitada, lo que genera un déficit de agua de varios meses al año (Cabadas-Báez et al., 2010). No obstante, grandes cantidades de agua puede estar presentes en la superficie de junio a octubre (principalmente de agosto a septiembre) cuando los huracanes y las tormentas tropicales golpean las costas (Atallah y Bosart, 2003; Jáuregui, 2003).

Estratigrafía local y muestreo

Dos secciones localizadas en canteras a lo largo del corredor Cancún-Tulum, fueron descritas y muestreadas a detalle: Cantera Delta (N 20° 24' 32.9"; W 87° 19' 46.1") y Cantera 4 (N 20° 44' 27.1"; W 86° 59' 56.2") (Figura 1). Se seleccionaron dichas canteras debido a su fácil acceso y a lo completo de los cortes mostrando la secuencia estratigráfica de eolianitas y calcretas. Fue realizada la descripción de cada

unidad estratigráfica correlacionando con los detalles brindados por Ward (1985). Tanto los sedimentos endurecidos como los deleznales y sus transiciones fueron muestreados para análisis geoquímicos y secciones delgadas inalteradas. Los caliches fueron seccionados en cortes transversales y longitudinales a fin de observar detalles meso y micromorfológicos. En la descripción de los caliches se siguieron las propuestas de Klappa (1983) y Wright et al. (1995).

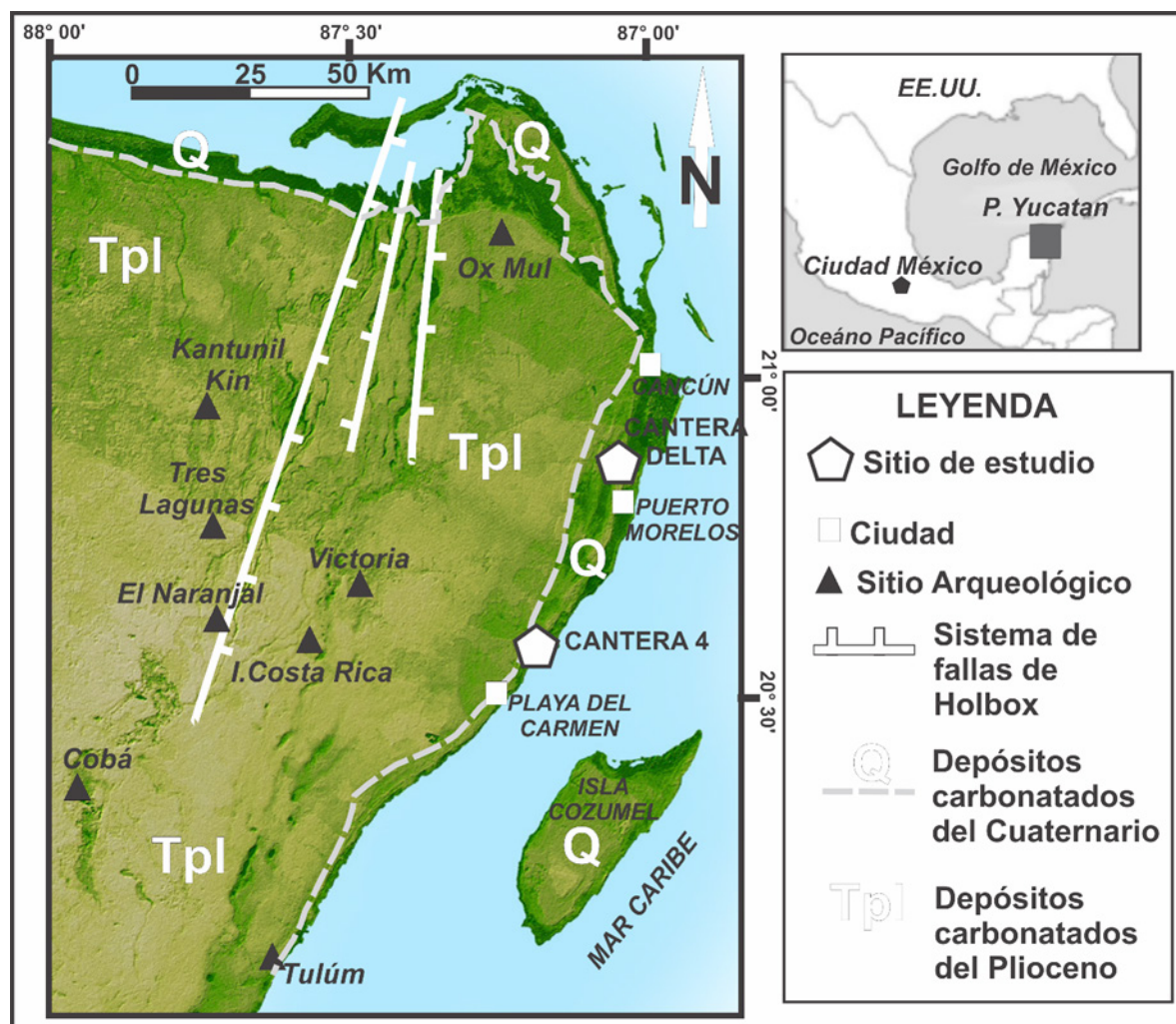


Figura 1. Ubicación de los sitios de estudio y del contexto geológico regional.

La Cantera Delta es la sección más completa y donde puede observarse la secuencia estratigráfica en su mayor parte (Figura 2a). En este lugar, la base de la secuencia está compuesta por un segundo nivel de calcreta (calcreta inferior, Figuras 2b y 2c), el cual asumimos que corresponde a la parte superior de la unidad descrita como del Pleistoceno Medio por parte de Ward (1985). Sobreyaciendo a la calcreta se encuentra una secuencia de calcarenitas, mostrando algunas facies asociadas a etapas transgresivas durante el Pleistoceno tardío (Ward, 1985). La secuencia de calcarenitas incluye facies lagunares y de corales (no laminadas y con grandes cantidades de

bioclastos, así como conglomerados compuestos por litoclastos de calcreta, restos de corales y de conchas de organismos. Sobreyaciendo a las calcarenitas, se observa una facies de sedimentos más finos con estratificación cruzada a los cuales Ward (1985) denominó eolianitas. La parte superior de la secuencia termina con la presencia de una calcreta que subyace directamente a los Leptosoles Rendzicos. La calcreta está afectada por fracturamiento y procesos de carstificación que generan “bolsas rellenas con pedosedimentos” que cortan hasta la secuencia de eolianitas (Cabadas-Báez et al., 2010).

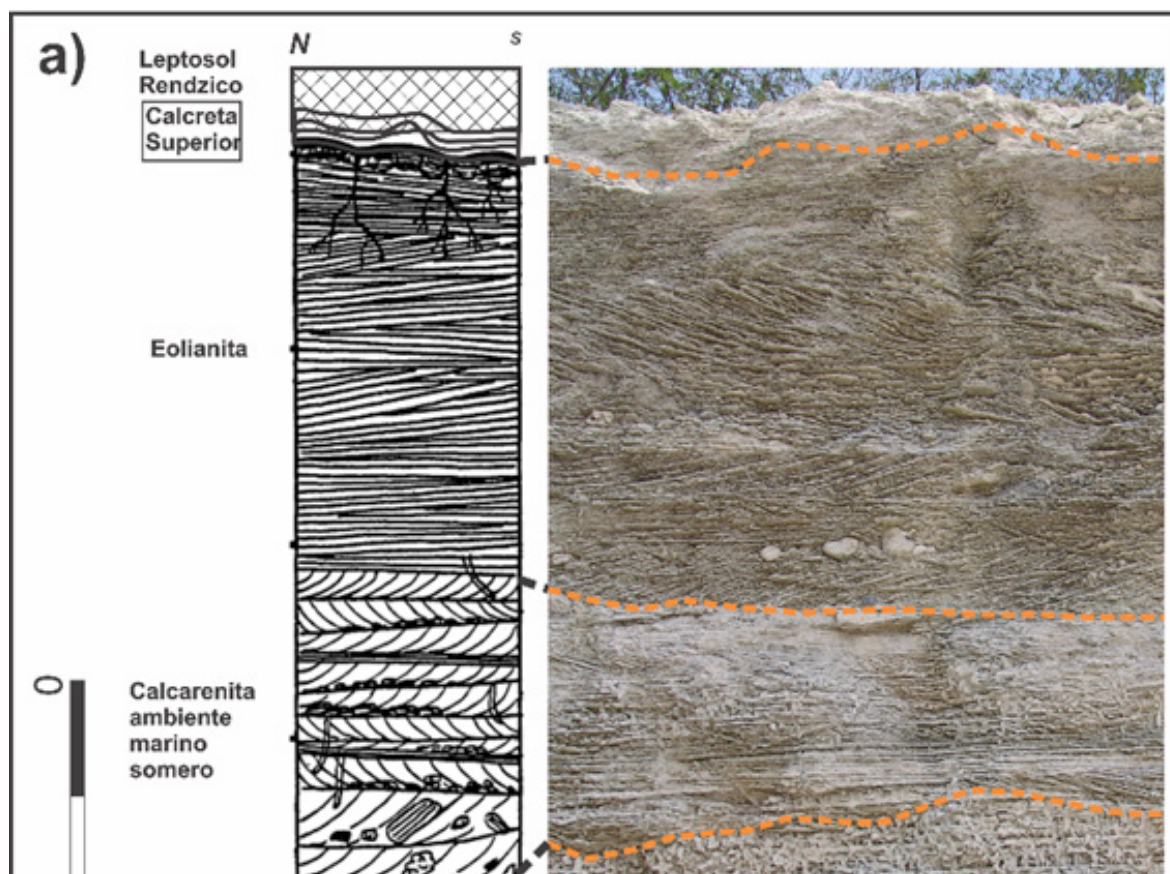


Figura 2. Sitio Cantera Delta.

- a) Columna estratigráfica con la ubicación de los horizontes de calcreta o caliche (modificada de Ward, 1985).
- b) Morfología general de la Calcreta inferior.
- c) Detalle de trazas de raíces en corte interno de la Calcreta inferior.

La sección de la Cantera 4 contempla la calcarenita con facies lagunares y parte de la eolianita sobreyacente, la cual está cubierta por el nivel de calcreta más superficial, la cual se subdivide en dos zonas, debido a las diferencias morfológicas (Figura 3a y 3b). La calcreta, en lo general, se encuentra parcialmente fragmentada y las “bolsas de disolución” cortan zonas más profundas de la secuencia y están rellenas con pedosedimentos. Se muestreó la calcreta de la base de la “bolsa” (denominada “zona de recrystalización”) en contacto con la eolianita, donde se reconoció un área donde los carbonatos cambian a un color pardo oscuro y su estructura se percibe masiva y firme, en contraste con la eolianita que es más deleznable y con estructuras de laminación cruzada de bajo ángulo. Se tomaron muestras de la eolianita para realizar comparaciones.

Análisis de laboratorio

Las secciones delgadas fueron preparadas de las calcretas previamente seleccionadas para describir sus características. Por ejemplo, laminaciones impregnadas con resina (MC-40) y pulidas hasta un espesor de 30 μ . Las descripciones petrográficas fueron realizadas siguiendo la terminología de Wright y Alonso-Zarza (1990).

La mineralogía fue determinada por difracción de rayos X en muestras totales en polvo. Se usó un difractómetro Shimadzu XRD-6000 equipado con tubo de Cu y monocromador de grafito.

Para las determinaciones de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ se utilizaron métodos de combustión de rutina (Sofer, 1980; Mook y Longsma, 1987), así como un espectrómetro de masas de triple colector

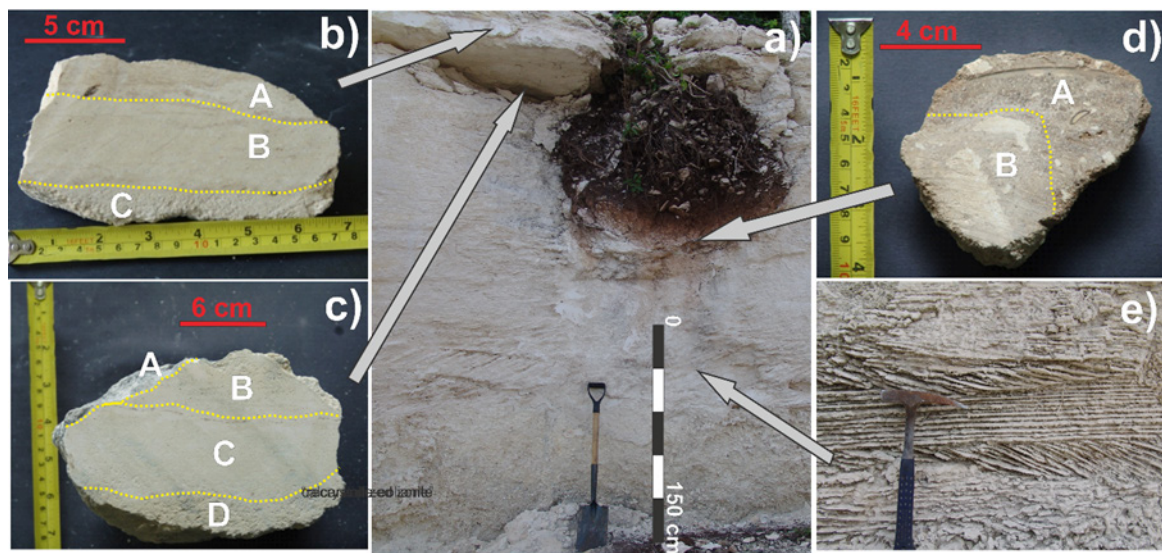


Figura 3. Sitio Cantera 4.

- a) Vista general de la sección, mostrando la “bolsa” rellena de pedosedimentos y calcreta.
- b) Morfología Cantera superficial (0-9 cm profundidad)
- c) Morfología Cantera superficial (9-22 cm de profundidad)
- d) Zona de “recrystalización”, en el contacto entre la región inferior de la “bolsa cársica” y la eolianita.
- e) Detalle de laminación cruzada en eolianita (140-210 cm de profundidad).

(Finnigan MAT250). Cada lote de muestras fue acompañado por materiales de referencia: 8540 PEF-1 (polietileno), 8539 NBS-22 (aceite) y 8242 Sucrose ANU (sucrosa) del NIST. La incertidumbre del método analítico es de $0.1^0/_{00}$

Resultados e interpretaciones preliminares

Morfología

La calcreta en la base de la sección Cantera Delta tiene un espesor de 40-50 cm, al menos en la región que aflora (no fue posible registrar el material subyacente debido a lo compacto y endurecido del material). El contacto con la calcarenita sobreyacente es abrupto. En cortes verticales al espesor de la capa de calcreta, en su parte interna (Figuras 2b y 2c), es posible diferenciar laminaciones continuas de color pardo oscuro, concentradas en la parte superior en sus primeros dos centímetros. Dichas laminaciones fueron designadas en orden creciente de profundidad como A, B y C; el resto del cuerpo de la calcreta es masivo y con un color pardo claro, subdividido en dos regiones más, D y E. Los límites de las laminaciones superiores son claros y con un contacto abrupto entre sí. No obstante, la tendencia en la laminación intermedia (B) es formar lentes con un límite ondulado y discontinuo que incluyen bioclastos muy fragmentados. Las regiones más profundas de la calcreta presentan moteados y pseudolaminaciones discontinuas en colores pardos pálidos, mientras que la matriz, que incluye fragmentos de conchas es de color blanco-amarillento. En algunas secciones verticales adicionales son distinguibles trazas de raíces vermiformes (Figura 2c).

En el sitio Cantera 4 (Figura 3), el espesor total de la calcreta superficial es de 45 cm, subdividido en dos horizontes, basados en la diferencia de color y dureza del material. El primero, ubicado en la parte superior, es de color pardo oscuro con pseudolaminaciones discontinuas con límites inferiores planos (Figura 3b, en la región A); en la parte media, el material es mucho más compacto

y su matriz es de color blanco-amarillento, similar a la calcarenita subyacente (Figura 3b, región B). El segundo horizonte presenta una estructura poco consolidada y desarrollo de rasgos cársticos incipientes (Figura 3b, región C).

El material ubicado en la “zona de recristalización”, en la base de la “bolsa de disolución”, está moderadamente endurecido, con una coloración no homogénea (Figura 3d). Presentan impregnaciones superficiales del material arcilloso que rellena a las fracturas, junto con materia orgánica pedogénica, además de fragmentos de la calcreta superficial y de la calcarenita subyacente.

Micromorfología

En general, las calcretas presentan granos esqueléticos que se encuentran total o parcialmente micritizados. Dichos granos están compuestos principalmente de foraminíferos y peloides. En particular, en las secciones observadas en el sitio Cantera 4 son distinguibles las laminaciones micríticas pardo oscuras discontinuas. Para autores como Alonso-Zarza y Jones (2007) dichas laminaciones pueden indicar episodios o zonas de colonización de raíces, aunque no de manera permanente (Figura 4a). Particularmente interesante es la región A de la calcreta inferior del sitio Cantera Delta, donde aún son observables relictos de una estructura granular (Figura 4b), descrita por Wright (1994) como una microfábrica alveolar.

La presencia de ooides es constante en todas las muestras. No obstante, las eolianitas exhiben la mayor proporción. El cementante carbonatado entre los ooides en algunos casos, presente como películas sobre bioclastos de foraminíferos y equinodermos (Figura 4d) muestra tres morfologías dominantes (micrítica, ecuanite y esparita), lo cual puede asociarse a la presencia de carbonato de Mg (Ward, 1985) (Figura 4c). Las eolianitas presentan calcita microcristalina en ooides con microesparita intersticial (Figura 4c).

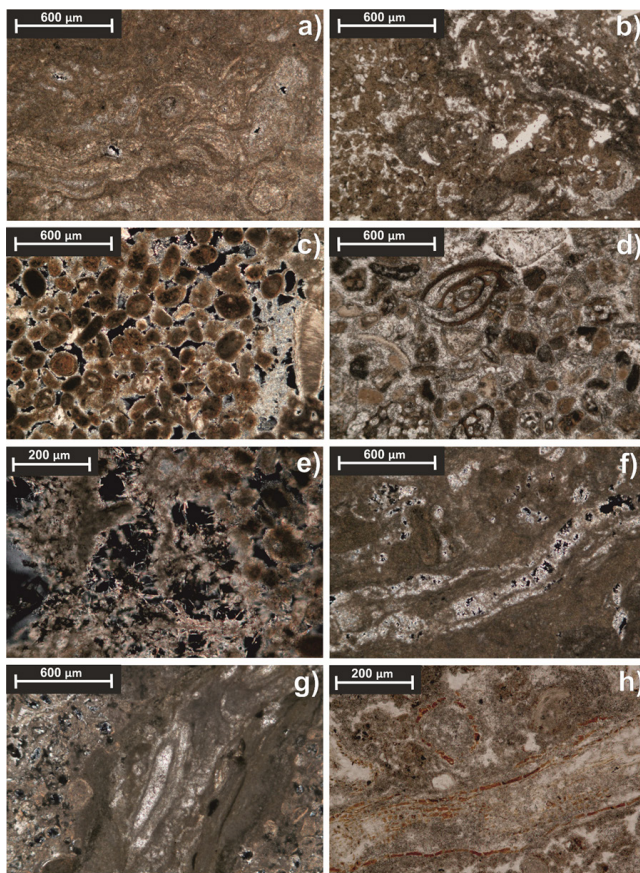


Figura 4. Micromorfología

a) Sitio Cantera 4, calcreta superior (profundidad: 0-2.3 cm), región A. Laminaciones pardo-oscuros micríticas, con una aparente estructura discontinua, asociada a la actividad biológica. Observación con nicoles cruzados (XPL).

b) Sitio Cantera Delta, calcreta inferior (profundidad: 270-270.4 cm), región A. Relictos de aparente estructura microgranular como evidencia del desarrollo de un horizonte de suelo orgánico. Observación con luz polarizada plana (PPL).

c) Sitio Cantera 4, Eolianita (profundidad 140 cm). Presencia de ooides micríticos con microesparita intersticial; parte de la microesparita recubre en forma de “películas” a los granos oolíticos. En la zona derecha de la fotomicrografía es posible observar un bioclasto con “puentes” de esparita. XPL.

d) Sitio Cantera 4, Calcreta superficial, regiones C-D (15-22 cm de profundidad). Vista general de los componentes del segundo nivel superficial de calcreta: presencia de ooides y estructuras de foraminíferos. PPL.

e) Sitio Cantera Delta, Calcreta inferior, regiones A-B (profundidad: 270-271.8 cm). Carbonatos aciculares relleno de zonas porosas. XPL.

f) Sitio Cantera 4, segundo nivel de calcreta superficial, región A (profundidad: 9-12 cm). Raíces calcificadas (estructuras laminares al centro de la fotomicrografía) con rellenos de esparita, el resto de la matriz es micrítica. XPL.

g) Sitio Cantera Delta, calcreta inferior, regiones C-D (profundidad 271.8-275.8 cm). Raíz calcificada; en el centro de la raíz se observa microesparita rodeada de una matriz micrítica y estructuras biológicas de apariencia “fluidal”. XPL.

h) Sitio Cantera 4, Zona “recristalizada”, región B (profundidad 145-150 cm). Raíces modernas penetrando relictos de la eolianita en contacto con pedosedimentos que rellenan la “bolsa” cárstica. La mayor parte de los carbonatos son micríticos. PPL

Particularmente interesantes son los carbonatos aciculares que rellenan zonas porosas entre los granos esqueléticos. Hábitos fibrosos menores a 10 μm pueden observarse entre los poros de microestructuras alveolares. Para autores como Verrechia y Verrechia (1994), los carbonatos de formas fibrosas pueden tener tanto un origen biogénico como inorgánico. Alonso-Zarza y Jones (2007) han sugerido que los mismos rasgos, observados en las islas Caimán, tienen un origen biogénico, relacionado con la actividad de los hongos. En general, los carbonatos fibrosos se encuentran mejor desarrollados en la calcreta de la Cantera Delta (Figura 4e), así como en los tejidos calcificados de raíces (Figura 4f y 4g).

En particular, los dos horizontes de calcreta correspondientes a los niveles superficiales de la Cantera 4 presentan el dominio de fábricas con peloides de micrita con canales y fisuras rellenos de microesparita. Zonas relictas de los componentes oolíticos de la eolianita fueron

recubiertos por micrita, lo cual genera “puentes” entre granos (Figura 4c).

Con respecto a la región de la Cantera 4, denominada “zona de recristalización” (Figura 4h), la influencia de los componentes de la eolianita es evidente a través de la presencia de bioclastos fragmentados y de ooides, afectados por la agregación de materia orgánica.

Mineralogía

Todas las muestras analizadas están compuestas mayoritariamente por calcita y aragonita; sin embargo, las proporciones varían. Las muestras de calcarenitas-eolianitas son las que se encuentran más enriquecidas en aragonita (Figura 5b), mientras que las calcretas presentan la menor proporción de dicho mineral y, en particular, la “zona de recristalización” (Figura 5d).

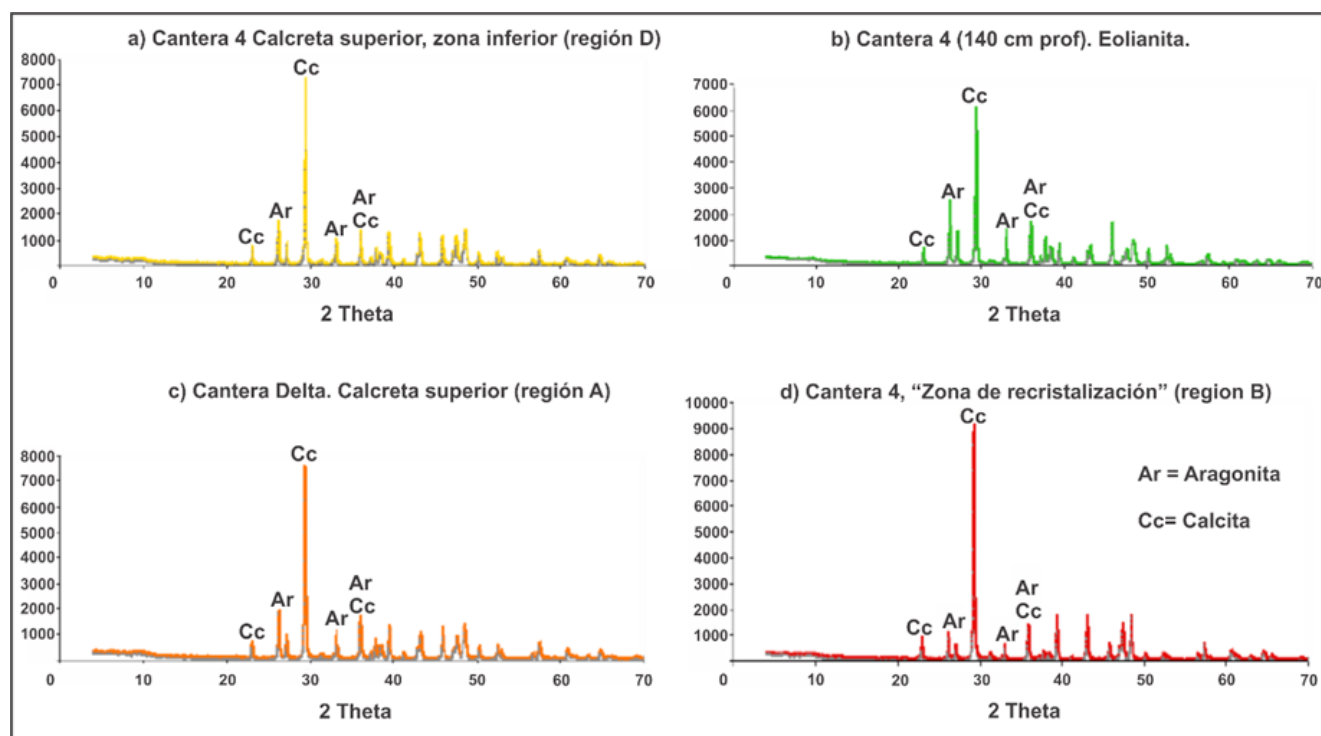


Figura 5. Difractogramas mostrando el dominio de calcita y aragonita en las muestras estudiadas.

Composición de isótopos estables de C y O

Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ tienden a ser homogéneos en todas las muestras analizadas. No obstante, los valores de $\delta^{13}\text{C}$ están fuertemente diferenciados. En las calcretas son mucho más negativos (hasta -10‰), mientras que en las eolianitas son positivos ($+2\text{‰}$) (Figura 6).

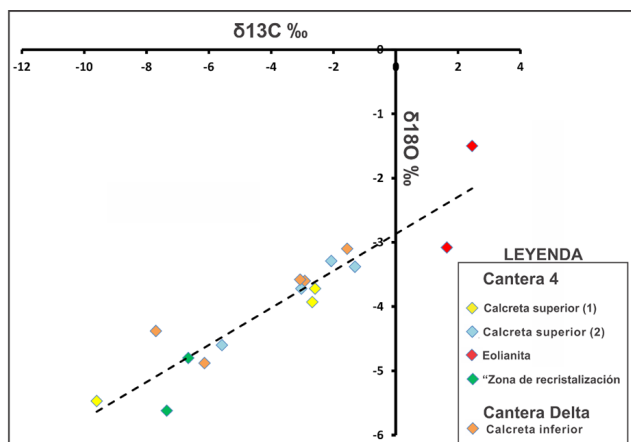


Figura 6. Gráfico $\delta^{13}\text{C}$ vs $\delta^{18}\text{O}$. Los isótopos estables de C y O han sido ampliamente utilizados en la geoquímica (los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$) para conocer las condiciones de formación de los sedimentos (ya que pueden reflejar aspectos como la temperatura de formación, presencia de fluidos en el sistema, mineralogía, pH de la solución y cinética de las reacciones) (McConnaughey, 2003). Las calcarenitas, compuestas por oolitos, tienden a presentar valores más positivos de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ debido a la influencia del agua marina. Por otro lado, la calcreta es producto de disolución y precipitación de carbonatos durante la exposición de la plataforma; en ese periodo, las pequeñas depresiones de la roca son colonizadas por algas y cianobacterias que, mediante la fotosíntesis, imprimen valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$ (la evaporación causa que el agua presente en la calcreta se enriquezca en ^{18}O generando valores positivos ocasionales de $\delta^{18}\text{O}$) (Swart, 2015).

Discusión y conclusiones

Carbonatos primarios contra carbonatos pedogénicos

Los carbonatos encontrados en suelos desarrollados sobre materiales calcáreos, presentan dificultades para su identificación, dado que persiste la duda de su origen: pedogénico o herencia de las rocas subyacentes. Los criterios para realizar un buen diagnóstico implican estudios de campo y evidencias de laboratorio (Monger, 2002).

De acuerdo a los rasgos observados en campo, tanto las calcretas masivas como las laminares son las dominantes en las secciones estudiadas. Según Alonso-Zarza y Wright (2010), las calcretas laminares pueden encontrarse en la parte superficial de los perfiles de calcreta, pero subyaciendo al suelo e interestratificadas en depósitos sedimentarios, como es el caso de las calcarenitas. La formación de estas calcretas ha sido ampliamente tratada (Verrecchia et al., 1995; Wright et al., 1996; Freytet et al., 1997; Alonso-Zarza, 1999), y se ha llegado al consenso de que deben ser interpretadas como rootcretas, rizocretas (Jones, 1992) o calcretas rizogénicas (Wright et al., 1995). Es ampliamente aceptado que el sistema de raíces, tanto vertical como horizontal, es determinantes en su formación. No obstante, cuando las calcretas se encuentran en la parte superior de las secuencias, otros organismos pueden estar operando, tales como las cianobacterias, bacterias, hongos y líquenes (Alonso-Zarza y Wright, 2010). Las estructuras generadas han llevado a identificaciones erróneas, relacionándolas con estromatolitos e incluso, con sedimentos laminados de origen lacustre (Servicio Geológico Mexicano, 2006a; 2006b).

Las evidencias petrográficas son muy claras: el dominio de rasgos asociados a huellas de raíces y hongos (calcita acicular) en la calcreta contra el dominio de bioclastos, peloides y ooides en la eolianita. Los relictos de una estructura

microgranular en la calcreta, particularmente observable en las muestras profundas de la Cantera Delta, son un punto a resaltar como evidencia de una antigua cubierta edáfica. Para Alonso-Zarza y Jones (2007), las laminaciones de micrita en la calcreta (Figura 2b, y 2c) también pueden estar asociadas a episodios en los que la actividad de las raíces fue posible; incluso, su morfología irregular y la generación de microdiscontinuidades puede atribuirse a fases de disolución (Wright, 1989). Las características típicas de la fábrica-beta descrita por Wright (1994) no son del todo claras en las calcretas laminadas. No obstante, la actividad biogénica puede quedar evidenciada por los carbonatos aciculares o fibrosos. Para el mismo autor, la preservación de carbonatos fibrosos indica una pedogénesis incipiente y/o formada bajo condiciones áridas a semiáridas.

Cuando las calcretas laminares se encuentran en la parte superior de un perfil o subyaciendo al suelo, su formación puede ser controlada por un manto freático somero o por películas finas de agua estancada en la superficie del suelo (Alonso-Zarza y Wright, 2010). Es muy común que las calcretas contengan esferulitas y rasgos relacionados con la calcificación de las algas y/o cianobacterias (Verrechia et al., 1995). Tanto los procesos bioquímicos, como los fisicoquímicos pueden contribuir a la litificación de la lámina, por ejemplo a través de la precipitación de micrita debido al incremento en la concentración de carbonato en el agua estancada o por capilaridad, aunque también se da la formación de estructuras no pedogénicas como la calcita esparítica gruesa en el cementante (Alonso-Zarza y Wright, 2010).

Los datos de los contenidos isotópicos son lo más significativo de nuestras interpretaciones. Existen diferencias claras entre las calcretas y las calcarenitas. Las calcarenitas presentan valores de $\delta^{13}\text{C}$ positivos, cercanos a $+2\text{‰}$, lo cual refleja claramente la influencia del agua marina con la formación de carbonatos primarios. En contraste, todos los horizontes de calcreta y sus

laminaciones presentan valores negativos (Figura 6), similares a la firmas obtenidas por Choquette (1976), Sanborn (1991) y Socki et al. (2004) en diferentes localidades a lo largo de la costa de la península, lo cual se asocia a la influencia de un ambiente terrestre. En dichas localidades, los valores de $\delta^{13}\text{C}$ se van haciendo más negativos, conforme se asciende estratigráficamente en las secciones, hasta llegar a los valores más bajos en las calcretas superficiales. Los valores de las laminaciones pardo oscuras en la calcreta inferior de la Cantera Delta son de entre -9.6‰ y -6.14‰ , lo que puede reflejar la contribución del CO_2 en el suelo y su interacción con la zona vadosa (Choquette, 1976).

El término calcreta y sus sinónimos, “caliche” y “cornstone” (Allen, 1960; Goudie, 1973), no son incluidos en las clasificaciones de suelo, ni en la designación de horizontes diagnóstico. No obstante, el IUSS Working Group (2015) considera a algunos tipos de calcreta como criterios de identificación en campo de horizontes petrocálcicos. Para autores como Wright y Tucker (1991) las calcretas pueden conformar un “subperfil” dentro del perfil de suelo; suelos como los Aridisoles, Vertisoles, Mollisoles y Alfisoles típicamente pueden contener calcretas. Si la interpretación de los caliches como producto de pedogénesis es correcta, esto implicaría realizar una revisión sobre la relación que guardan con los Leptosoles Rendzicos, Phaeozems e incluso Luvisoles de la península de Yucatán.

Las calcretas como registros paleopedológicos de cambios ambientales

La génesis de calcretas en el registro geológico-pedológico ha sido ampliamente discutida (Blank y Tynes, 1965; Aristarain, 1971; Goudie, 1973, 1996; Klappa, 1979, 1983; Wang et al. 1994; Tandon et al., 1998); varios modelos han sido propuestos para explicarla: (1) son consecuencia de la exposición de una superficie a condiciones subaéreas (Blumel, 1982; Esteban y Klappa,

1983); (2) se trata del producto de condiciones climáticas semiáridas-áridas (Goudie, 1983; Alonzo-Zarza, 2003); (3) representan periodos de desarrollo de superficies geomórficas estables (Machette, 1985); y/o (4) áreas no activas en sistemas aluviales (Wright y Alonzo-Zarza, 1990). No obstante, las calcretas no se encuentran restringidas a los climas áridos o semiáridos. Pueden hallarse en ambientes húmedos y semihúmedos donde los carbonatos pedogénicos persisten en el suelo.

Los análisis isotópicos en las calcretas laminares sugieren diferentes procesos en la formación de las láminas, los cuales pueden ser el resultado de diferencias en las condiciones climáticas. Según los trabajos de Alonzo-Zarza y Wright (2010) las calcretas masivas micríticas presentan los valores de carbono y oxígeno más pesado lo cual indica condiciones de mayor aridez. Las calcretas laminares con estructuras alveolares-septales presentan carbono más ligero, el cual se interpreta como indicador de una densa cubierta vegetal en un clima menos árido.

Por su parte, los modelos de secuencias de eolianitas-paleosuelos de Bermuda y las Bahamas (Stearns, 1974), así como del sur de Australia (Warren, 1983), pueden brindar un marco conceptual para entender la formación de calcretas en el noreste de la península de Yucatán. Dichos modelos plantean que la formación de eolianitas se dio durante o inmediatamente después del ascenso del nivel en el interglacial. Posteriormente, al estabilizarse la plataforma, ya emergida, se inicia la pedogénesis. Este modelo es reforzado por las observaciones de Ward (1985) y Heraud (1996), quienes describen tres diferentes niveles de calcretas, encontrados en canteras a lo largo del corredor Cancún-Tulum y en la costa de Campeche, las cuales se pueden asociar a tres ciclos interglaciales, aunque para ellos es necesario contar con fechamientos instrumentales.

La mecánica compleja de la calcretas sobre materiales carbonatados

Las calcretas de la costa este de la península de Yucatán pueden ser el resultado de la “agradación” continua de la pedogénesis, en la cual, la relación entre la tasa de sedimentación y el desarrollo de la calcreta genera resultados en diferentes etapas (Leeder, 1975; Wright y Marriott, 1996). Estudios de calcretas de diversos periodos geológicos (Watts, 1978) han revelado las interacciones existentes entre pedogénesis, sedimentación episódica y erosión. Dicha dinámica queda impresa a escala de horizontes-perfiles (decímetros a metros) e incluso, en escala más pequeña, como en las láminas individuales (milímetros a centímetros) (Alonzo-Zarza y Silva, 2002).

El grado de desarrollo (morfología y espesor de la calcreta) dependerá del tiempo que el sistema reticular se mantuvo en el suelo en las regiones superficiales (Alonzo-Zarza y Wright, 2010). En ciertos periodos de la historia ambiental de la costa de Quintana Roo, la tasa de erosión ha excedido a la de sedimentación, por lo que la parte superior del perfil de calcreta pudo ser removido (Cabadas-Báez et al., 2010) y los diferentes horizontes laminares o masivos quedaron expuestos directamente a la atmósfera, reiniciando nuevos procesos de disolución-evaporación-precipitación de carbonatos, obliterando los rasgos de formación de etapas anteriores.

Para Alonzo-Zarza y Wright (2010) la dinámica de los perfiles de calcretas sobre sustratos carbonatados es una materia compleja que aún necesita mayor investigación. Algunos trabajos como los de Davies (1991) y Sattler et al. (2005) registraron las diferencias microtopográficas que pueden encontrarse lateralmente. Para autores como Budd et al. (2002) los rasgos de desarrollo de las calcretas no necesariamente se encuentran asociados con la duración de la exposición subaérea. Estas últimas investigaciones sugieren un modelo de desarrollo de calcretas en forma

de una progresión lineal, más que los procesos de iluviación propuestos por Gile et al. (1966) y Machette (1985), los cuales podrían no aplicarse del todo a las condiciones de una plataforma carbonatada como la de Yucatán (Alonso-Zarza y Wright (2010).

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por el proyecto IN105215 “Reconstrucción ambiental de los geosistemas costeros de México durante el Cuaternario basado en evidencias paleopedológicas”(Elizabeth Solleiro). Un agradecimiento especial para el personal del Instituto de Geología de la UNAM que contribuyó con análisis y trabajo de campo: Teresa Pi (Laboratorio de Difracción de Rayos X), Jaime Díaz (Taller de Secciones Delgadas), Jorge René Alcalá (Laboratorio de Física de Suelos), Pedro Morales y Edith Cienfuegos (Laboratorio de isótopos estables), así como a los revisores anónimos.

Referencias

- Aguilera, N., 1959, Suelos. En: E. Beltrán, editor, Los recursos naturales del sureste y su aprovechamiento II (2), Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables, México, p. 177-212.
- Allen, J.R.L., 1960, Cornstone, Geological Magazine, v. 97, p. 43-48.
- Alonso-Zarza, A.M., 1999, Initial stages of laminar calcrete formation by roots: examples from the Neogene of central Spain. *Sedimentary Geology*, v. 126, 177-191.
- Alonso-Zarza, A.M., 2003, Palaeoenvironmental significance of palustrine carbonates and calcretes in the geological record, *Earth-Science Reviews*, v. 60, p. 261-298.
- Alonso-Zarza, A. M., Jones, B., 2007, Root calcrete formation on Quaternary karstic surfaces of Grand Cayman, *Geologica Acta*, v. 5, p. 77-88.
- Alonso-Zarza, A.M., Silva, P.G., 2002, Quaternary laminar calcretes with bee nests: evidences of small scale climatic fluctuations, Eastern Canary islands, Spain, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 178, p. 119-135.
- Alonso-Zarza, A.M., Wright, V.P., 2010, Calcretes. En: A.M. Alonso-Zarza and L.H. Tanner, editores, *Carbonates in continental settings*, Elsevier, *Developments in Sedimentology*, v. 62, p. 177-224.
- Aristarain, L.F., 1971, Characteristics and genesis of caliche deposits, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 32, 117-141.
- Atallah, E. H., Bosart, L.F., 2003, The extratropical transition and precipitation distribution of Hurricane Floyd, 1999, *Monthly Weather Review*, v. 131, p. 1063–1081.
- Bautista, Z. F., Estrada, M. H., Jiménez, O. J., González, I. J. A., 2004, Relación entre relieve y unidades de suelo en zonas cársticas de Yucatán, *Terra Latinoamericana*, v. 22, p. 243-254.
- Birkeland, P.W., 1999, *Soils and geomorphology*, Oxford University Press, Oxford, 430 pp.
- Blank, H.R., Tynes, E.W., 1965, Formation of caliche in situ, *Geological Society of America Bulletin*, v. 76, p. 1387–1392.
- Blumel, W.D., 1982, Calcrete in Namibia and SE-Spain. Relations to substratum, soil formation and geomorphic factors, *Catena Supplement*, v. 1, p. 67-82.

- Budd, D.A., Pack, S.M., Fogel, M.L., 2002, The destruction of paleoclimatic isotopic signals in Pleistocene carbonate soil nodules of Western Australia, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 188, p. 249-273.
- Cabadas-Báez, H. V., Solleiro-Rebolledo, E., Sedov, S., Pi-Puig, T., Gama-Castro, J., 2010, Pedosediments of karstic sinkholes in the eolianites of NE Yucatán: A record of Late Quaternary soil development, geomorphic processes and landscape stability, *Geomorphology* v. 122, p. 323-337.
- Choquette, P.W., 1976, Recent calcareous crusts (caliche) on Isla Mujeres, Quintana Roo, Mexico: insights from isotopic composition, En: A. E. Weidie, W. C. Ward, editores, *Carbonate rock and hydrogeology of the Yucatan Peninsula, Mexico*, New Orleans Geological Society, p. 139-158.
- Davies, J.R., 1991, Karstification and pedogenesis on a late Dinantian carbonate platform, Anglesey, North Wales, *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, v. 48, p. 297-321.
- Deutz, P., Montañez, I. P., Monger, H. C., Morrison, J., 2001, Morphology and isotope heterogeneity of Late Quaternary pedogenic carbonates: implications for paleosol carbonates as paleoenvironmental proxies, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 166, p. 293-317.
- Duch, G. J., 1991, *Fisiografía del Estado de Yucatán*, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, 229 pp.
- Esteban, M., Klappa, C. F., 1983, Subaerial exposure environment, En: P. Scholle (editor), *Carbonate depositional environments*, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 33, Tulsa, p. 2-54.
- Freytet, P., Plaziat, J.C., Verrecchia, E.P., 1997, A classification of rhizogenic (root-formed) calcretes, with examples from the Upper Jurassic-Lower Cretaceous of Spain and Upper Cretaceous of southern France-discussion, *Sedimentary Geology*, v. 110, 299-303.
- García, E., 1988, Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, 3ª ed. Instituto de Geografía UNAM, México, 219 pp.
- Gile, L.H., Peterson, F.F., Grossman, R.B., 1966, Morphological and genetic sequences of carbonate accumulation in desert soils, *Soil Science* v. 101, p. 347-360.
- Goudie, A., 1973, *Duricrusts in Tropical and Subtropical Landscapes*, Clarendon, Oxford, 174 pp.
- Goudie, A., 1983. Calcrete. En: A.Goudie, K. Pye, editores, *Chemical sediments and geomorphology*, Academic Press, London, p. 93-131.
- Goudie, A., 1996, Organic agency in calcrete development, *Journal of Arid Environments*, v. 32, p. 103-112.
- Heraud, P. M. A., 1996, *LeKarst du Yucatan: Pays des Mayas*, Presses Universitaires de Bordeaux, Collection Scieteren, Bordeaux, France, 282 pp.
- Isphording, W. C., 1978, Mineralogical and physical properties of Gulf limestone soils, *Transaction-Gulf Coast Association of Geological Societies*, XXVIII, p. 201-214.
- IUSS Working Group WRB, 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, *World Soil Resources Reports No. 106*, FAO, Rome, 192 pp.

- Jáuregui, E., 2003, Climatology and land falling hurricanes and tropical storms in Mexico. *Atmósfera*, v. 16, p. 193–204.
- Jones, B., 1992, Construction of spar calcite crystals around spores, *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 62, 1054-1057.
- Klappa, C.F., 1979, Calcified filaments in Quaternary calcretes: organo–mineral interactions in the subaerial vadose environment, *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 49, p. 955–968.
- Klappa, C.F., 1983, A process– response model for the formation of pedogenic calcretes, En: R. C.L. Wilson, editor, *Residual Deposits: Surface Related Weathering Processes and Materials*, Blackwell, Oxford, p. 211-220.
- Lal, R., Kimble, J. M., Eswaran, H., Stewart, B. A., 2000, *Global climate change and pedogenic carbonates*, CRC Press, Boca Raton, 320 pp.
- Lauderdale, R. W., Ward, W. C. Weidie, A. E., 1979, Carrillo Puerto Formation of northeastern Quintana Roo, Mexico, *Gulf Coast Association of geological Societies Transactions*, v. 29, p. 275-280.
- Leeder, M.R., 1975, Pedogenic carbonates and floodplain sediment accretion rates: a quaintitative model for alluvial arid-zone lithofacies, *Geological Magazine*, v. 112, p. 257-270.
- Lugo-Hubp, J., Aceves-Quesada, J. F., Espinaza-Perena, R., 1992, Rasgos geomorfológicos mayores de la península de Yucatán, *Revista del Instituto de Geología de la UNAM*, v. 10, No.2, p. 143-150.
- McConnaughey, T.A., 2003, Sub-equilibrium ^{18}O and ^{13}C levels in biological carbonate and kinetic models, *Coral Reefs*, v. 22, p. 316-327.
- Machette, M.N., 1985, Calcic soils of the southwestern United States, En: D.L. Weide, M. L. Faber, editores, *Soils and Quaternary Geology of the Southwestern United States*, Geological Society of America, Special Paper, v. 203, p. 1-21.
- Monger, H.C., 2002, Pedogenic carbonates: links between biotic and abiotic CaCO_3 . Symposium No. 20, Paper No. 897. *Proceedings of the 17th World Congress in Soil Science*, August 2002, Thailand.
- Mook, W.G., Longsmá, J., 1987, Measurement of the N_2O corrections for $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of atmospheric CO_2 by removal of N_2O , *Tellus*, v. 39B, p. 96-99.
- National Research Council Committee on Basic Research Opportunities in the Earth Sciences, 2001. *Basic Research Opportunities in the Earth Sciences*. National Academies Press, Washington, D.C., 168 pp.
- Quiñones, H., 1975, Soil study área 4 Intrazonal soils of northern Yucatán Peninsula. En: L. de Pablo, editor, *Guidebook FT-4*, International Clay Conference, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, p. 70-93.
- Quiñones, H., Allende, R., 1974, Formation of the lithified carapace of calcareous nature which covers most of the Yucatan peninsula and its relation to the soils of the region, *Tropical Agronomy*, v. 51, p. 94–107.
- Sanborn, R.K., 1991, Petrography and Geochemistry of Calcrete Profile from the Northwestern Coast of the Yucatan Peninsula, Chuburna, Yucatan, Mexico. Master of Science Thesis. Department of Geology, Northern Illinois University, Illinois, 209 pp.

- Sattler, U., Immenhauser, A., Hillgartner, H., Esteban, M., 2005, Characterisation, lateral variability and lateral extent of discontinuity surfaces on a carbonate platform (Barremian to Lower Aptian, Oman), *Sedimentology*, v. 52, p. 339-361.
- Schinle, I., 1991, *Kaldynamik in den bodengesellschaften der halbinsel Yucatan (Mexiko)*. Doctoral thesis. Stuttgart University, Germany.
- Servicio Geológico Mexicano, 2006a. Carta Geológico-Minera Cancún F16-8 escala 1:250 000, Secretaría de Economía. Pachuca, México.
- Servicio Geológico Mexicano, 2006b. Carta Geológico-Minera Cozumel F16-11 escala 1:250 000, Secretaria de Economía. Pachuca, México.
- Socki, R.A., Gibson, E.K., Perry, E.C., Galindo, C., Golden, D. C., Ming, D. W., McKay, G.A., 2004, Stable isotope composition of carbonates formed in low-temperature terrestrial environments as Martian analogs. *Proceedings of Lunar and Planetary Science XXXV*.
- Sofer, Z., 1980, Preparation of carbon dioxide for stable carbon isotope analysis of petroleum fractions, *Analytical Chemistry*, v. 52, p. 1389-1391.
- Solleiro-Rebolledo, E., Terhorst, B., Cabadas-Báez, H., Sedov, S., Damm, B., Sponholz, B., Wiesbeck, C., 2015, Influence of Mayan land use on soils and pedosediments in karstic depressions in Yucatan, Mexico, En: B. Lucke, R. Baumler, M. Schmidt, editores, *Soils and sediments as archives of Environmental Change. Geoarchaeology and Landscape Change in the Subtropics and Tropics*, Fränkische Geographische Gesellschaft, Erlangen, p. 233-266.
- Stearns, H. T., 1974, Submerged shorelines in the Hawaiian Islands and a revision of some of the eustatic emerged shorelines, *Geological Society of America Bulletin*, v. 85, p. 795-804.
- Swart, P., 2015, The geochemistry of carbonate diagenesis: the past, present and future, *Sedimentology*, v. 62, p. 1233-1304.
- Tandon, S.K., Andrews, J.E., Sood, A., Mittal, S., 1998, Shrinkage and sediment supply control on multiple calcrete profile development: a case study from the Maastrichtian of central India, *Sedimentary Geology*, v. 119, p. 25-45.
- Verrecchia, E.P., Verrecchia, K.E., 1994, Needle-fiber calcite: a critical review and proposed classification, *Journal of Sedimentary Research*, v. 63, p. 1000-1006.
- Verrecchia, E.P., Freytet, P., Verrecchia, K.E., Dumont, J.L., 1995, Spherulites in calcrete laminar crusts: biogenic CaCO_3 precipitation as a major contributor to crust formation, *Journal of Sedimentary Research* v. A65, 690-700.
- Wang, Y., Nahon, D., Merino, E., 1994, Dynamic model of the genesis of calcretes replacing silicate rocks in semi-arid regions, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 58, p. 5131-5145.
- Ward, W. C., 1985, Quaternary geology of northeastern Yucatan Peninsula, En: W. C. Ward, A. E. Weidie and W. Back, editores, *Geology and hydrogeology of the Yucatan and Quaternary geology of Northeastern Yucatan*, New Orleans Geological Society, p. 23-91.

- Warren, J.K., 1983, Pedogenic calcrete in Quaternary calcareous dunes in coastal Southern Australia, *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 53, p. 787-796.
- Watts, N.L., 1978, Displacive calcite: Evidence from recent and ancient calcretes, *Geology*, v. 6, p. 699-703.
- Wright, V.P., 1989, Terrestrial stromatolites: a review, *Sedimentary Geology*, v. 65, p. 1-13.
- Wright, V. P., 1994, Paleosols in shallow marine carbonate sequences, *Earth-Science Reviews*, v. 35, p. 367-395.
- Wright, V.P., Alonso-Zarza, A.M., 1990, Pedostratigraphic models for alluvial fan deposits: a tool for interpreting ancient sequences, *Journal of the Geological Society of London*, v. 147, p. 8-10.
- Wright, V.P., Marriott, S.B., 1996, A quantitative approach to soil occurrence in alluvial deposits and its applications to the Old Red Sandstone of Britain, *Journal of the Geological Society London*, v. 153, p. 907-913.
- Wright, V.P., Tucker, M.E., 1991, Calcretes: an introduction. En: V.P. Wright, M.E. Tucker, editores, *Calcretes*, IAS Reprint Series, Vol.2. Blackwell Scientific Publication, Oxford, p. 1-22.
- Wright, V.P., Beck, V.H., Sanz-Montero, M.E., 1996, Spherulites in calcrete laminar crusts: biogenic CaCO_3 precipitation as a major contributor to crust formation. Discussion, *Journal of Sedimentary Research*, v. 66, p. 1040-1041.
- Wright, V.P., Platt, N.H., Marriott, S.B., Beck, V.H., 1995, A classification of rhizogenic (root-formed) calcretes, with examples from the Upper Jurassic-Lower Carboniferous of Spain and Upper Cretaceous of southern France. *Sedimentary Geology*, v. 100, p. 143-158.

Manuscrito recibido: 25 enero de 2016

Recepción del manuscrito corregido: 17 enero de 2017

Manuscrito aceptado: 20 enero de 2017

Los costos ambientales de la pérdida de suelo en la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Guanajuato

Bautista Francisco¹, Alma Barajas¹, José Luis Cortés¹,
Luis D. Olivares¹, Ángeles Gallegos^{1,2}, Azucena Pérez³

¹Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México,
Antigua carretera a Pátzcuaro SN, Morelia Michoacán, México, leptosol@ciga.unam.mx,;

²Scientific Knowledge In Use, Ciudad de México, México, www.actswithscience.com;

³Departamento de Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato.

Resumen

La pérdida de suelo por erosión en la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda es un problema y creciente, a pesar de ser una zona para la protección del ambiente y de la biodiversidad de la región. El objetivo de este trabajo fue la evaluación de las funciones ambientales de un perfil de suelo de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda en el estado de Guanajuato. Se tomaron muestras de un perfil de un suelo conservado y fueron analizadas en el laboratorio. La evaluación de la capacidad de retención de agua disponible y el contenido de carbono orgánico se evaluaron con el software *Soil & Environment*, considerando dos escenarios de erosión: a) una pérdida del horizonte A de 0 a 14 (cm) y b) una pérdida de los horizontes A y AB (de 0 a 39 cm). El análisis del *Chromic Endoskeletal Luvisol* (Cutanic, Humic, Epiloamic) en la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda revela que: a) el suelo contiene un total del 7568.7 t ha⁻¹, con un volumen de 8000 m³; b) una erosión severa, con la pérdida del horizonte A, disminuye en un 27.56% la retención de humedad y una erosión en niveles superiores la disminución alcanza un 58.29%; c) la retención de carbono orgánico en el Luvisol se pierde por erosión del 20.1% al 58.22%.

Introducción

La degradación del suelo puede ser descrita también como el deterioro de su calidad o la pérdida parcial o total de una o más funciones del suelo (van Lynden et al., 2004). Por otro lado, la degradación del suelo no suele preocupar tanto como la degradación del agua o la del aire debido a que no se conocen o no son obvias las repercusiones en la vida humana. Sin embargo, en los últimos años se ha venido gestando un movimiento internacional para la protección de los suelos, debido a que la degradación ha ido avanzando de manera alarmante.

Una de las formas de degradación del suelo es la erosión, tema sobre el cual se ha estudiado y escrito mucho, tanto a nivel internacional como a nivel nacional. Se sabe que la erosión es uno de los principales problemas del país como

consecuencia del deficiente manejo del suelo. Los problemas que se generan por la erosión del suelo suelen no ser contundentes, debido a que la pérdida de un número cualquiera de toneladas por hectárea parece no ser relevante.

La degradación, y particularmente la erosión de los suelos, se liga de manera clara con sus funciones ambientales, más allá de los tradicionales ámbitos agrícola, pecuario y forestal (Bouma, 2009). Las funciones ambientales de los suelos son: amortiguación de los contaminantes (Bouma, 2009); limpieza del agua (Bautista et al., 1995; Aguilar y Bautista, 2011); reserva para la biota silvestre (Lehmann, 2006; Lehmann et al., 2008, 2010); archivo geológico, histórico y cultural (Bouma, 2009); fijación y reserva de carbono (Bouma, 2009; Pérez-Ramírez et al., 2013).

El paso del conocimiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo a su expresión como funciones ambientales requiere la correcta interpretación, considerando las propiedades del perfil del suelo a evaluar (Gallegos et al., 2014). En actividades agrícolas a menudo se evalúa solo el horizonte superficial. Pero para la evaluación de las funciones ambientales se deben considerar las propiedades del perfil de suelo completo.

El paso de la evaluación de las propiedades del suelo por horizonte requiere “hacer las cuentas” para todo el perfil, utilizando una superficie estándar, como el metro cuadrado o la hectárea, para de esta manera calcular la cantidad de agua, nutrientes, carbono, metales pesados, aire, entre otros, que el suelo puede contener, adsorber o liberar.

Para que quienes toman decisiones y el público en general reaccionen ante las consecuencias de la pérdida de suelo, se hace necesario expresar el daño que la erosión ocasiona en el ambiente,

como la pérdida de las funciones ambientales de los suelos, es decir, las repercusiones en la calidad del agua, del aire, de la vida humana en general.

El objetivo de este trabajo fue la evaluación de las funciones ambientales de un perfil de suelo de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda en el estado de Guanajuato.

Materiales y métodos

Utilizamos un Luvisol que se encuentra en un bosque de encinos o *Quercus* en la Sierra Gorda de Guanajuato (Figura 1). El uso del suelo es forestal de tala selectiva. *In situ* no se observó ninguna evidencia de erosión y el perfil tiene un drenaje interno que puede considerarse bueno. El perfil de suelo se describió siguiendo el manual de descripción de suelos en campo de la FAO (2006). En campo se midió el espesor de los horizontes, se calculó la pedregosidad y se evaluó la forma, tamaño y estabilidad de los agregados.

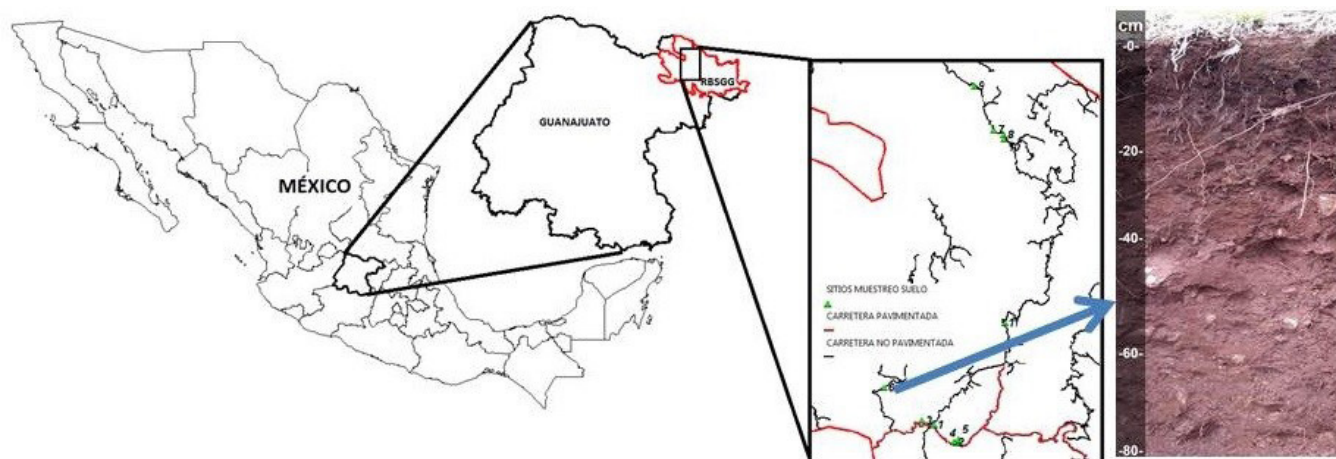


Figura 1. Zona de estudio en la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda del estado de Guanajuato

Análisis de laboratorio

Se realizaron los siguientes análisis: a) distribución del tamaño de partículas (Okalebo et al., 1993), b) densidad aparente por el método de la parafina, pH 1:2.5 (Lean, 1982), c) materia orgánica por oxidación ácida con dicromato de potasio (Nelson y Sommers, 1982), d) capacidad de intercambio de cationes por el método del acetato de amonio pH 7, con los cationes intercambiables (USDA, 1996).

Análisis de datos

Para estimar la capacidad de retención de agua disponible (Cuadro 1) es necesario conocer el tipo de textura y la densidad aparente por horizonte del perfil de suelo. La evaluación de la capacidad de retención de agua disponible se realiza a partir de intervalos de valores en $L\ m^{-2}$,

por lo que es necesario convertir la estimación obtenida en porcentaje de volumen para calcular la capacidad de retención de agua disponible por horizonte con la siguiente ecuación:

$$dCC(Lm^{-2}) = dCC[Vol.\%] * (100 - piedras[Vol.\%]) * espesor[dm]$$

Donde:

$dCC\ [L\ m^{-2}]$ = capacidad de retención de agua disponible por horizonte en L/m^2 ;

$dCC\ [Vol.\%]$ = capacidad de retención de agua en porcentaje de volumen;

$piedras\ [Vol.\%]$ = volumen de piedras;

$espesor\ [dm]$ = espesor del horizonte en decímetros.

Cuadro 1. Estimación de la capacidad de retención de agua disponible (% Vol.).

Textura	DA < 1.2	DA ≥ 1.2 - DA ≤ 1.4	DA > 1.4
A	16	11	11
AC	20	16	14
L	28	26	-
	DA ≤ 1.0	DA > 1.0 - DA ≤ 1.4	DA > 1.4
CA	24	20	17
CL	27	24	21
C	20	15	13
CRA	15	12	10
CRL	20	16	14
CR	16	12	9
	DA ≤ 1.0	DA > 1.0 - DA ≤ 1.6	DA > 1.6
R	16	12	-
RA	16	12	9
RL	15	11	7

DA: Densidad aparente; A: Arenosa, AC: Arenosa franca, CA: Franco arenosa, L: Limosa, CL: Franco limosa; C: Franca, CRA: Franco arcillo arenosa, CRL: Franco arcillo limosa, CR: Franco arcillosa, R: Arcillosa, RA: Arcillo arenosa, RL: Arcillo limosa. Fuente: Siebe et al., (2006).

La sumatoria de los horizontes es el resultado de la capacidad de retención de agua disponible en el suelo. De acuerdo con Siebe et al. (2006), un valor de capacidad de retención de agua disponible menor a cincuenta es considerado muy bajo; un valor igual a cincuenta y menor a noventa es bajo; si el valor es mayor o igual a noventa y menor a ciento cuarenta es mediano, si es mayor o igual a ciento cuarenta y menor que doscientos es alto; por último si el valor es mayor a doscientos, la capacidad de retención de agua disponible es muy alta.

El carbono orgánico del suelo se calcula con la siguiente ecuación:

$$COST = \sum_{horizonte=i}^{horizonte=n} \left((BD_i * TH_i * [1 - \frac{CR_i}{100}]) * C_i \right) * 100$$

Donde:

COST [Mg ha⁻¹] = carbono orgánico del perfil completo

BD_i [Mg m⁻³] = Densidad aparente del horizonte i

TH_i [m] = Espesor del horizonte i

CR [Vol. %] = Volumen de fragmentos gruesos del horizonte i o pedregosidad

C_i [%] = porcentaje de carbono orgánico del horizonte i

Se estimaron dos escenarios de degradación por erosión, teniendo en cuenta las observaciones de campo. La información del perfil del suelo se capturó en el software *Soil and Environment* (Gallegos et al., 2016) y se calcularon las funciones ambientales de los suelos (Bautista et al., 2016; Gallegos et al., 2016). Para estimar la pérdida de las funciones de los suelos se recalcularon las funciones ambientales considerando una pérdida del horizonte A de 0 a 14 cm con una cobertura de matorral secundaria; en el segundo caso se simuló un suelo con uso pecuario, con una pérdida de los horizontes A y AB de 0 a 39 cm.

Cuadro 1. Propiedades del perfil GTO-006 estimadas en campo y la cantidad de tierra fina por horizonte calculada con S&E.

Profundidad (cm)	Pedregosidad (%)	Forma de agregados	Tamaño de agregados	Estabilidad de agregados	Tierra Fina (t ha ⁻¹)
0 14	2	Bloques subangulares	Gruesos	Alta	1400
14 39	15	Bloques angulares	Muy gruesos	Baja	2210
39 65	15	bloques subangulares	Medios	Muy baja	2807
65 80	40	Bloques angulares	Muy gruesos	Moderada	1152

Cuadro 2. Propiedades del perfil GTO-006 medidas en laboratorio.

C (%)	MO (%)	DA (g cm ³)	pH	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura	CIC	Ca	Mg cmol kg ⁻¹	Na	K
5.07	8.74	0.64	5.70	31.08	42	26.92	C	28.8	3.8	3.18	0.4	1.3
4.05	6.99	1.04	6.37	20.36	40	39.64	CR	28.5	2.66	3.02	0.3	0.6
2.57	4.44	1.27	6.37	25.08	30	44.92	R	33.8	7.35	3.28	0.4	0.5
1.32	2.29	1.28	6.13	20.72	30	49.28	R	31.9	5.36	4.2	0.4	0.5

C= carbono orgánico; MO= materia orgánica; DA= densidad aparente; Textura: C Franco; CR Franco arcilloso y R Arcilloso; CIC= capacidad de intercambio de cationes.

Resultados

El perfil de suelo de acuerdo con la WRB (IUSSS, 2014) y utilizando los calificadores, corresponde a un Chromic Endoskeletal Luvisol (Cutanic, Humic, Epiloamic).

El suelo contiene un total del 7568.7 t ha^{-1} , con un volumen de 8000 m^3 ; si la tierra de una hectárea se vendiera como tierra de jardín a $\$500 \text{ el m}^3$, entonces el suelo valdría $\$4,000,000$ y el terreno quedaría con afloramiento rocoso, sin retención de humedad y toda el agua de lluvia sería de escorrentía. Además, sin flora ni fauna silvestre ni microorganismos, perdería su poder de retención de nutrientes y de adsorción/descomposición de contaminantes.

También podría calcularse el costo del desazolve de presas y ríos si el costo de sacar un metro cúbico de sedimento fuera de $\$50$ pesos. El costo por desazolver el equivalente a una hectárea sería de $\$400,000$, pero los volúmenes de desazolve de las presas a menudo rebasan los 6 millones de metros cúbicos con un costo de alrededor de los 300 millones de pesos.

Cuando un Luvisol tiene una cubierta de bosque de Quercus puede retener más de 120 Lm^{-2} de agua, sin embargo, cuando se erosiona y pierde su horizonte A pierde alrededor de

40 Lm^{-2} de capacidad para almacenar agua. En casos extremos, donde el suelo puede estar cubierto por bosque o por pasto, la diferencia es significativa, pues pierde más de la mitad de su capacidad para retener agua (Figura 2).

Si este suelo se utilizara de manera agrícola cuidándolo y disminuyendo la erosión, entonces el agua de lluvia podría ser captada por el suelo y utilizarse para el crecimiento de las plantas. De la misma manera, el suelo conservado protege de mejor forma los acuíferos al limpiar el agua. Podríamos decir que un suelo conservado significa mayor cantidad y mejor calidad de agua en los acuíferos.

La capacidad de un suelo para almacenar carbono orgánico es un tema de relevancia internacional, porque los suelos retienen más carbono que las plantas y la atmósfera. Cuando un Luvisol cambia de cubierta forestal a pastizal pierde 129 Mg ha^{-1} de carbono orgánico y, cuando pasa de forestal a matorral, pierde 44 Mg ha^{-1} (Figura 2), o 44 t ha^{-1} .

El carbón orgánico se pierde, ya sea acompañando a los sedimentos, o integrándose a la atmósfera en forma de CO_2 , que es un gas de efecto invernadero. La conservación del carbono en el suelo significa atenuación del cambio climático, mayor pago por captura de carbono y cumplimiento de las medidas de mitigación.

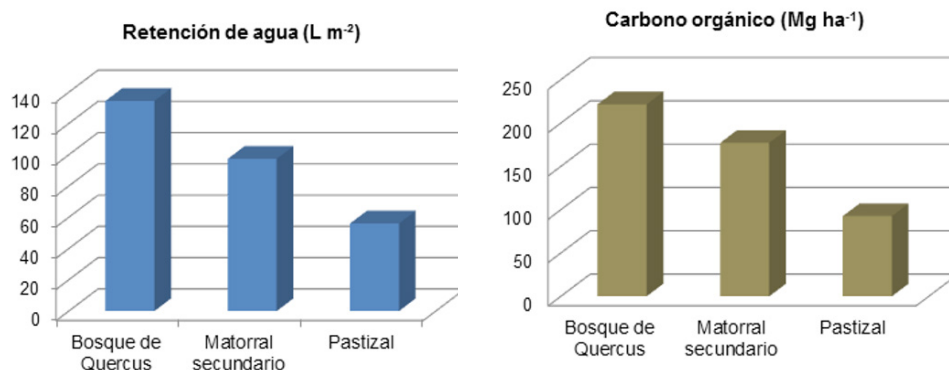


Figura 2. Evaluación del carbono orgánico del suelo

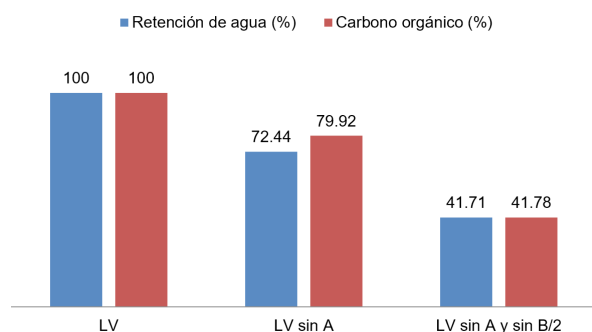


Figura 2. Evaluación del carbono orgánico del suelo

Conclusión

Las funciones ambientales del suelo se pierden por erosión. En este trabajo sólo se evaluó la pérdida en la retención de humedad y el contenido de carbono orgánico, y quedó pendiente la evaluación de la pérdida de la fertilidad, la capacidad de retención de metales pesados, la capacidad de adsorción de nutrimentos y el resto de las funciones ambientales de los suelos.

Agradecimientos

A la empresa Skiu por facilitarnos una versión gratuita del software S&E y a los árbitros y revisores por sus valiosas observaciones.

Referencias

- Aguilar, Y. y Bautista, F., 2011, Extrapolating the suitability of soils as natural reactors using an existing soil map: application of pedotransfer functions, spatial integration and validation procedures. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13, 221- 232.
- Bautista, F., Luna, P. V. M., Durán, B. C., 1995 El suelo, un reactor químico muy interesante. *Educación química*, 6(4), 226–230.
- Bautista F., A. Gallegos, A. Pacheco, 2016, Análisis de las funciones ambientales de los suelos con datos de perfiles (Soil & Environment). Skiu. México D.F., México. 69 pp.

Blum, W. E. H., 2005, Functions of soil for society and the environment. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 4(3), 75-79. Doi: 10.1007/s11157-005-2236-x

Bouma, J., 2009, Soils are back on the global agenda: Now what?. *Geoderma*, 150, 224–225. Doi:10.1016/j.geoderma.2009.01.015

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2006, Guidelines for soil description (Fourth edition): Rome, 111 pp.

Gallegos-Tavera, Á., Bautista, F., Álvarez, O., 2014, Software para la evaluación de las funciones ambientales de los suelos (Assofu). *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 20(2), 237-249. Doi: 10.5154/r.rchscfa.2012.11.060.

Gallegos A., F. Bautista, I. Dubrovina, 2016, «Soil & Environment» - Software for the evaluation of soil environmental functions. *Programmnye produkti I sistemy (Software and Systems) 2* (114): 195-200 (en ruso).

IUSSS (International Union of Soil Science Societies) working group WRB. 2015. World reference bases for soil resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Reports*, FAO (106). FAO, Rome, Italy.

Lean, E.O., 1982, Soil pH and lime requirement. En: Page, A. L., Miller, R.H., Keeney, D. R. (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, WI, pp. 199-224.

Lehmann, A., 2006, Technosols and other proposals on urban soils for the WRB (World Reference Base for soil resources). *International Agrophysics*, 20(2), 129–134.

- Lehmann, A., David, S., K. Stahr, 2008, Technique for Soil Evaluation and Categorization for Natural and Anthropogenic Soils. University of Hohenheim: Stuttgart
- Lehmann, A. y Stahr, K., 2010, The potential of soil functions and planner-oriented soil evaluation to achieve sustainable land use. *Journal of Soils and Sediments*, 10(6), 1092–1102. Doi: 10.1007/s11368-010-0207-5.
- Nelson, D.W. and Sommers, L. E., 1982, Total carbon, organic carbon and organic matter. En: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D. R., (Eds.), *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, WI. pp. 535-577.
- Okalebo, R., Gathua, K.W., Woomer, P.L., 1993, *Laboratory methods of soil and plant analysis: A working manual*. KARI, SSEA, TSBF, UNESCO, Nairobi, Kenya, 88 pp.
- Pérez-Ramírez, S., Ramírez, M. I., Jaramillo-López, P. F., Bautista, F., 2013, Contenido de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales: reserva de la biosfera mariposa monarca, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(1) 157-173. Doi:10.5154/r.rchscfa.2012.06.042.
- Siebe, C., Jahn, R., y Stahr, K., 1996, *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*, publicación especial 4: Chapingo, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C., 30 pp.
- USDA (United State Department of Agriculture), 1996, *Soil survey laboratory methods manual. Soil survey investigations report No. 42 version 3.0*. United State Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center. Washington D.C., 693 pp.
- van Lynden G.W.J. and Oldeman L.R., 1997, *The assessment of the Status of Human-Induced Soil Degradation in South and South East Asia*. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, Holanda. 35 pp.
- van Lynden, G.W.J.; Mantel, S., van Oostrum A., 2004, *Guiding principles for the quantitative assessment of soil degradation*. FAO. Rome. 73 pp.

Manuscrito recibido: 25 enero de 2016

Recepción del manuscrito corregido: 5 enero de 2017

Manuscrito aceptado: 10 enero de 2017

Monitoreo sísmico en tiempo real para la alerta temprana, el caso de SeiscomP

Jhon Leandro Pérez

Posgrado, División de Ciencias de la Tierra, CICESE

jhonper@cicese.edu.mx

leandro.perez.volcan@gmail.com

Resumen

Los avances tecnológicos en la instrumentación sísmica, las telecomunicaciones y el software, ha permitido el desarrollo de los sistemas de monitoreo sísmico en tiempo real para la alerta sísmica temprana que, desde el punto de vista de la mitigación del riesgo, se han convertido en una herramienta práctica para reducir los impactos sobre la población producidos por terremotos de gran magnitud.

El presente trabajo de divulgación tiene como propósito mostrar algunos ejemplos del uso del software libre *SeiScomP* en algunos países de América Central, así como promover su implementación en otros países de Latinoamérica que aún no cuentan con esta interesante alternativa de monitoreo sísmico en tiempo real y emisión de alertas.

Palabras clave: Monitoreo sísmico en tiempo real; alerta sísmica temprana; *SeisComP*, América Central.

Introducción

La responsabilidad de la vigilancia sísmica exige una combinación tecnológica altamente eficiente de software, hardware e instrumentación (sísmica, geodésica y mareográfica), que debe cubrir las zonas donde la experiencia y los estudios científicos las hayan identificado como zonas de alto riesgo sísmico. Particularmente, en cuanto a software se refiere, los sistemas de monitoreo sísmico en tiempo real consisten en un conjunto de métodos y procedimientos automáticos para el cálculo rápido de los parámetros básicos de un terremoto (localización, magnitud y tiempo de origen), basándose en estimaciones hechas a pocos segundos de la llegada de la onda P al sitio de interés. De esta manera, se puede estimar en tiempo corto las características del movimiento del terreno (aceleración, velocidad o desplazamiento).

El tratamiento automatizado de los datos sísmicos en tiempo real está siendo cada vez más demandado por la comunidad científica, los algoritmos para las detecciones y procesamiento

de datos tratan de reflejar la experiencia sensorial humana en lo que respecta al reconocimiento de patrones de un sismograma, por ejemplo, lecturas de los arribos de la onda P, S y amplitudes (Kuperkoch et al., 2011; Zhang et al., 2016). Un ejemplo de esto, es el software *SeiScomP*, el cual incluye herramientas adecuadas para la adquisición de los datos (SeedLink), módulos para el procesamiento en tiempo real (detección, localización, estimación de magnitudes, etc.) y una interfaz gráfica para analizar, revisar y realizar postprocesamiento de los eventos sísmicos, tales como relocalizaciones, recalcular magnitudes, inspección del estado de las estaciones sísmicas involucradas en las detecciones, errores en distancia, de azimut, tiempo de viaje, etc. El uso de *SeisComP* poco a poco se ha incrementado a nivel mundial como una interesante alternativa de monitoreo sísmico en tiempo real y en Latinoamérica, América Central es pionera en la implementación de este sistema.

Alerta Sísmica Temprana

A medida que avanza la urbanización en todo el mundo, los terremotos representan una amenaza creciente para la vida y la infraestructura, por esta razón, la alerta sísmica temprana es una herramienta práctica para reducir los efectos causados por terremotos destructivos (Kanamori et al., 1997; Teng et al., 1997; Wu y Teng, 2002; Allen y Kanamori, 2003; Kanamori, 2007; Iervolino et al., 2007; Zhang et al., 2016).

La primera idea de la alerta sísmica temprana fue propuesta en 1968 en San Francisco, California, por Cooper (Nakamura, 2007). Cien años más tarde, “The Japan Railways Company” en 1965 diseñó el primer Sistema de Alarma de Detección Urgente de Terremotos (UrEDAS, por sus siglas en inglés) que comenzó a funcionar en 1966 para el sistema de ferrocarriles japonés (Nakamura, 2007). En las dos últimas décadas, se han hecho importantes progresos en la aplicación de Sistemas de Alerta Sísmica Temprana (SAST) en otras regiones como China (Taiwán), Ciudad de México, sur de California, Turquía, Italia y Rumanía (Espinosa et al., 1995; Odaka et al., 2003; Allen y Kanamori, 2003; Wu y Teng, 2002; Wu y Zhao, 2006; Zollo et al., 2006; Böse et al., 2007; Chen et al., 2015; Picozzi et al., 2015; Zhang et al., 2016).

La efectividad de los SAST para reducir el riesgo ante terremotos destructivos ha sido demostrada en países como Japón y México. En el primer caso, más de 1,000 estaciones están distribuidas en todo el país, proporcionando datos básicos en tiempo real para el SAST. Tanto los sismos en tierra como fuera de la costa son detectados y las alertas se emiten si el máximo de intensidad sísmica es del orden de VII en Mercalli modificada (IMM) (Osamu et al., 2009; Doi, 2011, Zhang et al., 2016). Dependiendo de su ubicación, las personas tendrán en cualquier lugar desde pocos a decenas de segundos para reaccionar. Por ejemplo, de acuerdo a un informe de la Agencia Meteorológica de Japón (JMA, por

sus siglas en inglés), para el terremoto de Tohoku 9.0Mw en 2011 (Hoshiba et al., 2011; Hoshiba y Ozaki, 2013), el SAST emitió una alerta de más de 15 segundos antes del comienzo del movimiento fuerte del suelo en el distrito de Tohoku, que estaba relativamente cerca del epicentro (Zhang et al., 2016). En el caso de México, la alerta sísmica temprana es transmitida 60 segundos antes de que las ondas destructivas lleguen a ciudad de México. Estas ondas de movimiento fuerte son detectadas por más de 20 estaciones sísmicas ubicadas a lo largo de la costa de Guerrero (Suárez et al., 2009).

Otro ejemplo en Latinoamérica, aunque por el momento en escala menor a los SAST mencionados, es el caso de América Central (con excepción de Belice) donde hace varios años las redes sísmicas de esta región vienen implementado el software *SeisComp* para la detección automática, localización y reporte rápido de eventos (todo en tiempo real), con muy buenos resultados para las instituciones de Defensa Civil y los observatorios sísmicos como se verá posteriormente.

SeisComp

SeisComp (<https://www.seiscomp3.org>) es un software sismológico de adquisición de datos, procesamiento, distribución y análisis interactivo de uso libre (existe también una versión comercial) que está programado en C++ y Python. Fue desarrollado hace más de 10 años por la Red Sísmica Global de Alemania (GEOFON, por sus siglas en alemán) y por el Centro Alemán de investigaciones Geocientíficas (GFZ, por sus siglas en alemán). Después del desastroso tsunami del Océano Índico en 2004, el cual se asoció con un sismo de 9.3Mw, inició el proyecto alemán de Alerta Temprana de Tsunami para el Océano Índico (GITWS, por sus siglas en alemán), donde se implementó un novedoso diseño de *SeisComp* para cumplir los requisitos de los centros de SAST para el monitoreo 24/7. Como resultado de los cambios surgió un software altamente

profesional llamado SeiComp3. Desde el 2008 hasta la fecha, *SeisComp* sigue mejorándose por GEOFON, GFZ, la compañía alemana Gempa (<http://www.gempa.de>) y la comunidad de usuarios (Geofon-Gfz, 2016).

En los últimos cinco años diversos observatorios en todo el mundo han instalado *SeisComp* para realizar monitoreo en tiempo real debido a sus ventajas con respecto a otros sistemas. Por ejemplo, Earthworm, EarlyBird y Antelope (Pesaresi, 2011; Olivieri y Clinton, 2012). Algunas de sus características son: adquisición, distribución, control de calidad de los datos, generación de formas de onda, intercambio de datos en tiempo real, inspección del estado de la red sísmica, detección automática de eventos y localización (de manera rápida y precisa), emisión de alertas, fácil acceso a la correspondiente información sobre las estaciones sismológicas locales y mundiales, además de reportes de eventos recientes (Ethz, 2016; Behr et al., 2016).

El procesamiento que realiza *SeisComp* a los datos sísmicos inicia a partir de la entrada continua de formas de onda (adquisición con seedlink), luego se calcula automáticamente la relación promedio de la duración corta respecto a la duración larga de la señal, que es un algoritmo de detección comúnmente conocido como STA/LTA (Allen, 1978 y 1982). Este algoritmo se “dispara” cuando dicha relación de las señales registradas supera un umbral establecido (por ejemplo, STA/LTA = 2.0) para poder detectar automáticamente los arribos de la onda P, luego el algoritmo AIC-Picker (Leonard y Kennett, 1999) realiza las lecturas de estos arribos mediante el módulo scautopick. Para la localización de eventos se involucran los tiempos de viaje de la onda P, que pueden ser de un modelo local, regional o mundial como el de laspei91 (Kennett y Engdahl, 1991). Estos tiempos de viaje encuentran en el programa LOCSAT de *SeisComp* y funciona por medio del módulo scautoloc siguiendo los criterios señalados por Bratt y Bache (1988) para localizaciones de eventos con redes regionales y dispersas. El

módulo scamp determina las amplitudes para que el módulo scmag realice el cálculo de los diferentes tipos de magnitudes: MI, Ms, Mb y Mw (derivadas del modelo mB, ver en Bormann y Saul, 2008). Finalmente la selección de la mejor solución de localización del evento depende de la mayor cantidad de lecturas de P usadas, un RMS coherente, los errores en distancia, tiempo de viaje, etc. Luego, el módulo scevent reporta esta información y la envía a la base de datos de *SeisComp* (por ejemplo, MySQL). La Figura 1 muestra un esquema general del procedimiento llevado por *SeisComp*.

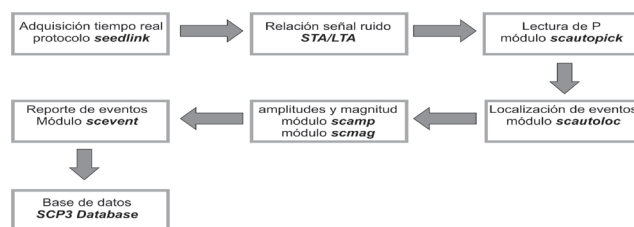


Figura 1. Esquema simplificado del tratamiento y procesamiento de datos en *SeisComp*.

De acuerdo con Gempa (2016), los propósitos para la alerta temprana hicieron necesario adoptar en el diseño y la arquitectura de *SeisComp* requisitos como:

- Implementación de las funciones críticas mediante módulos independientes para garantizar la independencia de otras funciones (por ejemplo, realizar lecturas de fases, calcular magnitudes, realizar un análisis interactivo en pre y post proceso, etc.).
- Facilidad de implementación de módulos personalizados.
- Independencia de hardware y software.
- Capacidad de intercambio de datos entre diferentes sistemas automáticos en tiempo real.
- Distribución de módulos en varios sistemas.
- Un sistema robusto de soluciones rápidas y fiables, especialmente durante las alertas sísmicas.

El algoritmo “Virtual Seismologist-VS” (Cua, 2005; Cua y Heaton; 2007; Cua et al., 2009) para la alerta sísmica temprana, el cual fue implementado en California desde 2008, ahora está integrado en SeisComp con nuevos módulos (Behr et al., 2016). Los esquemas simplificados de funcionamiento de *SeisComp* en ambas modalidades, es decir, monitoreo en tiempo real y en alerta temprana (VS-SC) se muestran en la Figura 2.

El funcionamiento de VS-SC es el mismo que *SeisComp*, salvo por los nuevos módulos con fines de alerta sísmica temprana. En este caso, *scvsmag* permite el cálculo y actualización continua de magnitudes en tiempo real donde las alertas son emitidas y actualizadas por *scvsmaglog*; el módulo específico de procesamiento de SV-SC3 es *scenvelope*, el cual permite tener acceso a formas de onda de diferentes fuentes en una interface común. El análisis y revisión del procesamiento en ambas modalidades se puede hacer en *scolv*, que es una herramienta interactiva (GUIs) de *SesiComp3*. La explicación amplia del funcionamiento de VS-SC3, así como su capacidad demostrada se puede consultar en Behr et al. (2016).

SeisComp en América Central

En América Central se ha instalado *SeisComp* en el Instituto de Geociencias de la Universidad Panamá (IGC-UPA), la Red Sismológica de la Universidad de Costa Rica (RSN-UCR), en el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), en la Comisión Permanente de Contingencias de Honduras (COPECO), en el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Salvador (MARN) y en el Instituto de Sismología y Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (INSIVUMEH; Figura 3).

En Nicaragua, *SeisComp* es una de las bases de trabajo de la Red Sísmica Nacional (RSN) administrada por el INETER, así como del Centro Nacional de Alerta Tsunami (CNAT) y del Centro Regional de Asesoramiento de Tsunamis en América Central (CATAC). En estas instituciones la adquisición y procesamiento automático de datos se realiza con *SeisComp*, permitiendo el envío de información oportuna a quienes toman decisiones, la generación de información a la población, el intercambio de datos sísmicos en tiempo real con observatorios homólogos de América Central y otros países (Strauch et al., 2016; Martínez et al., 2016).

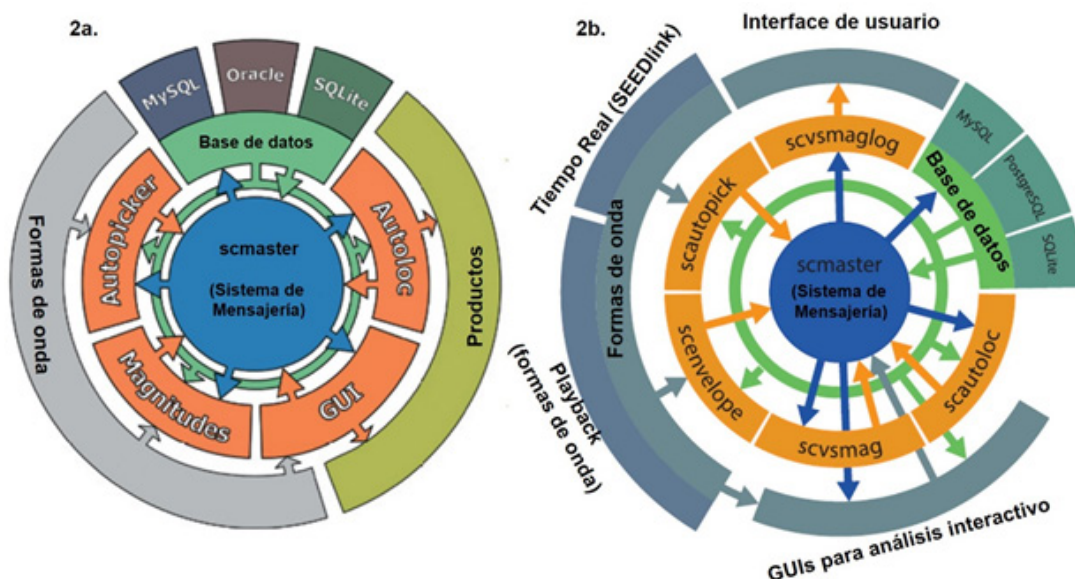


Figura 2. Funcionamiento de SeisComp3. 4a) modo normal y 4b) modo VS-SC3 (modificado de Seiscomp.org y Behr et al., 2016).



Figura 3. Distribución de instalaciones de SeisComP en Centroamérica. Los puntos en amarillo corresponden a los sitios donde ha sido implementado SeisComP. La instalación del sistema ha sido realizada por la compañía OSOP en casi todos los países de América Central y México (UNAM), con excepción de Nicaragua donde fue el INETER quien lo instaló (esta imagen es cortesía del Dr. Wilfried Strauch).

En Panamá, la compañía Observatorio Sísmico del Occidente de Panamá (OSOP), realizó una comparación entre localizaciones obtenidas manualmente en SEISAN con las obtenidas automáticamente de *SeisComP* para 161 eventos de diversas magnitudes (Pérez, 2014a). Los resultados mostraron la fiabilidad de las localizaciones del sistema automático respecto al manual, donde la mayoría de éstas presentan diferencias de localización de hasta ± 5 km (en latitud y longitud). Comparando las lecturas de P automáticos con los manuales, la diferencia de éstos, en promedio, es de 0.06 segundos, valor que no supera la tolerancia de 0.2 segundos como lo sugiere Baer y Kradolfer (1987) para validar un buen “picker”. Las magnitudes locales (MI) calculadas de modo manual y automático de los eventos detectados, poseen una correlación del 87% y las diferencias entre las magnitudes de uno y otro modo de procesamiento se encuentran en el rango de 0 a 0.4 unidades (Pérez, 2014a). OSOP también realizó la integración de SeisComP con ShakeMap para el Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) de Panamá (Pérez,

2014b), con el fin de que esta institución gubernamental pueda conocer en primera instancia, la localización acertada de los eventos y luego identificar las zonas de mayor afectación mediante mapas de intensidad instrumental, lo cual permite optimizar las tareas de búsqueda y rescate en caso de un sismo destructivo (Figura 4).

Por otro lado, uno de los aspectos técnicamente importantes para el buen funcionamiento de cualquier SMSTR, es la densidad de las redes sísmicas. En el caso de Panamá, a partir de 2012 su red fue robustecida con más de 50 equipos de periodo corto (llamados Darien) fabricados por OSOP que complementaron la red de banda ancha del IGC-UPA compuesta por 10 estaciones sísmicas distribuidas a lo largo del territorio (~ 700 km; Figura 5). Después de 2012, cuando se realizó la instalación de equipos que fueron integrados al *SeisComP*, los buenos resultados en los últimos años no se hicieron esperar, como demuestra el importante incremento en la detección de eventos (Figura 6 y 7).

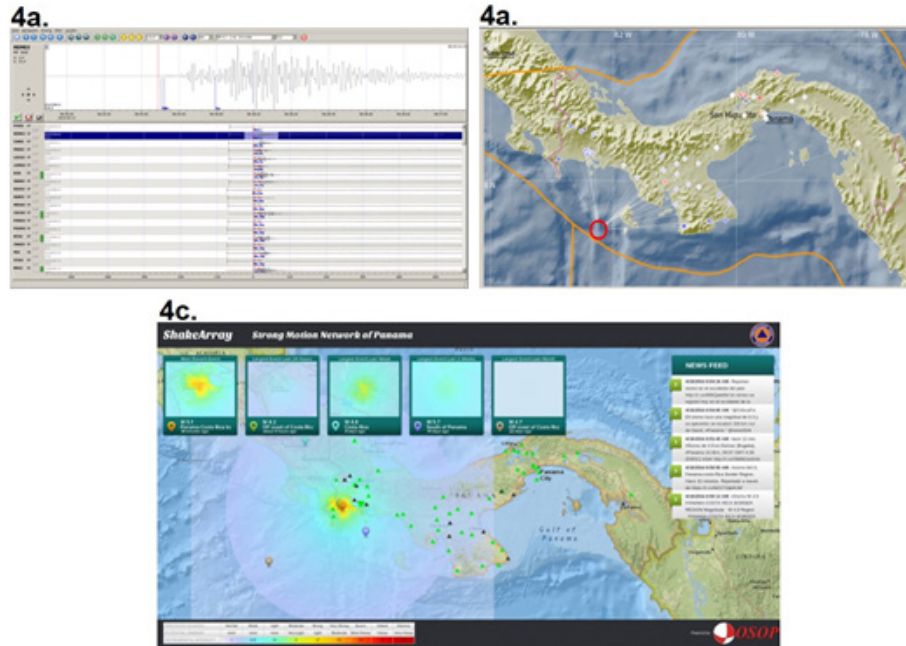


Figura 4. Registro, localización y reporte del sismo de mayo 13 de 2014 con magnitud 6.8Mw en la provincia de Chiriquí, Panamá. a) Registro del sismo, b) localización del evento (los puntos de colores corresponden a las estaciones sísmicas), y c) shakmap del evento reportado por SINAPROC a partir de los parámetros estimados por SeisComp del IGC-UPA (modificado de Pérez, 2014b).

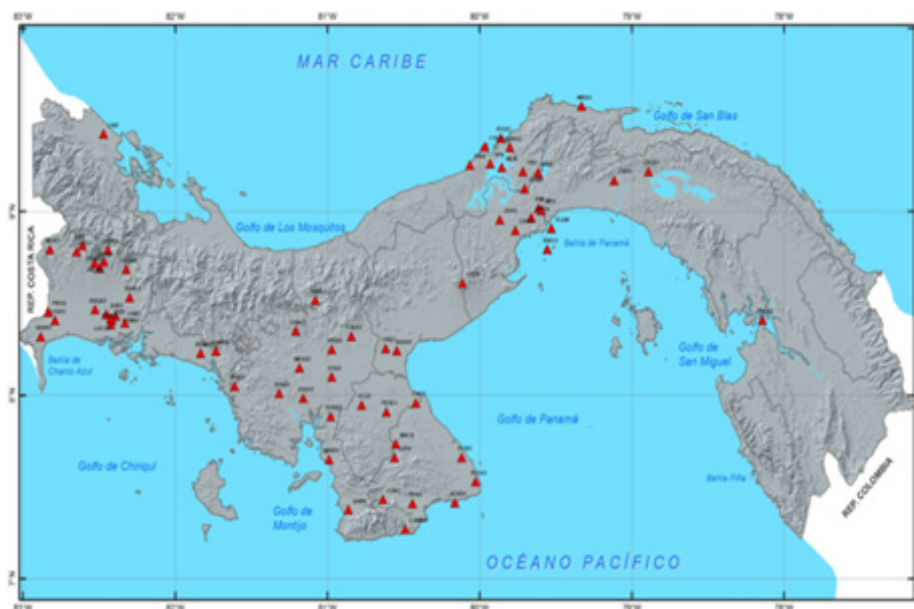


Figura 5. Distribución de estaciones sísmicas en Panamá hasta el año 2014.

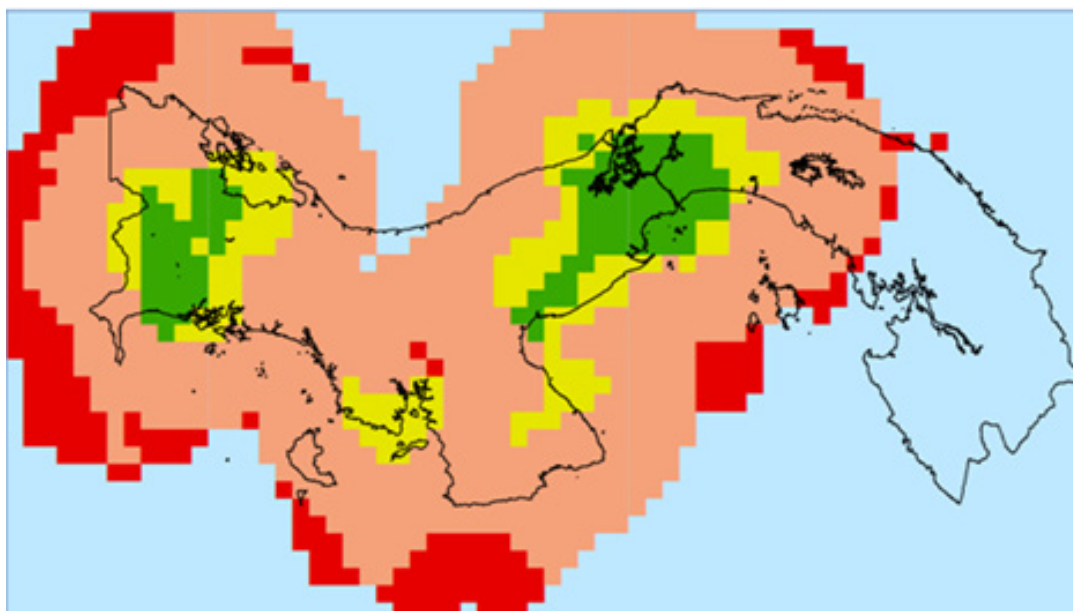


Figura 6. El color verde corresponde a la densidad de detección de eventos sísmicos en Panamá antes del año 2012 (imagen por cortesía del Dr. Wilfried Strauch).

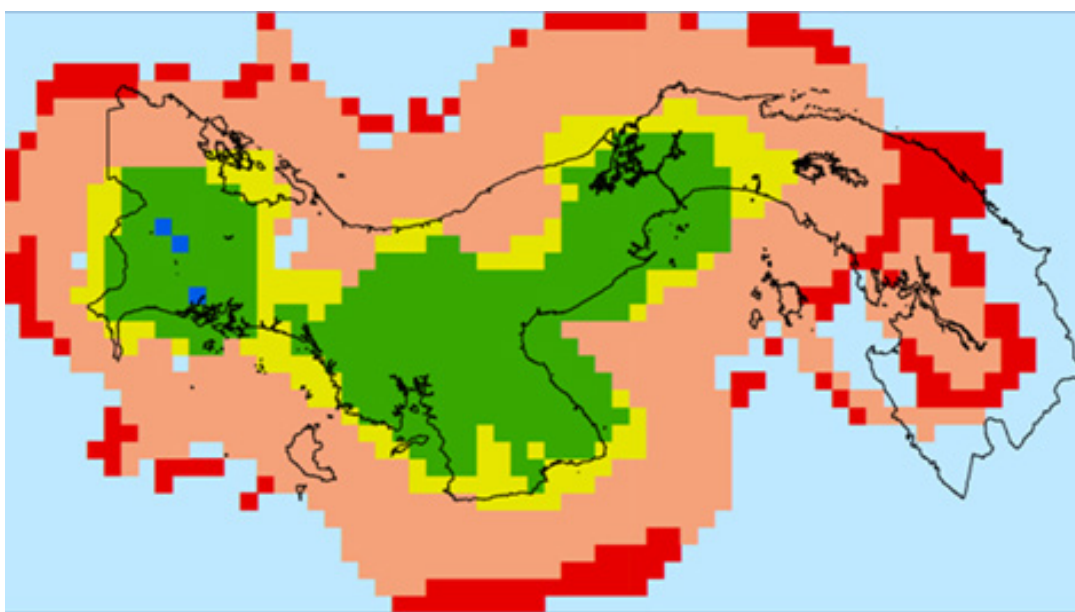


Figura 7. Incremento de las detecciones de eventos sísmicos después del año 2012 (imagen por cortesía del Dr. Wilfried Strauch).

Un caso que no es propio de América Central pero que vale la pena mencionar, es el de la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM), donde en el primer cuatrimestre de 2015 se realizó una instalación piloto que a la fecha sigue en periodo de prueba ya que se están realizando mejoras para configurar el sistema a las condiciones sismotectónicas locales. Una de ellas, por ejemplo, es integrar dos modelos de velocidad local para Baja California, uno para el macizo rocoso peninsular (Nava y Brune, 1982) y otro para el valle de Mexicali (McMechan y Mooney, 1980), con lo que se mejorarán las localizaciones de los eventos, sustituyendo el modelo global laspei91. Otro aspecto importante del funcionamiento de SeisComP en RESNOM, fue corroborar que para un conjunto de eventos con los que se realizaron pruebas fueron detectados en menor tiempo respecto al Jiggle (<http://pasadena.wr.usgs.gov/jiggle/>) que es el sistema de procesamiento en tiempo real, que por ahora es el principal en esta red (Wong et al., 2015).

Conclusiones

La vigilancia sísmica exige sistemas de procesamiento sísmológico altamente eficientes y una red combinada de equipos sísmicos (de periodo corto y banda ancha), geodésicos y mareográficos (si es el caso), que cubran principalmente las zonas donde estudios científicos las hayan identificado como sismogénicas. Por lo tanto, desde el punto de vista instrumental, es importante para la alerta sísmica temprana contar con una red densa de equipos de monitoreo ubicados preferiblemente en las áreas que sean susceptibles de experimentar movimientos fuertes del terreno, aunque también deben tenerse en cuenta los eventos de tamaño moderado por desconocerse la historia sísmica en tiempos remotos.

SeisComP debería implementarse de manera amplia en los observatorios sísmológicos de Latinoamérica, por dos razones básicas: la primera porque al ser de libre acceso resulta favorable para estas instituciones, ya que no habría necesidad de invertir en desarrollar o comprar un software para monitoreo en tiempo real y/o para la alerta temprana; más bien, podría orientarse la inversión para la adquisición de nuevos equipos para densificar las redes en operación. La segunda razón es por su calidad tecnológica, descrita de manera general en este trabajo. Es importante tener en cuenta que SeisComP se orienta a la defensa civil y/o a la alerta sísmica temprana, por lo tanto, el uso de una u otra modalidad, depende de las necesidades, misión y visión de las instituciones geofísicas.

Agradecimientos

Sinceros agradecimientos a la compañía Observatorio Sísmico del Occidente de Panamá (OSOP), por compartir sus conocimientos sobre SeisComP, al Dr. Wilfried Strauch del INETER, por compartir sus apreciaciones sobre la misión y visión de la Alerta Temprana Sísmica y de Tsunami en América Central. También sincero agradecimiento a un revisor anónimo por sus sugerencias técnicas y al Dr. Luis Delgado por su disponibilidad en el seguimiento de este escrito.

Referencias

- Allen, R. (1978). Automatic earthquake recognition and timing from single traces. Bull. Seism. Soc. Am. Vol, 68, 1521-1532.
- Allen, R., Kanamori, H. (2003). The potential for earthquake early warning in Southern California. Science, Vol, 300, 786-789.
- Baer, M., Kradolfer, U. (1987). An automatic phase picker for local and teleseismic events, Bull. Seism. Soc. Am. Vol, 77, 1437-1445.

- Behr, Y., Clinton, J., Cauzzi, C., Hauksson, E., Jónsdóttir, K., Marius, C., Pinar, A., Salichon, J., Sokos, E. (2016). The virtual seismologist in the SeisComP3: A new implementation strategy for earthquake early warning algorithms. *Seism. Res. Lett.* Vol, 87(2A), 363-373.
- Bratt, S., Bache, T. (1988). Locating events with a sparse network of regional arrays, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol, 78, 780–798.
- Bormann, P., Saul, J. (2008). The new IASPEI standard broadband magnitude mB. *Seism. Res. Lett.* Vol, 79(5), 698–705.
- Böse, M., Ionescu, C., Wenzel, F. (2007). Earthquake early warning for Bucharest, Romania: Novel and revised scaling relations. *Geophys. Res. Lett.* 34, 6.
- Chen, D., Hsiao, N., Wu, Y. (2015). The earthworm based earthquake alarm reporting system in Taiwan, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 105, 568–579.
- Cua, G. B. (2005). Creating the Virtual Seismologist: Developments in Ground Motion Characterization and Seismic Early Warning, Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, 367.
- Cua, G., Heaton, T. (2007). The Virtual Seismologist (VS) method: A Bayesian approach to earthquake early warning, in *Earthquake Early Warning Systems*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 97-130.
- Cua, G., Fischer, M., Heaton, T., Wiemer, S. (2009). Real-time performance of the Virtual Seismologist earthquake early warning algorithm in southern California, *Seismol. Res. Lett.* Vol 80(5), 740-747.
- Di Stefano, R., Aldersons, F., Kissling, E., Baccheschi, P., Chiarabba, C., Giardini, D. (2006). Automatic seismic phase picking and consistent observation error assessment: application to the Italian seismicity. *Geophys.* 165, 121-134.
- Doi, K. (2011). The operation and performance of earthquake early warnings by the Japan Meteorological Agency, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 31, 119-126.
- Espinosa A., Jiménez, A., Ibarrola, G., Alcantar, F., Aguilar, A., Inostroza, M., Maldonado, S. (1995). Mexico City seismic alert system. *Seism. Res. Lett.* Vol, 66, 42-53.
- Ethz. (2016). <http://www.seismo.ethz.ch/research/groups/alrt/projects/seiscomp3/index>
- Geofon-Gfz. (2016). <http://geofon.gfz-potsdam.de/software/seiscomp/>
- Gempa. (2016). <http://www.gempa.de/products/seiscomp3/>
- Suárez, G., Novelo, D., Mansilla, E. (2009). Performance evaluation of the seismic alert system (SAS) in Mexico City: A seismological and a social perspective, *Seismol. Res. Lett.* 80, 707–716.
- Hoshiba, M., and T. Ozaki (2013). Earthquake early warning and tsunami warning of the Japan Meteorological Agency, and their performance in the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku earthquake (Mw 9.0), in *Early Warning for Geological disasters Scientific Methods and Current Practice*, J. Zschau and F.Wenzel (Editors), Springer, Berlin, Germany, 1-28.

- Hoshiba, M., Iwakiri, K., Hayashimoto, N., Shimoyama, T., Hirano, K., Yamada, Y., Ishigaki, Y., Kikuta, H. (2011). Outline of the 2011 Off the Pacific coast of Tohoku earthquake (Mw 9.0) earthquake early warning and observed seismic intensity, *Earth Planets Space* 63, 547-551.
- Iervolino I., Manfredi G., Cosenza E. (2007). Earthquake early warning and engineering application prospects. *Library of congress: Earthquake early warning systems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 233-247.
- Kanamori, H., Hauksson, E., Heaton, T. (1997). Real-time seismology and earthquake hazard mitigation. *Nature*, 390, 461-464.
- Kanamori, H. (2007). Real-time earthquake damage mitigation measures. *Sesimological Laboratory, California Institute of Technology Pasadena, CA, USA. Library of congress: Earthquake early warning systems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 249-281.
- Kennett, B., Engdahl, E. (1991). Travel for global earthquake location and phase indentification. *Geophys*, 105, 429-465.
- Kuperkoch, L., Meier, T., Diehl, T. (2011). Automated Event and Phase Identification. Bormann, P. (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2)*, 52.
- Leonard, M., Kennett, B. (1999). Multi-component autoregressive techniques for the analysis of seismograms, *Phys. Earth Planet. Inter.* 113, 247-263.
- Martínez, E., Tenorio, V., Strauch, W., Ramírez, J. (2016). Primaras experiencias del Centro de Asesoramiento de Tsunami para América Central (CATAC) en el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). *IASPEI, Asamblea Regional Comisión Latinoamericana y del Caribe de Sismología – LACSC*, San José, Costa Rica. Resumen.
- McMechan, A., Mooney, D. (1980). Asymptotic ray theory and synthetic seismograms for laterally varying structures: theory and application to the Imperial Valley, California, *Bull. seism. Soc. Am. Vol*, 70, 2021-2035.
- Nava, A., Brune, J. (1982). An earthquake explosion reversed refraction line in the Peninsular Ranges of southern California and Baja California Norte. *Bull. Seism. Soc. Am. Vol*, 63, 1689-1698.
- Nakamura, Y. (2007). UreDAS, the earthquake warning system: Today and tomorrow. *Library of congress: Earthquake early warning systems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 249-281.
- Odaka, T., Ashiya, K., Tsukada, S., Sato, S., Ohtake, K., Nozaka, D. (2003). A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record. *Bull. Seism. Soc. Am. Vol*, 93, 526-532.
- Osamu, K., Makoto, S., Keiji, D., Toshiyuki, M., Shin'ya, T., Kiyoshi, T., Toshihiro, S., Kouji, N., Masashi, K. Yukihiro, W., (2009). Earthquake early warning in Japan: Warning the general public and future prospects, *Seismol. Res. Lett.* 80, 717-726.
- Oliveri, M., Clinton J. (2012). An Almost Fair comparison between Earthworm and SeisComp3. *Electronic Seismologist*, Vol, 83. No. 4, 720-727.

- Pérez, J.L. (2014a). Comparación del sistema manual y automático para localizaciones de eventos sísmicos en la red sismológica de Panamá (OSOP), 25. URL: <http://www.osop.com.pa/wp-content/uploads/2014/03/Documento1.pdf>
- Pérez, J. L. (2014b). Implementación y afinación de ShakeMap para Latinoamérica, el caso de Panamá, (OSOP), 28. URL: <http://www.osop.com.pa/wp-content/uploads/2014/06/ShakeMap-Doc.pdf>
- Pesaresi, D. (2011). The EGU2010 SM1.3. Seismic centers data acquisition session: an introduction to Antelope, Earthworm and SeisComP, and their use around the World. *Annals of Geophysics*. Vol, 54(1), 7.
- Picozzi, M., Emolo, A., Martino, C., Zollo, A., Miranda, N., Verderame, G., Boxberger, T., the REAKEK Working Group (2015). Earthquake early warning system for schools: A feasibility study in southern Italy, *Seismol. Res. Lett.* 86, 397-411.
- Strauch, W., Acosta, A., García, F., Grillo, U., Mendoza, E., Morales, A., Ñamendi, D., Ramírez, J., Sang, W., Talavera, E., Tenorio, V. (2016). Status of the Nicaraguan Seismic Network. IASPEI, Asamblea Regional Comisión Latinoamericana y del Caribe de Sismología – LACSC, San José, Costa Rica. Resumen.
- Teng, T., Wu, Y., Shin, T., Tsai, Y., Lee, W., (1997). One minute after: strong-motion map, effective epicenter, and effective magnitude. *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol, 87, 1209-1219.
- Wong, V., López, A., Pérez, L. (2015). Implementación del sistema automático de monitoreo sísmico SeisComP. Reporte interno de RESNOM, 30.
- Wu, Y., Teng, T. (2002). A virtual sub-network approach to earthquake early warning. *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol, 92, 2008-2018.
- Wu, Y., Zhao, L. (2006). Magnitude estimation using the first three seconds P-wave amplitude in earthquake early warning. *Geophys. Res. Lett.* 33, L16312.
- Zollo, A., Lancieri, M., Nielsen, S. (2006). Earthquake magnitude estimation from peak amplitudes of very early seismic signals on strong motion records, *Geophys. Res. Lett.* 33, L23312.
- Zhang, H., Jin, X., Weu, Y., Li, J., Kang, L., Wang, S., Huang, L., Peiqing, Y. (2016). An Earthquake early warning system in Fujian, China. *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol, 106(2), 755-765.

Manuscrito recibido: 30 mayo de 2016

Recepción del manuscrito corregido: 22 de febrero de 2017

Manuscrito aceptado: 24 de febrero de 2017

La Olimpiada XXI de Ciencias de la Tierra: Energía

Frez, J. y D. Peralta

División de Ciencias de la Tierra, CICESE, Ensenada, Baja California, México

Presentación

Dada la actualidad del tema, la División de Ciencias de la Tierra del CICESE pensó que la energía en el mundo actual es de tal importancia que amerita ser tema general para las Olimpiadas XXI, ampliando el de la Olimpiada anterior, "Geotermia". Este documento presenta esta sección con generalidades, para proseguir con la Guía de Estudio con un resumen de la materia que los estudiantes participantes usan como base de preparación para la competencia. Enseguida, el texto del examen con los 20 problemas nuevos. Para terminar, presentamos la estadística desde el año 2009 con el número de estudiantes participantes y las tres calificaciones máximas, ambos rubros según las procedencia (municipios) correspondientes.

Guía de Estudio

Energía

"La cuestión no es descubrir cómo producir más y más energía, sino cómo evitar necesitar cada vez mayores cantidades de la misma, aprovechando eficaz y racionalmente las fuentes renovables que nos ofrece la Naturaleza." (Ideario del Centro de Estudios de la Energía Solar, España).

El tema acerca de los tipos de energía que utiliza la civilización humana tiene una literatura muy amplia. Muchos resúmenes y descripciones detalladas pueden encontrarse fácilmente en Internet, particularmente en Wikipedia, buscando los títulos de los diferentes tipos de energía que, con mayor o menor detalle, aparecen en estas Notas (eólica, solar, geotérmica, marina, saltos de agua, fósiles, nucleares, hidrógeno). También, el interesado puede hacer búsquedas exitosas en YouTube.

Definiciones Básicas y Generalidades

La energía puede entenderse como el trabajo realizado por un movimiento al vencer a una fuerza. De este modo, energía y trabajo tienen la misma unidad de medida. Según lo anterior, tenemos, en valor absoluto, que

Trabajo = Fuerza x Desplazamiento = Energía;

es decir, necesitamos energía para desplazar un cuerpo en contra de una fuerza que, en principio, lo impide. Debido a su importancia en distintos aspectos de la sociedad humana, existen diversas unidades para medir los correspondientes tipos de energía: caloría, kWh (kilovatio hora), tonelada equivalente de petróleo o de carbón, electronvoltio, ergio, pie por libra, caballo de fuerza por hora, entre otros. Las unidades físicas en los sistemas de unidades estándares son 1 julio = 1 newton x metro (MKS) y 1 ergio = 1 dina x cm (cgs). Llamando potencia a la capacidad para producir trabajo por unidad de tiempo, de donde potencia = energía/tiempo con la unidad más común 1 W = 1 Julio/s = 1 N-m/s (W: vatio o watt; N: newton; s: segundo).

Hay diversos tipos de energía dependiendo del tipo de fuerza asociado: gravitacional, fricción, eléctrico, magnético, calor, eólico, atómica, nuclear fuerte o débil, etc. Quizás la fuerza más universal que impide un desplazamiento es la fricción que aparece cuando un móvil entra en contacto con algún material durante el movimiento; por ejemplo, contacto con el aire de un proyectil o avión; con el asfalto de la carretera, en el caso de un automóvil.

Debemos recordar que la energía, en general, se disipa ya sea por la fricción y porque un cuerpo caliente tiende a enfriarse por la, generalmente, menor temperatura ambiente. Este efecto es también de degradación ya que esta energía disipada ya no se recupera y sólo puede disminuir, por ejemplo, en el diseño de máquinas. No menos importante es que el uso de energía produce residuos que se pueden o no reutilizar, por ejemplo, produciendo abonos o reciclando los desechos para reincorporarlo al ciclo económico.

Lo anterior nos conduce a los dos principios de la termodinámica en que el primero simplemente indica que el calor es una forma de energía y que el total de ella, en sistemas aislados, se conserva. El segundo principio considera lo dicho en el párrafo anterior. Todo proceso de la naturaleza por el cual se transforma calor procedente de un foco caliente en trabajo mecánico requiere la cesión de una parte del calor absorbido a un elemento frío; esa parte de la energía no se aprovecha. Así, la máquina tiene una eficiencia que se mide del modo siguiente:

$$R = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

en que Q_2 es la parte de la energía Q_1 que se disipa y no se aprovecha. La segunda ley de la termodinámica indica una dirección en que los procesos termodinámicos se desarrollan y la imposibilidad de que ocurran en el sentido contrario (por ejemplo, en un problema

puramente mecánico, que una mancha de tinta dispersada en el agua pueda volver a concentrarse en un pequeño volumen). También establece, en algunos casos, la imposibilidad de convertir completamente toda la energía de un tipo en otro sin pérdidas. De esta forma, la segunda ley impone restricciones para las transferencias de energía que hipotéticamente pudieran llevarse a cabo teniendo en cuenta el primer principio. Esta ley cuantifica la existencia de una magnitud física llamada entropía, de tal manera que, para un sistema aislado (que no intercambia materia ni energía con su entorno), la variación de la entropía siempre debe ser mayor que cero. Podemos visualizar la entropía como la medición del desorden en un sistema y el segundo principio señala la tendencia de sistemas aislados a evolucionar hacia el desorden en su estructura. Como la formación y evolución de los seres vivos lleva la tendencia a un mayor orden, la evolución pareciera ir en dirección opuesta a la señalada por el segundo principio de la termodinámica, lo que se explica porque el sistema “Tierra” no está aislado ya que recibe continuamente energía solar.

Debido a esta ley de la termodinámica, se tiene que el flujo espontáneo de calor siempre es unidireccional, desde los cuerpos de mayor temperatura hacia los de menor temperatura, hasta lograr un equilibrio térmico. Su aplicación más conocida es la de las máquinas térmicas, que obtienen trabajo mecánico mediante aporte de calor de una fuente o foco caliente, para ceder parte de este calor al foco o sumidero frío. La diferencia entre los dos calores tiene su equivalente en trabajo mecánico. Existen varios enunciados equivalentes para definir este principio, destacándose el de Clausius y el de Kelvin.

Enunciado de Clausius.- No es posible ningún proceso cuyo único resultado sea la extracción de calor de un recipiente a una cierta temperatura y la absorción de una cantidad igual de calor por un recipiente a temperatura más elevada.

Enunciado de Kelvin.- No existe ningún dispositivo que, operando por ciclos, absorba calor de una única fuente (energía absorbida), y lo convierta íntegramente en trabajo (energía útil).

Energía Cinética y Potencial

La energía cinética de una partícula en movimiento se mide por la expresión $\frac{1}{2}mv^2$ donde m es la masa y v es su velocidad. En el caso de varios cuerpos, la energía cinética total es la suma correspondiente. La energía potencial es aquella que mide la capacidad que tiene un sistema para realizar un trabajo en función de la posición de una carga o configuración de cargas en el campo de fuerzas correspondiente; en el caso de energía potencial elástica, es la energía acumulada en un cuerpo sometido a una deformación elástica. Así, por ejemplo, una masa m colocada a cierta altura con respecto al nivel del mar tiene la energía potencial gravitatoria correspondiente mgh , siendo h la altura y g , la aceleración de gravedad; esta energía se convierte en cinética $\frac{1}{2}mv^2$ en una caída libre. Con estas expresiones, podemos calcular la velocidad a cada altura de un cuerpo en caída libre desde la altura inicial en que estaba en reposo. La energía potencial puede pensarse también como la energía almacenada en un sistema y como una medida del trabajo que ese sistema puede entregar. En las expresiones anteriores, se supone que las alturas son pequeñas con respecto al radio de la Tierra (¿por qué?).

Energía y el Planeta Tierra.

Desde el inicio de la historia humana, hemos utilizado el trabajo de otras personas, de animales, carretas y de otros medios de transporte, además de máquinas para obtener energía útil. Lo anterior significó el uso del conocimiento de cómo funcionan los recursos naturales: viento, calor del sol, ríos, corrientes marinas, etc. para hacer la tarea correspondiente. Por ejemplo, el conocimiento de la secuencia de las estaciones sirve para prever la emigración de animales para

la caza así como para planear la recolección de productos vegetales y, posteriormente en la historia, en las tareas de la agricultura y ganadería. Económicamente, los productos del trabajo humano se obtuvieron e intercambiaron a través de la recolección y del trueque; posteriormente, por el poder de compra, la dominación política-económica y la guerra.

Podemos separar las distintas fuentes de energía de la Tierra en procesos que permitieron el origen de la vida así como la evolución y el mantenimiento individual y colectivo de los seres vivos. Finalmente, los hombres descubrieron que debajo de rocas sedimentarias y volcánicas pueden encontrarse carbón, gases y petróleo, los llamados combustibles fósiles que son de amplio uso.

A partir de la domesticación de animales, perros, gatos, vacunos, ovejas, etc., el hombre no sólo produce evolución (desarrollando razas como las del perro) y selección, sino que aplica lo mismo a vegetales tales como las gramíneas, frutas, papas, etc. El hombre primitivo descubre pronto la rotación de cultivos, una de las primeras medidas para recuperar el ambiente de la explotación depredadora de los recursos naturales. Todo ello, resulta en máquinas y en el nacimiento de la economía desde el trueque y sigue con la invención del dinero, la división del trabajo, salarios, comercio marítimo, por tierra y por aire, además de impuestos, etc.

El uso de fuentes de energía acompaña las primeras etapas de la historia humana desde su búsqueda para propósitos de alimentación (caza y recolección) y sigue con la invención de diversos modos para mantener e incrementar la producción, incluyendo las primeras máquinas aplicables a la economía y a la guerra: ruedas, poleas, palancas, armas de diversos tipos, animales de carga, riego y abonos para la agricultura y cría de ganadería, con la domesticación de animales. Lo anterior lleva a la navegación en ríos, mares y aire.

Los movimientos de nuestro planeta (rotación y traslación) así como la inclinación del eje polar con respecto al plano orbital crea los ciclos de la agricultura y los movimientos de los animales de caza. Alrededor del ciclo de crecimiento y decrecimiento del río Nilo se formó la primera gran civilización, la del antiguo Egipto. En lo que sigue, presentamos un resumen relacionado con las fuentes naturales de energía que son aprovechadas por el hombre: energía solar, eólica, marina, de saltos de agua, geotérmica y de combustibles fósiles (carbón y petróleo).

Distintos tipos de Energía

Energía Solar

El sol, fuente de vida y origen de casi todas las demás formas de energía que el ser humano ha utilizado desde los albores de la historia, puede satisfacer todas nuestras necesidades si aprendemos cómo aprovechar en forma racional la energía que continuamente derrama sobre el planeta. Ha brillado en el cielo desde hace unos cinco mil millones de años y se calcula que todavía no ha llegado ni a la mitad de su existencia. Durante el presente año, por ejemplo, el Sol arrojará sobre la Tierra cuatro mil veces más energía que la que vamos a consumir.

La energía solar es una energía renovable, obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol. La radiación solar que alcanza la Tierra ha sido aprovechada por el ser humano desde la Antigüedad, mediante diferentes tecnologías en continua evolución. En la actualidad, el calor y la luz del Sol puede aprovecharse por medio de diversos captadores como células fotovoltaicas, helióstatos o colectores térmicos, pudiendo transformarse en energía eléctrica o térmica. Es una de las llamadas energías renovables o limpias.

Las diferentes tecnologías solares se pueden clasificar en pasivas o activas según cómo capturan, convierten y distribuyen la energía solar.

Las tecnologías activas incluyen el uso de paneles fotovoltaicos y colectores solares térmicos para recolectar la energía. Entre las técnicas pasivas, se encuentran diferentes técnicas enmarcadas en la arquitectura: la orientación de los edificios al Sol, la selección de materiales con una masa térmica favorable o que tengan propiedades para la dispersión de luz, así como el diseño de espacios mediante ventilación natural.

La Tierra recibe 174 petavatios (1 peta= 10^5) de radiación solar entrante desde la capa más alta de la atmósfera. Aproximadamente, el 30% regresa al espacio, mientras que las nubes, los océanos y las masas terrestres absorben la restante. El espectro electromagnético de la luz solar en la superficie terrestre lo ocupa principalmente la luz visible y los rangos de infrarrojos con una pequeña parte de radiación ultravioleta. La fotosíntesis (*defina fotosíntesis*) captura aproximadamente 3000 EJ por año en biomasa, lo que representa solo el 0,08 % de la energía recibida por la Tierra (1 Exajoule = 1EJ = 10^5 joules).

Clasificación por tecnologías y el correspondiente uso más general

Energía solar activa: para uso a) de baja temperatura (entre 35°C y 60°C), se utiliza en casas; b) de media temperatura, alcanza los 300°C; y c) de alta temperatura, llega a alcanzar los 2000°C. Esta última, se consigue al incidir los rayos solares en espejos, que van dirigidos a un reflector que lleva a los rayos a un punto concreto. También puede ser por centrales de torres y por espejos parabólicos.

Energía solar pasiva: Aprovecha el calor del sol sin necesidad de mecanismos o sistemas mecánicos.

Energía solar térmica: Es usada directamente para producir agua caliente de baja temperatura para uso sanitario y de calefacción.

Energía solar fotovoltaica: Es usada para producir electricidad mediante placas de semiconductores que se alteran con la radiación solar.

Energía termosolar de concentración: Produce electricidad con un ciclo termodinámico convencional a partir de un fluido calentado a alta temperatura (aceite térmico).

Energía solar híbrida: Combina la energía solar con otra energía. Según la energía con la que se combine es una hibridación:

Renovable: por ejemplo, si se combina con energía eólica.

No renovable: si se combina con combustible fósil.

Energía eólica solar: funciona con el aire calentado por el sol, que sube por una chimenea donde están los generadores.

Según informes de Greenpeace, la fotovoltaica podrá suministrar electricidad a dos tercios de la población mundial en 2030. Y según un estudio publicado en 2007 por el Consejo Mundial de Energía, para el año 2100 el 70% de la energía consumida será de origen solar. (El estudiante puede averiguar en Wikipedia la tendencia a la baja de los precios de la energía solar fotovoltaica).

A finales de 2015, se habían instalado en todo el mundo cerca de 230 GW de potencia fotovoltaica, convirtiendo a la fotovoltaica en la tercera fuente de energía renovable más importante en términos de capacidad instalada a nivel global, después de las energías hidroeléctrica y eólica, y supone ya una fracción significativa en la Unión Europea, cubriendo, en promedio, el 3.5% de la demanda de electricidad y alcanzando el 7% en los períodos de mayor producción (*Averigue el valor de 1 GW o del factor 1G*).

Energía Eólica.

La energía eólica es una energía renovable madura ya que la tecnología se encuentra a niveles de desarrollo avanzado. Muchos países en el mundo, incluyendo a México, están apostándole fuertemente a esta tecnología para

lograr producir al menos el 35% de su energía a través de fuentes renovables para 2024. Sin embargo, para poder maximizar el rendimiento de turbinas eólicas, es importante seleccionar los sitios de desarrollo de forma cuidadosa, como se indica en uno de los videos que se menciona más abajo. (*Investiguen las características de los vientos en zonas costeras (entre 3 km tierra adentro y 20 km mar adentro, con referencia a la línea de costa) y expliquen por qué en zonas costeras bien seleccionadas, la energía producida podría llegar a ser dos veces mayor que tierra adentro*).

Las primeras referencias de este recurso natural se relacionan con embarcaciones egipcias del siglo V AC y con otras culturas antiguas como la china, babilónica y persa, que la empleaban en las molindas y sistemas de riego. Después, los europeos introdujeron cambios en el diseño de los molinos, extendiéndose su uso por todo el mundo occidental. Junto al florecimiento de las civilizaciones, la fuerza del viento impulsa grandes embarcaciones, sistemas de riego y molinos.

La energía eólica es una energía renovable madura ya que la tecnología se encuentra a niveles de desarrollo avanzado. Para entender cómo se produce energía a través del viento, pueden ver los siguientes dos videos:

<https://www.youtube.com/watch?v=pO3bTdbdtFU>

<https://www.youtube.com/watch?v=UV3yLeu4OAY>

¿Cómo se aprovecha?

Se usa para generar movimiento en algunas maquinarias. La energía eólica mueve una hélice que a su vez hace girar un rotor de generador, produciendo energía eléctrica, en este caso se habla de aerogeneradores.

Cuando se conecta a una bomba, se tiene un molino con los mismos principios de los

molinos de viento más antiguos que se conocen y cuyos pioneros fueron los persas. También se han creado las aerobombas y los molinos multipala, que extraen agua de los pozos sin otra intervención que la fuerza de los vientos.

Existen, asimismo, aerogeneradores que funcionan de forma aislada, para atender la demanda de energía en pequeñas comunidades agrícolas (riego, bombeo) e incluso con aplicaciones domésticas (aparatos eléctricos e iluminación) en lugares apartados.

Ventajas

La energía eólica no contamina, es inagotable y frena el agotamiento de combustibles fósiles contribuyendo a reducir el cambio climático. Es una tecnología de aprovechamiento totalmente madura y puesta a punto.

Es una de las fuentes más baratas, puede competir en rentabilidad con otras fuentes energéticas tradicionales como las centrales térmicas de carbón (considerado tradicionalmente como el combustible más barato), las centrales de combustible e incluso con la energía nuclear, si se consideran el costo de reparar los daños medioambientales.

Generar energía eléctrica sin que exista un proceso de combustión o una etapa de transformación térmica supone, desde el punto de vista medioambiental, un procedimiento muy favorable por ser limpio, exento de problemas de contaminación, etc. Se suprimen radicalmente los impactos originados por los combustibles durante su extracción, transformación, transporte y combustión, lo que beneficia la atmósfera, el suelo, el agua, la fauna, la vegetación, etc.

La utilización de la energía eólica para la generación de electricidad presenta nula incidencia sobre las características fisicoquímicas del suelo o en erosión, ya que no se produce ningún contaminante que incida sobre este medio, ni tampoco vertidos, o grandes

movimientos de tierras.

Al contrario de lo que puede ocurrir con las energías convencionales, la energía eólica no produce ningún tipo de alteración sobre los acuíferos ni por consumo, ni por contaminación por residuos o vertidos. La generación de electricidad a partir del viento no produce gases tóxicos, ni contribuye al efecto invernadero, ni a la lluvia ácida. No origina productos secundarios peligrosos ni residuos contaminantes. Cada kW/h de electricidad, generada por energía eólica en lugar de carbón, evita:

0,60 kg	CO ₂ , dióxido de carbono
1,33 gr	SO ₂ , dióxido de azufre
1,67 gr	NO, óxido de nitrógeno.

La electricidad producida por un aerogenerador evita que se quemen diariamente miles de kilogramos de lignito negro en una central térmica. Es renovable y abundante.

En resumen,

No utiliza combustión, por lo tanto es una energía económica

Es limpia, no contamina

Aprovecha las zonas áridas por su topografía

No daña el suelo y sus fines agrícolas o ganaderos

Genera empleo

Garantiza autonomía por más de 80 horas, sin conexión a redes de suministro

Es segura y confiable

Ahorra gasto de combustible en centrales térmicas y/o hidroeléctricas

Su impacto ambiental es bajo

La energía eólica es independiente de cualquier política o relación comercial; se obtiene en forma mecánica y, por tanto, es directamente utilizable. En cuanto a su transformación en electricidad, ésta se realiza con un rendimiento excelente y no a través de aparatos termodinámicos con un rendimiento de Carnot siempre pequeño.

Al finalizar la vida útil de la instalación, el desmantelamiento no deja huellas.

Desventajas

Es discontinua, su intensidad y dirección cambian repentinamente

Depende de fuentes tradicionales para su funcionamiento

Las centrales térmicas de respaldo aumentan el consumo energético

Requiere cables de alta tensión cuatro veces más gruesos para evacuar la producción

La fluctuación en la intensidad del viento produce apagones y daños

No es almacenable

Presenta serios inconvenientes de carácter técnico en su producción

Incidencias ambientales

La necesidad de centrales térmicas genera emisiones de dióxido de carbono

Algunos parques ocupan zonas protegidas

Los aerogeneradores afectan muchas rutas migratorias de aves y murciélagos

Se produce un choque visual y paisajístico al entrar en contraste los elementos naturales horizontales con los aerogeneradores verticales y se crea el denominado efecto discoteca, que se produce con la proyección del Sol detrás de los molinos

Produce contaminación sónica.

Cálculo de la energía eólica

La energía eólica es la energía cinética de las partículas de aire que se mueven con una velocidad v . Una superficie circular de radio r , perpendicular a la dirección del viento, es atravesada durante un tiempo t por la siguiente masa de aire $m = \rho V = \rho A v t = \rho \pi r^2 v t$

Por lo tanto, la energía cinética del aire es

$$E_{cinética} = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{\pi}{2} \rho r^2 t v^3$$

con la correspondiente potencia

$$P_{viento} = \frac{E_{cinética}}{t} = \frac{\pi}{2} \rho r^2 v^3$$

Lo que nos hace prestar atención a que la potencia eólica depende del cubo de la velocidad del aire. Por lo tanto, la velocidad es el factor más importante a la hora de calcular la energía eólica.

La energía eólica se mide en Kilowatios hora (KWh) o Megawatios hora (MWh), junto con el tiempo en que se ha hecho la medición (hora, día, mes, ...). Kilo = 10^3 ; Mega = 10^6 .

La electricidad producida por un aerogenerador evita que se quemen diariamente miles de kilogramos de lignito negro en una central térmica. Un típico generador produce idéntica cantidad de energía que la obtenida por quemar diariamente 1,000 kg de petróleo. Al no quemarse, se evita la emisión de 4,109 kg de CO_2 , lográndose un efecto similar al producido por 200 árboles. Se impide la emisión de 66 kg de dióxido de azufre $-SO_2-$ y de 10 kg de óxido de nitrógeno $-NO-$ principales causantes de la lluvia ácida (*¿qué es la lluvia ácida?*).

Al finalizar la vida útil de la instalación, el desmantelamiento no deja huellas.

La energía eólica es una energía renovable madura ya que la tecnología se encuentra a niveles de desarrollo avanzado. Muchos países en el mundo, incluyendo a México, están apostando fuertemente a esta tecnología para lograr producir al menos el 35% de su energía a través de fuentes renovables para 2024. Sin embargo, para poder maximizar el rendimiento de turbinas eólicas, es importante seleccionar los sitios de desarrollo de forma cuidadosa, como se indica en el video. Investiguen las características de los vientos en zonas costeras (entre 3 km tierra adentro y 20 km mar adentro, con referencia a la línea de costa) y expliquen por qué en zonas costeras bien seleccionadas, la energía producida podría llegar a ser dos veces mayor que tierra adentro.

Saltos de Agua

Se denomina energía hidráulica, energía hídrica o hidro-energía a aquella que proviene del aprovechamiento de las energías cinética y potencial de la corriente del agua, saltos de agua o mareas. Se puede transformar a muy diferentes escalas. Existen, desde hace siglos, pequeñas explotaciones en las que la corriente de un río, con una pequeña represa, mueve una rueda de palas y genera un movimiento aplicado, por ejemplo, en molinos rurales. Sin embargo, la utilización más significativa la constituyen las centrales hidroeléctricas de represas. Es, en general, considerada un tipo de energía renovable puesto que no emite productos contaminantes. Sin embargo, produce un gran impacto ambiental debido a la construcción de las presas, que inundan grandes superficies de terreno, modifican el caudal del río y la calidad del agua.

Ventajas:

Se trata de una energía renovable de alto rendimiento energético.

Debido al ciclo del agua su disponibilidad es inagotable.

Es una energía limpia puesto que no produce emisiones tóxicas durante su funcionamiento.

Además, los embalses que se construyen para generar energía hidráulica:

Permiten el almacenamiento de agua para la realización de actividades recreativas y el abastecimiento de sistemas de riego.

Pueden regular el caudal del río evitando inundaciones en el caso de crecidas inusuales.

La gran ventaja de la energía hidráulica o hidroeléctrica es la eliminación de combustibles. El costo de operar una planta hidráulica es casi inmune a la volatilidad de los precios de combustibles fósiles como petróleo, el carbón o el gas natural evitando la necesidad de importar

combustibles de otros países.

Las plantas hidráulicas también tienden a tener vidas económicas más largas que las plantas eléctricas que utilizan combustibles. Hay plantas hidráulicas que siguen operando después de 50 a 99 años. Los costos de operación son bajos porque las plantas están automatizadas y necesitan pocas personas para su operación normal.

Como las plantas hidráulicas no queman combustibles, no producen directamente dióxido de carbono. Muy poco CO₂ es producido durante el periodo de construcción de las plantas, especialmente en comparación a las emisiones de una planta equivalente que quema combustibles.

Desventajas:

La construcción de grandes embalses puede significar la inundación de grandes y útiles extensiones de terreno, obviamente en función de la topografía del terreno, lo que podría significar pérdida de tierras fértiles y daño al ecosistema.

En el pasado, se han construido embalses que han inundado pueblos enteros. Con el crecimiento de la conciencia ambiental, estos hechos son actualmente menos frecuentes.

En cuanto a destrucción de la naturaleza, las presas y embalses pueden ser destructivos a los ecosistemas acuáticos. Por ejemplo, hay estudios que muestran que las presas en las costas de Norteamérica han reducido las poblaciones de trucha septentrional común que necesitan migrar a ciertos lugares para reproducirse. Hay estudios buscando soluciones a este tipo de problema. Un ejemplo es la invención de un tipo de escalera para los peces.

Cambia los ecosistemas en el río, aguas abajo. El agua que sale de las turbinas no tiene prácticamente sedimento. Esto puede resultar

en erosión de los márgenes de los ríos.

Cuando las turbinas se abren y cierran repetidas veces, el caudal del río se puede modificar drásticamente causando una dramática alteración en los ecosistemas.

Energía geotérmica

Los sistemas geotérmicos se encuentran en diversos ambientes geológicos. Los de tipo hidrotermal usualmente están relacionados con actividad volcánica y/o sísmica reciente y suelen hallarse cerca de los límites de las placas tectónicas o bien en puntos calientes ubicados fuera de esos límites.

Como es bien sabido, el calor se transmite por conducción, convección y radiación (el estudiante debe revisar estos medios de transmisión).

Nota. “Energía térmica” fue el tema de las Olimpiadas de 2015 (XX Olimpiada). Los estudiantes pueden consultar la correspondiente guía en el sitio de la UGM

(<http://olimpiadas.ugm.org.mx/index.php?page=olimpiadas-xx>).

Energía Mareomotriz

La energía mareomotriz es la que se obtiene aprovechando las mareas mediante su empalme a un alternador que se utiliza para generar electricidad, transformando así la energía mareomotriz en energía eléctrica, una forma energética más segura y aprovechable. Es un tipo de energía renovable, ya que la fuente de energía primaria no se agota por su explotación y es limpia ya que en la transformación energética no se producen subproductos contaminantes gaseosos, líquidos o sólidos. Sin embargo, la relación entre la cantidad de energía que se puede obtener con los medios actuales y el coste económico y ambiental de instalar los dispositivos para su proceso han impedido un aprovechamiento significativo de este tipo de

energía. Otras fuentes posibles para extraer energía del mar son las olas, de la diferencia de temperatura entre la superficie y las aguas profundas del océano, el gradiente térmico oceánico, de la salinidad, de las corrientes marinas y de la energía eólica marina.

Los generadores de corriente de marea hacen uso de la energía cinética del agua en movimiento en las turbinas de la energía, de manera similar al viento (aire en movimiento) que utilizan las turbinas eólicas. Este método está ganando popularidad debido a los costos más bajos y a un menor impacto ecológico en comparación con las presas de marea, las que ocasionan que el agua suba 10 metros a nivel del mar sobre lo normal. Las presas de marea hacen uso de la energía potencial que existe en la diferencia de altura entre las mareas altas y bajas. Estas presas son esencialmente diques en todo el ancho de un estuario, y sufren los altos costos de la infraestructura civil, la escasez mundial de sitios viables y cuestionamientos ambientales.

El siguiente video introduce un número importante de tecnologías de conversión de energía marina: <https://www.youtube.com/watch?v=24iUw3KmL5c>. Busquen información que les permita explicar cuáles son los mecanismos de transformación a energía eléctrica. Investiguen el potencial energético marino del país para las diferentes fuentes de energía que se mencionan (mareomotriz, corrientes marinas, corrientes de marea, gradientes de salinidad, gradientes de temperatura, energía eólica de altamar y producción de biocombustibles a partir de algas marinas). Elaboren sobre posibles recomendaciones que ayudarían a acelerar el desarrollo y/o implementación de estas tecnologías en México. Por ejemplo, estudien documentos sobre la transición energética y las reformas a las leyes, y cómo permitirían alcanzar los objetivos de generación de energía por tecnologías limpias, o de qué manera ayudan a la implementación de la iniciativa de la ONU de acceso equitativo a energía moderna y mitigación

de cambio climático (ver página de noticias de la ONU: <http://www.un.org/news/>).

Combustibles Fósiles

Constituyen actualmente la principal fuente de fuentes de energía. Se han convertido en sinónimo de la vida industrial moderna desde el siglo XIX por sus múltiples aplicaciones en una enorme variedad de productos y servicios que utilizan las personas en su vida común. Plantas y animales prehistóricos poblaron el planeta hace cientos de millones de años, en medio de un clima más cálido que el actual y acompañados de organismos oceánicos. Tras la muerte de todas aquellas plantas y seres prehistóricos, sus cuerpos se descompusieron, quedando enterrados bajo capas de lodo, arena y roca. Con el paso del tiempo, la exposición al calor y la presión en la corteza terrestre formaron lo que ahora conocemos como un combustible fósil.

Existen tres tipos principales de combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural.

Carbón. Mayormente, las plantas terrestres forman el carbón, el primer combustible fósil que se usó. Es un recurso abundante en el planeta y está compuesto en su mayor parte por carbono. Se obtiene por medio de la minería de superficie o de profundidad. Tiene varias ventajas, incluyendo la posibilidad de modificarlo. Por ejemplo, puede licuarse para producir aceite crudo sintético, o ser gasificado para formar un combustible parecido al gas natural.

Petróleo. Está compuesto por una mezcla de hidrocarburos, oxígeno, nitrógeno y una pequeña cantidad de azufre. Se trata de un combustible líquido que incluye a todos los combustibles fósiles de hidrocarburos líquidos y puede referirse al crudo o a los productos derivados hechos del petróleo crudo refinado. Se recupera por medio de la perforación de pozos a través de barreras de roca no porosas, que retienen el petróleo.

Gas natural. Es una mezcla incolora de gases de hidrocarburos compuesta principalmente de metano. Es el último combustible fósil utilizado y es una importante fuente de energía. Es necesario perforar las reservas subterráneas para adquirirlo y, después de ello, se almacena en grandes cavernas para usarlo cuando es necesario.

Los combustibles fósiles son fuente de energía básica en el sector industrial. Tienen aplicaciones en: a) la industria del transporte porque proveen energía a los autos, aviones y barcos para moverse, en la industria energética debido a su uso como recurso que genera electricidad y hasta en la industria cosmética porque muchísimos productos, como cremas, jabones, perfumes y otros cosméticos, contienen algún derivado de combustibles fósiles. El petróleo puede convertirse en fertilizantes, en ropa, en cepillos de dientes y en gasolina. Son también útiles en empresas y hogares para calentarse y cocinar. El carbón, un recurso al alcance de casi cualquier persona, se utiliza como fuente de energía para la calefacción de los hogares y para preparar comida.

Ventajas de los combustibles fósiles. El hecho de que su uso sea tan extendido entraña una serie de ventajas importantes para continuar con la extracción y aplicación de los combustibles fósiles. La primera, y quizá más importante, reside en la abundancia y accesibilidad de las reservas, por lo que las plantas de energía eléctrica pueden proveer una gran cantidad de electricidad para todo el mundo. También proporcionan bastante energía a un costo relativamente bajo y su transporte es básicamente poco complicado.

Desventajas de los combustibles fósiles. Cuando se queman, los combustibles fósiles liberan a la atmósfera altos niveles de dióxido de carbono, que es uno de los principales factores que conducen a la contaminación del aire y al cambio climático. Uno de los recursos más problemáticos es el carbón, pues la liberación

de los contaminantes por causa de su quema se precipitan a la Tierra como lluvia ácida. Por otra parte, preocupa su condición no renovable pues, aunque se renuevan en forma natural, es por medio de un proceso que tarda millones de años y no puede ser reemplazado para uso de las generaciones más próximas.

Combustibles Nucleares

(Vean <http://www.bioenciclopedia.com/combustibles-nucleares/>)

Los combustibles nucleares son materiales que pueden ser “quemados” por fisión o fusión nuclear para producir energía. La energía nuclear es aquella que se libera mediante la división o unión de los núcleos atómicos. La fisión consiste en un proceso de desintegración radioactiva en el cual el núcleo de una partícula se divide en núcleos más ligeros, lo que produce neutrones y fotones libres y libera muchísima energía. La fusión es una reacción nuclear en la que dos o más núcleos atómicos chocan a velocidades rápidas y se unen, formando un nuevo tipo de núcleo atómico. Los principales combustibles nucleares son el uranio y el plutonio, que son metales radioactivos.

Actualmente, la energía nuclear provee el 10% de la electricidad en todo el mundo, necesaria para los sectores industriales, económicos y para el ámbito doméstico. La medicina usa la energía nuclear en el diagnóstico y tratamiento de algunas patologías, mediante el uso de la radiación, por ejemplo, del cáncer.

Ventajas de los combustibles nucleares. Este tipo de combustible no produce dióxido de carbono ni dióxido de azufre, y ésta es la principal ventaja de su uso. En adición, una planta nuclear generadora de electricidad requiere menos espacio que otras centrales y es la única industria energética que adquiere toda la responsabilidad sobre sus desechos. La última ventaja es bastante razonable si se toma en cuenta el enorme poder de la energía nuclear.

Desventajas de los combustibles nucleares. En caso de accidentes, pueden liberarse grandes cantidades de material radioactivo peligroso para la salud de los seres vivos. Desde esta perspectiva, el almacenamiento de los combustibles y de los materiales radioactivos debe ser muy cuidadoso. Dos ejemplos de accidentes ocurridos en plantas con fuertes daños humanos son los desastres de Chernóbil (Ucrania) en 1986 y de Fukushima (Japón) en 2011.

Vean en:

http://en.wikipedia.org/wiki/Chernobyl_disaster
www.youtube.com/watch?v=vBk0Y6cQZQ

El desastre que ocurrió en Japón fue causado por un terremoto de magnitud 8.9, el 11 de marzo del 2011; el de Chernóbil, que constituye uno de los mayores desastres medioambientales de la historia, arrojó materiales radiactivos y/o tóxicos que se estima fue unas 500 veces mayor que el liberado por la bomba atómica arrojada en Hiroshima en 1945, causó directamente la muerte de 31 personas y forzó al gobierno a la evacuación repentina de 116 000 personas.

Una desventaja no menos importante, es que son recursos no renovables, es decir, su permanencia y disponibilidad corren peligro si son sobreexplotados.

Futuro de los combustibles nucleares. El futuro de los combustibles nucleares al parecer está en “veremos”. Sus potenciales riesgos y el no ser renovables conforman razones para no creer en su uso a gran escala. Por ejemplo, la revista Forbes mencionó en 2013 que los reactores no son fuente viable de nuevo poder y su factibilidad es escasa en vista de a) los altos costos que implican, b) la oposición política y popular y c) la incertidumbre sobre su regulación. Desde 2007, la generación anual de la energía nuclear se ha reducido ligeramente y en 2008 no hubo una sola planta nueva de energía nuclear que se haya conectado a la red eléctrica. Al parecer,

la tendencia es una disminución del uso de los combustibles nucleares.

Tecnología del Hidrógeno

El hidrógeno fue descubierto por el científico británico Henry Cavendish en 1776, quien informó de un experimento en el que había obtenido agua a partir de la combinación de oxígeno e hidrógeno, con la ayuda de una chispa eléctrica. Estos elementos no eran conocidos. El químico francés Antoine Lauren Lavoisier consiguió repetir con éxito el experimento en 1785 y dio el nombre de oxígeno al “aire sustentador de la vida” y el de hidrógeno al “aire inflamable”. El hidrógeno es el elemento más ligero, más básico y más ubicuo del universo. Contiene energía y puede ser almacenado en forma líquida o gaseosa. Es 14 veces más ligero que el aire, incoloro, inodoro y no tóxico, ya que el único resultado de su combustión es agua. Cuando se utiliza como fuente de energía, se convierte en el combustible eterno. Nunca se termina y, como no contiene átomos de carbono, no emite dióxido de carbono. El hidrógeno se encuentra repartido por todo el planeta: en el agua, en los combustibles fósiles y en los seres vivos. Sin embargo, raramente aparece en estado libre en la naturaleza, por lo que tiene que ser extraído de fuentes naturales. La fuente más común de hidrógeno es el agua de donde, por descomposición química, se obtiene oxígeno e hidrógeno a partir de la acción de una corriente eléctrica (electrólisis) y generada por fuentes de energía renovable (solar fotovoltaica, eólica, etc.). Este proceso divide el agua, produciendo oxígeno puro e hidrógeno. El hidrógeno obtenido puede ser comprimido y almacenado en celdas por varios meses hasta que se necesite. El hidrógeno representa energía almacenada, se puede quemar como cualquier combustible para producir calor, impulsar un motor o producir electricidad en una turbina.

Ventajas de la Tecnología del Hidrógeno

No produce contaminación ni consume recursos naturales: El hidrógeno se toma del agua y luego, se oxida y forma agua. Así, los productos de desecho de este proceso son sólo calor y agua inofensiva, sin productos secundarios tóxicos. Reduciría las emisiones de dióxido de carbono mitigando los efectos del calentamiento global. Teóricamente, la pila de combustible disocia la molécula de hidrógeno (H_2), dando como resultado dos iones de hidrógeno y dos electrones. El hidrógeno resultante se convierte en agua al asociarse con el oxígeno y el resultado es un combustible y un motor que no deja residuos contaminantes. (Averigüe la diferencia entre las pilas convencionales y las pilas de combustible).

Es muy seguro: Los sistemas de hidrógeno tienen una historia de seguridad impresionante. En general, el hidrógeno, en contraste con cualquier otro combustible, se disipa rápidamente en la atmósfera y si se fuga, no es tóxico.

Tiene alta eficiencia: Las celdas de combustible convierten la energía química directamente en electricidad con mayor eficiencia que ningún otro sistema de energía. La eficiencia de las pilas de combustible se sitúa entre el 40% y el 50%, mientras que los motores de combustión cifran su eficiencia en torno al 16% y los eléctricos, en el 70%.

Tiene un funcionamiento silencioso: En funcionamiento normal, la celda de combustible es casi absolutamente silenciosa.

Larga vida y poco mantenimiento: Aunque las celdas de combustible todavía no han comprobado la extensión de su vida útil, probablemente tendrán una vida significativamente más larga que las máquinas que reemplacen.

Permite la modularidad: Se pueden elaborar las celdas de combustible en cualquier tamaño, tan pequeñas como para impulsar una carretilla de golf o tan grandes como para generar energía

para una comunidad entera. Esta modularidad permite aumentar la energía de los sistemas según los crecimientos de la demanda energética, reduciendo drásticamente los costos iniciales.

Elimina juego geopolítico. La economía del hidrógeno posibilita una enorme redistribución del poder a nivel mundial ya que tiene el potencial de poner fin a la dependencia que el mundo tiene del petróleo importado y de ayudar a eliminar el peligroso juego geopolítico que se está dando entre los países musulmanes y los países occidentales. Dado que es tan abundante y existe en todas partes del mundo, todos los seres humanos dispondrán de energía.

(Los estudiantes pueden averiguar en Internet resultados relacionados con modelos de automóviles cuyos motores funcionan con el ciclo del hidrógeno. El modelo Miray de Toyota es uno de ellos).

Medio Ambiente y Generación de Energía Eléctrica

(Los estudiantes pueden consultar en Wikipedia al artículo “Preocupaciones medioambientales con la generación de energía eléctrica”).

Energía, la Tierra, Calentamiento Global y el Efecto Invernadero

(El último número de “National Geographic” en castellano -Mayo 2016- está dedicado al tema “El Desafío del Clima. Calentamiento global; -cómo vivir con él y cómo arreglarlo” donde se ofrece una descripción del tema).

El efecto invernadero

Es un proceso en el que la radiación térmica emitida por la superficie planetaria es absorbida por ciertos gases y es re-irradiada en todas las direcciones. Ya que parte de esta re-irradiación es devuelta hacia la superficie y la atmósfera inferior, resulta en un incremento de la temperatura superficial media respecto a lo que habría en ausencia del efecto invernadero. Pero, sin CO₂ ni

vapor de agua, la temperatura media de la Tierra sería unos 33°C menos, del orden de 18°C bajo cero, lo que haría inviable la vida. Por otro lado, las actividades humanas, principalmente el uso de combustibles fósiles y la tala de bosques, han intensificado el fenómeno natural, causando un calentamiento global. Los denominados gases, responsables del efecto descrito son: vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido de nitrógeno (N₂O), ozono (O₃) y clorofluorocarbonos (CFC). Salvo este último, los demás existían en la atmósfera antes de la aparición del hombre.

Así del CO₂ emitido a la atmósfera, a) sobre el 50% tardará 30 años en desaparecer, b) un 30% permanecerá varios siglos y c) el 20% restante durará varios miles de años. La concentración de CO₂ atmosférico se ha incrementado desde la época preindustrial (año 1750) desde 280 ppm a 379 ppm en 2005. Se estima que 2/3 de las emisiones proceden de la quema de combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón) mientras un 1/3, del cambio en la utilización del suelo, incluida la deforestación. Del total emitido, sólo el 45% permanece en la atmósfera, sobre el 30% es absorbido por los océanos y el restante 25% pasa a la biosfera terrestre. Por tanto, no solo la atmósfera está aumentando su concentración de CO₂, también está ocurriendo en los océanos y en la biosfera. Desde la Revolución Industrial y debido principalmente al uso intensivo de los combustibles fósiles en las actividades industriales y el transporte, se han producido sensibles incrementos en las cantidades de óxido de nitrógeno y dióxido de carbono emitidas a la atmósfera, con el agravante de que otras actividades humanas, como la deforestación, han limitado la capacidad regenerativa de la atmósfera para eliminar el CO₂, principal responsable del efecto invernadero.

En diciembre pasado, se reunieron representantes de 195 países en París, Francia, para tratar de asegurar el buen éxito de una lucha contra el cambio climático, después de 20 reuniones

anteriores, sin ningún cambio significativo en las emisiones de CO_2 . Desde 1992 hemos añadido tanto a la atmósfera como el agregado durante todo el siglo anterior. Por el deshielo de la cubierta de hielo de la Antártida occidental, se pronostica que el nivel del mar aumentará 1.3 m. Los dos mayores emisores –China y EEUU– han anunciado un acuerdo para reducir las emisiones que resultan de la quema de combustibles fósiles. En 2014 China quemó, por vez primera en este siglo, menos carbón mineral. La reunión en París envió un claro mensaje al sector empresarial de donde surgen intereses económicos contrapuestos.

Las soluciones en busca de eficiencia y uso de fuentes de energía no contaminantes se trasladan al rediseño de casa, ciudades, países y del mundo. El diseño de vehículos más eficientes, el aprovechamiento de basura para generar energía, la reducción de la pérdida forestal para convertirla en terrenos cultivables (selva de Amazonas, por ejemplo), la disminución de emisión por los sistemas de calefacción, la reducción del costo de la energía solar y eólica así como la eliminación de fugas con el uso de tuberías anticorrosivas juegan también un papel fundamental. Los convenios internacionales son controlados por el CAT (Climate Action Tracker) que evalúa a las principales naciones, en cuanto al cumplimiento de metas y de acuerdo a su realidad, como emisores de gases de efecto invernadero. En varios países europeos (Países Bajos, Bélgica, Noruega), han surgido movimientos ciudadanos que controlan las metas de emisión y solicitan su reducción. Los controles de países como EEUU son criticados por considerarse bajos tomkando en cuenta el volumen de contaminantes que emiten. La meta es reducir el calentamiento global a 2° para 2100, desde la actual predicción de 4.5° . Aunque Alemania extrae en una sola mina 20 millones de toneladas de lignito al año, las fuentes de energía renovable son implantadas y se cierran las de fuente nuclear, en gran medida por la acción ciudadana. Actualmente, el 27% de la electricidad proviene de recursos renovables.

El objetivo es que llegue por lo menos al 80% para 2050, aunque ello signifique un alza en el costo correspondiente, lo que la ciudadanía parece estar dispuesta a pagar.

Problemas.

Nota. Los siguientes son los 20 problemas nuevos para esta Olimpiada. Algunos, tienen una parte del texto en cursivas para enfatizar una propiedad a considerar en la respuesta.

1. Considere una aspa que genera viento y que se mueve con velocidad v que es perpendicular a un área circular de radio r ; entonces, la masa de densidad ρ que se traslada en un tiempo t en esa dirección tiene una energía cinética igual a:

a) $\pi/2 \rho v^3 r^2 t$

b) $1/2 m v^2$

c) ambas expresiones anteriores son equivalentes

d) ambas expresiones están equivocadas.

2. Encuentre la ecuación para la potencia P que utiliza el resultado de la pregunta anterior para la energía cinética. Compare con la siguiente: $P=0.393 \cdot \rho \cdot d^2 \cdot v^3$, donde d es el diámetro del círculo. Usted concluye específicamente que:

a) ambas expresiones no se corresponden una con otra

b) sí; se corresponden, pero no usan las mismas unidades

c) ambas son totalmente equivalentes;

d) la expresión para la potencia no tiene la unidad física correspondiente

3. Suponga un calentador eléctrico que tiene un rendimiento del 0.80% y que gasta 35 Watt durante $\frac{1}{2}$ hora. Entonces la energía calórica disipada es:

- a) 12600 Joule b) 6300 J
- c) 50400 J d) 123480 J

4. Una densa y permanente cantidad de nubes

- a) aumenta el efecto invernadero
- b) enfría la superficie de la Tierra
- c) no produce ninguno de los dos efectos
- d) implica una erupción volcánica en algún punto de la Tierra.

5. Recuerde que la unidad de energía en el sistema MKS (metro-kilogramo-segundo) es el Joule y en el sistema cgs (centímetro-gramo-segundo) es el erg. De lo anterior, concluimos que:

- a) 1 Joule = 105 erg
- b) 1 Joule = $9.8 \cdot 10^5$ erg
- c) 1erg = 10^{-7} Joule
- d) 1Joule = $9.8 \cdot 10^7$ erg

6. El uso de energía contaminante se explica principalmente porque

- a) el petróleo y el carbón son relativamente más baratos y simples de producir que las energías alternativas
- b) hay países que entraron tardíamente a su desarrollo industrial con respecto a países con economías avanzadas
- c) no hay un desarrollo tecnológico suficiente para producir energía no-contaminante
- d) por imposición de la industria del petróleo

7. El mantenimiento del uso de unidades inglesas como el pie y la libra se contrapone fundamentalmente al uso de unidades MKS o cgs porque

- a) una tradición nacional en países de habla inglesa
- b) El costo económico de introducir el cambio de unidades en la industria manufacturera de los países de habla inglesa
- c) las unidades inglesas son más fáciles de utilizar que las métricas
- d) hay razones políticas que provienen del tiempo de Napoleón Bonaparte.

8. El segundo principio de la termodinámica se refiere esencialmente a la degradación de la energía al convertirse en calor. En esta última forma, se disipa y disemina en el sistema. Por ejemplo, la energía eléctrica se degrada

- a) al emitir ondas
- b) al calentar resistencias de diversos tipos
- c) por la vibración de electrones
- d) por la emisión de electrones.

9. Una mega-erupción volcánica produce fundamentalmente

- a) calentamiento de la atmósfera
- b) enfriamiento de la Tierra
- c) efecto invernadero
- d) terremotos.

10. *Políticamente*, el uso del petróleo produce

- a) contaminación de la atmósfera
- b) uso de una energía barata
- c) dominio de empresas transnacionales sobre países productores
- d) tendencia a producir nefastos derrames de petróleo.

11. La mayor dificultad para utilizar el hidrógeno como fuente de energía es

- a) su costo b) tecnológica
- c) la falta de interés de la industria automovilística para su aplicación
- d) la contaminación de la atmósfera.

12. Un ejemplo de uso de la energía potencial para generar electricidad es la fuente

- a) eólica b) geotérmica
- c) de saltos de agua d) solar

13. Si 1 pie = 0.3048 m, 1 libra = 0.4536 kgr (la libra y el kilogramo miden masa; no peso), entonces, la energía de una libra-pie es igual a

- a) 1.3549 Joul b) 1.3549 erg
- c) 1.3549×10^7 erg d) 0,1383 Joul

14. Suponga que $\frac{2}{3}$ de la superficie de la Tierra es superficie oceánica. Tome a nuestro planeta como una esfera con un radio de 6371 km. Calcule el volumen de agua que se deshiela en km^3 , despreciando la evaporación y si el nivel del océano sube 1 m.

- a) $8.124 \times 10^6 \text{ km}^3$ b) $8.290 \times 10^7 \text{ km}^3$
- c) $8.632 \times 10^4 \text{ km}^3$ d) $8.501 \times 10^9 \text{ m}^3$

15. Parte del CO_2 que elimina la civilización es absorbida por el océano porque el carbono es utilizado en la fotosíntesis de las algas. Un alto porcentaje de este CO_2 finalmente

- a) es devuelto a la atmósfera al descomponerse las algas
- b) pasa a los animales marinos que consumen las algas
- c) se deposita en el fondo del mar
- d) es depositado en las playas.

16. Suponga que usted se pesa y obtiene un valor de 82 kgr. De lo anterior, se deduce que su masa es aproximadamente

- a) 82 kgr-masa b) 8.2 kgr-masa
- c) 8.4 kr-masa d) 803.6 kgr-masa

17. Teóricamente, la evolución de los seres vivos

a) no es posible, ya que se opone al segundo principio de la termodinámica que niega la posibilidad del desarrollo de organismos cada vez más complejos/ordenados en un sistema (la Tierra) aislado

b) es posible porque la Tierra no es un sistema aislado ya que recibe energía del Sol que es el principal motor de la vida en la Tierra además de recibir rayos cósmicos que permiten variaciones genéticas

c) el segundo principio de la termodinámica no es aplicable al entendimiento de la evolución de los seres vivos

d) no hay evolución.

18. Independientemente de dificultades técnicas y políticas, señale cual método que disminuye el calentamiento de la Tierra le parece más humano, completo e independiente del costo:

- a) Incremento de nubes marinas
- b) Reforestación
- c) Envío de aerosoles (pequeños discos que reflejan la radiación solar)
- d) Grandes ciudades con poblaciones muy concentradas en edificios altos.

19. La fotosíntesis requiere 3000×10^{15} Joules al año lo que representa el 0,08% de la radiación que recibe la superficie de la Tierra. Esto implica que el total de energía solar anual que recibe la superficie de la Tierra es

- a) 3.75×10^{21} Joules b) 2.4×10^{15} Joules
c) 2.4×10^{17} Joules d) 2.352×10^{18} Joules.

20. Las aspas de un molino giran cuando hay viento, específicamente, porque

a) el viento provee una componente de fuerza perpendicular a las aspas por el viento

b) las aspas están ligeramente inclinadas y cualquier dirección del viento produce una componente tangencial en las aspas

c) tienen un mecanismo que hace que las aspas siempre estén perpendiculares al viento

d) el viento siempre hace girar las aspas del molino.

Estadísticas de resultados

	2009	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Mexicali	20-A	20-B	18	13	14-C	18	35
Tijuana	35-B/C	14-A/C	21-A/B	16	12-A	15-A/B/C	39
Tecate	0	4	0	0	1	4	6
Rosarito	3	0	20	7-A	6	5	5-A/B/C
Ensenada	21	39	40-C	22-B/C	30-B	30	24
Total							

Los resultados en los últimos 7 años en que se han efectuado las Olimpiadas se encuentran en la tabla anterior. En ella, pueden encontrar el número de estudiantes asistentes por municipio, además del total. Las letras A, B y C indican primer, segundo y tercer lugar. Es notable la participación de Rosarito que, con 5 participantes en 2016, logró los tres mejores resultados.

Manuscrito recibido: 20 de febrero de 2017

Manuscrito aceptado: 23 de febrero de 2017

POLÍTICAS EDITORIALES

GEOS es el boletín informativo de la Unión Geofísica Mexicana, contiene artículos de investigación originales así como artículos de divulgación y notas cortas sobre aspectos relevantes para la difusión de la actividad científica, tecnológica y docente en las Ciencias de la Tierra, así como noticias de interés para los miembros de la UGM; se publican tres números en el año en forma impresa como electrónica.

Los artículos de investigación publicados en **GEOS** deben ser **originales** y son **arbitrados** por al menos dos expertos del tema; mientras que los trabajos de divulgación son arbitrados por un especialista del tema. Los editores se reservan el derecho de decidir sobre la publicación de notas o reportes.

Son particularmente bienvenidas todas aquellas contribuciones que coadyuven a la difusión y a la enseñanza de las Ciencias de la Tierra.

Una vez concluido el proceso de arbitraje, el manuscrito será devuelto al primer autor con los comentarios de los árbitros y del editor. El manuscrito corregido en forma final será editado por el Editor Técnico de **GEOS** para su publicación impresa y electrónica. El autor principal tendrá oportunidad de revisar la versión final de su trabajo antes de publicarlo en WEB de la UGM (www.ugm.org.mx).

Cualquier cambio a la política editorial de GEOS se publicará en el primer número de cada volumen.

Instrucciones para los autores

Publicar en GEOS es gratuito, todos los manuscritos deberán enviarse en forma electrónica a cualquiera de los editores principales:

Luis Alberto Delgado Argote (CICESE)
ldelgado@cicese.mx

Dora Carreón Freyre (UNAM)
freyre@geociencias.unam.mx

Preparación de texto:

Podemos procesar manuscritos en formato WORD, texto ASCII o LaTeX. Se recomienda que los manuscritos no excedan 12 páginas en el formato de la revista (una página contiene aproximadamente 900 palabras).

La publicación de figuras a color en la versión impresa de GEOS no es posible por ahora, sin embargo la versión electrónica puede contener ilustraciones a todo color, se recomienda a los autores preparar sus figuras pensando en ambas ediciones.

Secciones:

Preparación de figuras e ilustraciones:

Las ilustraciones y figuras se pueden enviar en cualquiera de los siguientes formatos: **TIF, EPS, PS, DXF, DWG, PDF, JPG o WMF**; y deben enviarse en archivos individuales y separados del texto.

Con excepción de las notas, todas las contribuciones deberán incluir: título, resumen (en español y en inglés), introducción, una sección de métodos, una sección de resultados, una sección de discusión y/o conclusiones y una sección de referencias bibliográficas.

Resumen:

El no deberá exceder 350 palabras. Al prepararlo haga énfasis en los objetivos de la investigación, los resultados más importantes y las conclusiones alcanzadas. En el resumen no deben aparecer citas bibliográficas.

Introducción:

La introducción deberá destacar la relevancia del problema e incluir una revisión adecuada de publicaciones antecedentes sobre el tema. El objetivo de la introducción es enmarcar el problema dentro del estado general del conocimiento en el área que le corresponde, destacar la contribución del trabajo y motivar la lectura del artículo completo.

Metodología:

La metodología empleada en el trabajo deberá ser descrita con suficientes detalle para que otros miembros de la comunidad puedan comprenderla, pero al mismo tiempo, debe ser sencilla para que un lector inexperto pueda comprender las ideas fundamentales. Los desarrollos demasiado detallados, pero necesarios, deben diferirse a una sección apéndice.

Resultados:

Usualmente, los resultados de la aplicación de cualquier metodología pueden presentarse en forma de tablas o figuras. Evite redundancias mediante una adecuada selección de sus resultados. Los pies de figura deberán ser lo suficientemente explicativos para resaltar la importancia de lo que se ilustra sin necesidad de acudir al texto.

Discusiones y conclusiones:

En esta sección se deben discutir las implicaciones de los resultados, su concordancia o divergencia con hipótesis anteriores, construir nuevas hipótesis

derivadas de ellos, discutir sus aplicaciones prácticas y posibles limitaciones.

Referencias

Se debe incluir la lista de referencia de las fuentes utilizadas en el artículo.

Las referencias deberán estar agrupadas en orden alfabético por apellido del primer autor. Sugerimos utilizar el estilo de citación recomendado por Harvard University. Presentamos algunos ejemplos para facilitar la citación.

Si la citas textuales tienen 40 palabras o menos, utilice comillas al principio y al final de la misma y mencione el apellido del autor, el año y la página de donde proviene la cita. Si tiene más palabras, utilice párrafo con diferente sangría. Si un autor es citado más de una vez el mismo año, utilice el sufijo: a, b, etc. para distinguir el trabajo.

Aquellos manuscritos que no estén en publicados (aceptados o en prensa) no deberán incluirse en la referencias. Los artículos de divulgación podrán agregar una sección de referencias recomendadas.

Formato para citas:

Para cada autor o co-autor, escriba con mayúscula únicamente la primera letra del apellido y después las iniciales, agregue el año entre paréntesis. Utilice letras mayúsculas sólo en la primera letra del título y para nombres propios.

Cuando haga la referencia de un artículo de publicación periódica, incluya el nombre completo de la revista, volumen y páginas. Por ejemplo:

Alvarez-Borrego, S. (1996). Satellite derived photosynthetic pigment surveys: A review of marine phytoplankton biomass and productivity, *Geofísica Internacional*, v. 35(1), 51-61.

Ripa, P., y Velázquez, G., (1993), Modelo unidimensional de la marea en el Golfo de California, *Geofísica Internacional*, v. 32(1), 41-56.

Sánchez-Sesma, F. J., and Luzón, F., (1995), Seismic response of three-dimensional alluvial valleys for incident P, S, and Rayleigh waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 85(1), 269-284.

Cuando haga referencia de un libro completo, incluya los siguientes datos.

Winkler, H.G.F. (1967). *Petrogenesis of metamorphic rocks*. 2nd ed. New York, 237 p.

Cuando haga la referencia de una parte de un documento o capítulo de libro, incluya los siguientes datos.

Lomnitz, C., (1995), Diez años después: una reinterpretación de la catástrofe de 1985. En: F. Medina-Martínez, L. A. Delgado-Argote y G. Suárez-Reynoso, editores, *la Sismología en México: 10 años después del temblor de Michoacán del 19 de Septiembre de 1985 (M=8.1)*, (p. 61-67). Unión Geofísica Mexicana, Monografía No. 2.

Cuando haga la referencia de una tesis, debe hacer mención al grado. Ejemplo:

Gutiérrez Carmona, D.M. (2014). Estudio magnetotelúrico de la Falla Agua Blanca, Baja California, México. Tesis de maestría. Centro de Investigación y Educación Superior de Ensenada, Baja California. México.

Cuando haga la referencia de recursos electrónicos, incluya los datos completos y la dirección electrónica. Ejemplo:

Ripa, P. y Velázquez, G. (1993). Modelo unidimensional de la marea en el Golfo de California, *Geofísica Internacional*, 32 (1), 41-56. Recuperado de: [http://](http://www.raugm.org.mx/publicaciones/GeofisicaInternacional/GI%201993%20V.32/GI%201993%20V.32%20N.1%20p.%2041.pdf)

www.raugm.org.mx/publicaciones/GeofisicaInternacional/GI%201993%20V.32/GI%201993%20V.32%20N.1%20p.%2041.pdf

Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía (México). <https://www.google.com.mx/webhp?sourceid=chrome-instant&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#q=inegi>

Presentaciones gráficas (gráficas, diagramas, mapas, dibujos, figuras, ilustraciones en general, fotografías, etc.)

Cuando las presentaciones gráficas son tomadas de otro autor o página web, debe mencionarse la fuente de donde fue tomada.

Ejemplos:
Tomado de Google Hearth (2014).
Modificado de Pérez (2014) p. 234.

Unidades

Con algunas excepciones, todas las unidades físicas deberán expresarse en el Sistema Internacional de unidades (SI). Las siguientes excepciones son aceptables:

densidad en g/cm³
presión en bar

Expresiones matemáticas

Escriba sus ecuaciones en la forma más simple posible, utilizando signos de puntuación. Utilice itálicas para todos los símbolos, exceptuando las letras griegas. Vectores y matrices se escribirán con negrillas. Numere en forma consecutiva y entre paréntesis todas las ecuaciones que aparezcan en el texto.

$$\mathbf{u}_h(x, z, t) = (U_j^x(t)\phi_j(x, z), U_j^z(t)\phi_j(x, z))^T \quad (1)$$

Recordamos a todos los miembros de la Unión Geofísica Mexicana, A.C.
que la cuota es de \$300.00 para investigadores
y \$150.00 para estudiantes.

página internet: www.ugm.org.mx

Con un cordial saludo

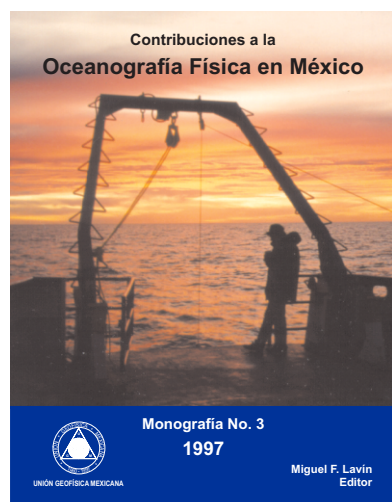
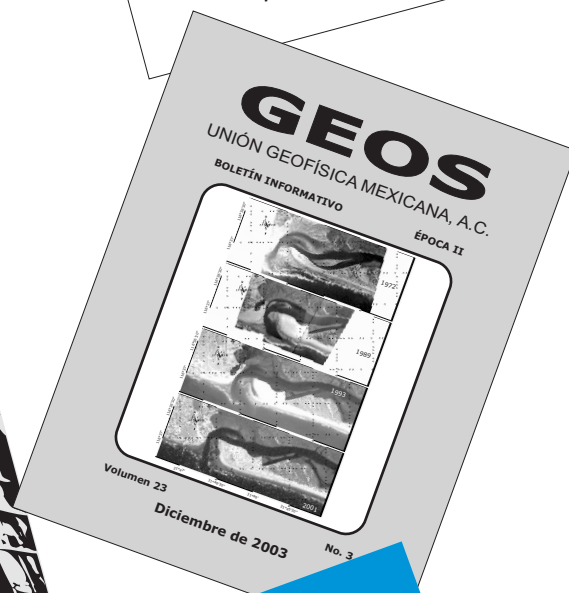
Luis A. Delgado Argote y Dora C. Carreón Feryre
Editores

GEOS

Información con:

Ivonne Pedrín Morales
División de Ciencias de la Tierra
Tel: 01(646)174-5050
Ext: 26004
Correo electrónico: ipedrin@cicese.mx





Tus trabajos de investigación y divulgación tienen cabida en estos foros de la Unión Geofísica Mexicana, A.C.