

5



PERSPECTIVAS DE LA CIENCIA Y LA INGENIERÍA



AÑO 3 NUMERO 5



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA



PERSPECTIVAS DE LA CIENCIA Y LA INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

DIRECTORIO

Dra. Margarita Teresa de Jesús García Gasca
Rectora

Dr. Javier Ávila Morales
Secretario Académico

MAP. José Alejandro Ramírez Reséndiz
Secretario de la Contraloría

MSP. Sergio Pacheco Hernández
Secretario Administrativo

M. en I. Alejandro Jáuregui Sánchez
Secretario de Finanzas

Dra. María Teresa García Besné
Secretaria de Extensión Universitaria

M. en S. Luis Alberto Fernández García
Secretario Particular de Rectoría

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa
Director de la División de Investigación
y Posgrado de la Facultad de Ingeniería

Perspectivas de la Ciencia y la Ingeniería

Año 3, Núm. 005, junio de 2020, Perspectivas de la Ciencia y la Ingeniería es una publicación semestral editada y publicada por la Universidad Autónoma de Querétaro, División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería. Centro Universitario, Cerro de las Campanas s/n, Col. Las Campanas, C.P. 76010, Tel. (442) 192-12-00, ext. 7035.

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo

No. 04-2017-032412430300-203

ISSN: En trámite

Ambos registros están en trámite por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial del contenido e imágenes de la publicación sin plena autorización de la Universidad.

DIRECCIÓN

Dr. Manuel Toledano Ayala

COMITÉ EDITORIAL

EDITORES RESPONSABLES

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa
MC. Stephanie Virginia Camacho Gutiérrez
MC. Christopher Alexis Cedillo Jiménez
MC. Alepht Hain Pacheco Estrada

EDITORES ASOCIADOS

MC. Adán Mercado Luna
Dr. Alejandro Espinosa Calderón
MC. Alejandro Moreno Gómez
Dr. Andrés Torres Acosta
MC. Armando Juárez Trujillo
Dr. Arturo González Gutiérrez
Dra. Claudia Gutiérrez Antonio
MC. Cuauhtémoc Hernández Galeno
Dr. Eduardo Elizalde Peña
Dr. Enrique Rico García
Dra. Genoveva Hernández Padrón
Dra. Janet Ledesma García
MI. Javier García Pérez
MI José Alfonso Balbuena Cruz
Dr. José Antonio Quevedo Tiznado
Dr. José de Jesús Pérez Bueno
Dr. José Luis Reyes Araiza
Dr. José Roberto Galaviz González
Dr. Luis Miguel Contreras Medina
Dr. Marco Antonio Aceves Fernández
Dr. Miguel A. Pérez Lara y Hernández
MC. Tadeo Rodríguez

DISEÑO EDITORIAL

Areli Arias Panchenko
Jorge Javier Cruz Florín
Coordinación de Diseño e Imagen
Facultad de Ingeniería

PORTADA

Alejandro Martínez Aguilar
Coordinación de Diseño e Imagen
Facultad de Ingeniería

CUIDADO DE LA EDICIÓN

Daniela Pérez López
Soid Lazlo Ruiz Ramírez
Diseño Editorial
Facultad de Ingeniería

10. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MÁXIMA VEROSIMILITUD PARA EL CÁLCULO DE RELACIONES DE ATENUACIÓN PARA LAS ACCELERACIONES MÁXIMAS DE TERRENO DE LA FAJA VOLCÁNICA TRANSMEXICANA

Application of the maximum likelihood method to compute ground-motion prediction equations for peak ground accelerations of the Transmexican Volcanic Belt

CARLOS ALBERTO PEDRO RIVAS NIETO, LUIS FRANCISCO PÉREZ MORENO, GUADALUPE MOISÉS ARROYO CONTRERAS, MIGUEL ÁNGEL PÉREZ LARA Y HERNÁNDEZ, LIZ STEPHANIE VELÁZQUEZ AGUILAR, IVÁN FERMÍN ARJONA CATZIM, ÁNGEL GREGORIO FIGUEROA SOTO

32. MOVILIDAD DE PERSONAS EN SITUACIÓN DE DISCAPACIDAD MOTRIZ, COMPARACIÓN ENTRE UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BARCELONA Y DE QUERÉTARO

Mobility of people with motor disabilities, comparison between the Autonomous Universities of Barcelona and Querétaro

CARLOS AUGUSTO HERNÁNDEZ-ALCALÁ, ÀNGEL CEBOLLADA-FRONTERA, OVIDIO ARTURO GONZÁLEZ-GÓMEZ

56. REDUCCIÓN DEL EFECTO DOMINÓ MEDIANTE LA DISTRIBUCIÓN DE EQUIPOS PARA LA PRODUCCIÓN DE ETILENO

Domino effect reduction through the process layout for an ethylene process production

FRANCISCO ORTIZ-TENA, JULIO A. DE LIRA-FLORES, LUISA RAMÍREZ-GRANADOS

70. ANÁLISIS DE LA NORMATIVA PARA LA EDIFICACIÓN: UNA APROXIMACIÓN A LA REGULACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE DEL HÁBITAT DE LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS EN LAS RESERVAS DE LA BIÓSFERA

Analysis of the regulations for the building: an approach to the regulation of the sustainable construction of the hábitat of the human settlements in the Biosphere Reserves

LERVIN BENÍTEZ ÁLVAREZ, CARLOS COBREROS RODRÍGUEZ

**90. VARIABILIDAD DE LA ENERGÍA DE
OLA POR MEDIO DEL ESPECTRO DE PIERSON-MOSKOWITZ
PARA EL ANÁLISIS DE PLATAFORMAS MARINAS**

Wave energy variability based on the Pierson-Moskowitz spectrum for offshore platform analysis

IVÁN FERMÍN ARJONA CATZIM, JAIME MOISÉS HORTA RANGEL,
GUADALUPE MOISÉS ARROYO CONTRERAS, MIGUEL ÁNGEL PÉREZ LARA Y HERNÁNDEZ,
CARLOS ALBERTO PEDRO RIVAS NIETO, EMMANUEL VALENCIA JIMÉNEZ

**100. EPIGENÉTICA Y METILACIÓN
MEDIADORES DE ADAPTACIÓN EN PLANTAS**

Epigenetics and methylation: adaptation mediators in plants

MARIELA MARTÍNEZ RESÉNDIZ

**108. RECICLAMIENTO DE ASFALTO PARA FABRICAR
CARPETAS DE CONCRETO**

Recycling Asphalt to Make Concrete Pavements

DULCE VALERIA GUZMÁN ORTIZ, JUAN BOSCO HERNÁNDEZ ZARAGOZA

**122. DISEÑO DE UNA ARQUITECTURA EN
HARDWARE PARA OBTENER EL CANAL OSCURO
EN IMÁGENES CON HAZE**

Design of a Hardware Architecture to Obtain the Dark Channel on Hazy Images

MIGUEL ÁNGEL MONCADA MALAGÓN, JOSÉ EDUARDO GASPAS BADILLO,
JUAN MANUEL RAMOS ARREGUÍN, JESÚS CARLOS PEDRAZA ORTEGA,
MARCO ANTONIO ACEVES FERNÁNDEZ

APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MÁXIMA VEROSIMILITUD PARA EL CÁLCULO DE RELACIONES DE ATENUACIÓN PARA LAS ACELERACIONES MÁXIMAS DE TERRENO DE LA FAJA VOLCÁNICA TRANSMEXICANA

Application of the maximum likelihood method to compute ground-motion prediction equations for peak ground accelerations of the Transmexican Volcanic Belt

Carlos Alberto Pedro Rivas Nieto^{1*}, Luis Francisco Pérez Moreno¹,
Guadalupe Moisés Arroyo Contreras¹, Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández¹,
Liz Stephanie Velázquez Aguilar¹, Iván Fermín Arjona Catzim¹,
Ángel Gregorio Figueroa Soto²

¹Universidad Autónoma de Querétaro

²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

*Autor de correspondencia
ing.rivas.nieto@gmail.com

RESUMEN

En los últimos diez años, la investigación en torno a la atenuación sísmica de la Faja Volcánica Transmexicana ha ido en aumento debido a la peculiaridad de esta zona, pues ha incrementado la información base para realizar análisis de riesgo sísmico. En este trabajo se ha optado por determinar una relación de atenuación para las aceleraciones máximas de terreno del sector Este de esta provincia volcánica, haciendo uso de registros de eventos sísmicos corticales someros, con profundidades entre 1 y 20 km y con magnitudes entre $2.7 < M < 4.6$, según el Servicio Sismológico Nacional. Todos estos fueron registrados por estaciones halladas al interior de esta zona y de la Red Sismológica de Banda Ancha del mismo organismo.

La atenuación se ha modelado con base en una función de efectos aleatorios en la que intervienen características como la magnitud, la distancia y variabilidades evento-a-evento y sitio-a-sitio, además, se ha aplicado un método de máxima verosimilitud de una etapa para obtener la solución de dicha relación de atenuación. Los resultados han sido puestos a prueba contra los datos originales evaluando su bondad de ajuste, con base en un análisis de datos pareados, el cual parte de una prueba t simple dada entre las diferencias de los datos esperados y los observados, hallándose una compatibilidad alta para distancias desde los 50 hasta los 200 km. Se prospecta obtener un conjunto de relaciones de atenuación para las ordenadas espectrales a partir de la misma base de datos adquirida en investigaciones posteriores.

Palabras clave: atenuación sísmica, México Central, sismicidad superficial, análisis de regresión.

ABSTRACT

Investigations on the seismic attenuation of the Transmexican Volcanic Belt have increa-

sed in the past ten years due to the peculiarity of the zone and the growth of the information and data used for the seismic risk analyses. In the present article a ground-motion prediction equation for the peak ground accelerations of the Eastern sector of this seismogenic zone has been determined, considering records that belong to shallow crustal seismic events with depths ranging from 1 to 20 km and magnitudes between 2.7 and 4.6, as reported by the Mexican National Seismological Service; all the data was recorded by stations located within the zone that belong to the Broadband Seismological Network of the same organization.

The attenuation was modeled using a random effects function, in which the magnitude, the epicentral distance, an earthquake-to-earthquake variability and a site-to-site variability were taken into account; moreover, a one-stage maximum likelihood method was applied to obtain the solution for such ground motion prediction equation. The results were tested against the original data to assess the goodness of fit between both. For this purpose an analysis of paired data was carried out, which returned a high compatibility of both for distances from the 50 to 200 km. An assembly of ground-motion prediction equations for spectral response accelerations is expected to be computed from this same database in forthcoming investigations.

Keywords: EST, ground motion prediction equations, Transmexican Volcanic Belt, shallow earthquakes, Maximum Likelihood Method.

INTRODUCCIÓN

La Faja Volcánica Transmexicana

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) es una zona sísmica que se encuentra en el centro de la República Mexicana (véase Figura 1), la cual comienza en el Oeste en los estados de Jalisco y Nayarit y termina en el Este,



en el estado de Veracruz, y tiene una longitud de alrededor de 1000 a 1200 km [1] y un ancho de entre 80 y 230 km [2], [3]. Anteriormente, esta provincia volcánica había sido dividida por algunos estudiosos en distintas zonas o sectores de acuerdo con sus características geológicas y volcánicas. En [3], [4], por ejemplo, se menciona que esta zona fue dividida en tres sectores: Este, Centro y Oeste, más recientemente, usando el mismo criterio "geovolcánico", una subdivisión más fue incluida dentro de [1], a la cual se le llamó como *Easternmost* (al extremo del este). En cambio, en [5] se consideró como criterio dividir en cuadrantes a la Faja Volcánica Transmexicana, basándose en las características geofísicas de amplificación de esta provincia volcánica.

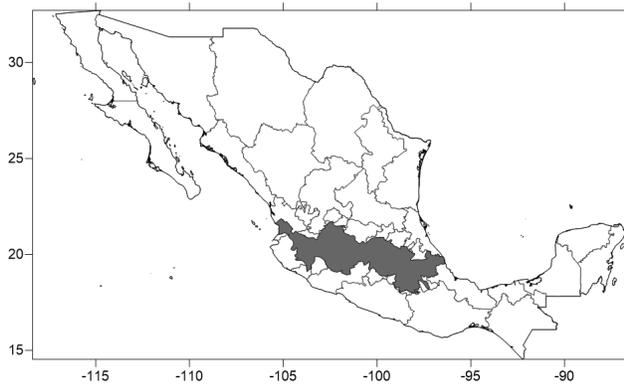


Figura 1. Localización de la Faja Volcánica Transmexicana
Fuente: Elaboración propia.

Sismicidad superficial en la Faja Volcánica Transmexicana

Aunque la FVTM es una zona en donde la sismicidad no es tan usual como sucede, por ejemplo, en la zona de subducción de la Trincheras de Acapulco, existen registros históricos en los que se reportan sismos de magnitud considerable, tal es el caso del sismo de Acambay de 1912 [6]. Además, es importante recalcar que en ésta se encuentra una vasta cantidad de fallas de diversos sistemas [6], [7] de los cuales los periodos de recurrencia son moderadamente altos [8], incluso para

sismos con magnitudes M_w semejantes a 6.0, estos se encuentran alrededor de los 60 años [9]. De la misma manera, dentro de esta provincia volcánica, están emplazadas una cierta cantidad de ciudades la República Mexicana, tal es el caso de la Ciudad de México, Guadalajara, Puebla y Querétaro, entre otras ciudades, con gran crecimiento en cuanto a población e industria, de acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía [10]. También, es crucial tener en cuenta que la Comisión Federal de Electricidad en su Manual de Diseño de Obras Civiles establece que esta provincia se encuentra dentro de áreas en las que las aceleraciones máximas en roca son de intensidades sísmicas moderadas a altas, lo que indica que las aceleraciones máximas de esta zona estarían entre 50 y 200 cm/s^2 [11], e implica indicadores medianamente altos para el análisis y diseño estructural de las construcciones.

Relaciones de atenuación y la normativa en México

En la actualidad, para estimar el movimiento de terreno, ya sea como desplazamiento, velocidad o aceleración, para valores máximos o espectrales, se utilizan relaciones de atenuación (*ground-motion prediction equations*), que son ecuaciones que vinculan la intensidad sísmica con las características de los sismos, como magnitudes, distancias sitio-fuente, condiciones del suelo, mecanismos de falla, entre otras [12]. Las relaciones de atenuación pueden ser categorizadas en tres de manera general: 1) aquellas que se encuentran en zonas tectónicas activas y eventos sísmicos de tipo cortical, 2) en regiones continentales estables con presencia de sismos corticales someros y 3) enfocadas en eventos sísmicos de subducción [13].

En el caso de México, de acuerdo con [14], se utilizan relaciones de atenuación para sismos de subducción, sismos de profundi-

dad intermedia y sismos superficiales. En el primero de los casos, se usa la relación de atenuación de [15], la cual fue construida a partir de datos de aceleraciones máximas de terreno registradas por la Red Acelerográfica de Guerrero y de la técnica de regresión lineal descrita por [16], como es mencionado en [17]. Para los eventos sísmicos de profundidad intermedia se aplica el conjunto de relaciones de atenuación para ordenadas espectrales y máximas calculadas por [18], en las que se utilizaron 277 registros de 16 eventos sísmicos datados entre los años de 1994 y 2004. Por último, para eventos sísmicos corticales con ocurrencia en la Faja Volcánica Transmexicana, como en las fallas Polochic-Motagua y en las regiones continentales activas del país, se aplican las relaciones de atenuación calculadas por [13], en las que se tomó en cuenta una base de datos de 655 registros de 58 eventos sísmicos de estaciones encontradas en California, EE.UU.

Este último conjunto de relaciones de atenuación se calculó para respuestas espectrales horizontales y verticales a partir de formular un modelo de ecuación de efectos aleatorios y estimaciones empíricas con base en el método de máxima probabilidad y en factores como el estilo de fallamiento, efectos hanging wall y respuestas del sitio, sin embargo, no se calcularon las respuestas para las aceleraciones máximas de terreno.

Estudios de atenuación sísmica relacionados a la Faja Volcánica Transmexicana

Un vasto número de estudios de atenuación ha sido desarrollado en México, sobre todo para la zona de subducción. En los últimos años se presentan casos como el de [19], en el que se compara la atenuación entre dos modelos bidimensionales de estructura cortical perpendicular a la Trincheras de Acapulco y, a su vez, se trató de explicar cómo es que la FVTM afecta de manera directa a la propaga-

ción de ondas entre los estados de Colima y Guerrero. En [20] se aplica un modelo para la atenuación de la pseudoaceleración causada por sismos interplaca en la zona de subducción, en el que se partió de la base de datos recabada en [18] y de la teoría bayesiana y las metodologías expresadas en [21] y [22].

Posteriormente, en [23] se obtiene un conjunto de relaciones de atenuación para los casos de las ordenadas espectrales con un 5% de amortiguamiento, así como para la aceleración y velocidad máxima de terreno, por medio de 8 eventos de tipo interplaca con magnitudes que variaban entre $5.1 < M_w < 8.0$, de 25 eventos *inslab* de falla normal con magnitudes $5.0 < M_w < 7.2$, del método de máxima verosimilitud de una etapa como es descrito en [24] y de la forma funcional utilizada en [18]. Por otro lado, las metodologías metaheurísticas también han sido empleadas para obtener modelos de atenuación, como es apreciable en [25], donde se aplicó un modelo basado en una red neuronal de tres capas para conseguir valores de aceleración máxima de terreno para sitios en roca, a partir de una base de datos que comprendía registros desde los años 60 hasta el 2013, y se pudo decretar que el modelo era eficiente para estimar la respuesta de sitios en zona de subducción, inclusive en aquellos que no fueron incluidos dentro del análisis. Por lo que se demuestra que este tipo de modelos es, de la misma manera que otros, funcional.

En contraste con la zona de subducción, por una menor cantidad de instrumentación y de la escasa ocurrencia de eventos sísmicos dentro de la Faja Volcánica Transmexicana, hasta la actualidad no se ha calculado una relación de atenuación propia para dicha provincia volcánica, es decir, una con la cual se puedan estimar correctamente las aceleraciones de terreno a partir de registros sísmicos obtenidos en las inmediaciones de esta zona, ya que la utilizada en el presente obtenida por [13] fue basada en registros sísmicos del



estado de California en los EE.UU, como se menciona con antelación.

Dada la razón antedicha, algunos análisis de regresión han sido llevados a cabo por investigadores con el objeto de estimar aceleraciones máximas de terreno, así como aceleraciones espectrales, y de detallar de esta forma la realidad de la FVTM. En [26], por ejemplo, se propuso desarrollar una relación de atenuación con la que se pudiera estimar la aceleración máxima de terreno proveniente de la zona de subducción del Pacífico y que llegara a la zona central de la Faja Volcánica Transmexicana, en especial hacia el estado de Querétaro. Por lo que se dispuso de un total de 12 eventos sísmicos con magnitudes del orden de $4.0 < M_d < 6.2$, y se determinó que para distancias cercanas a la fuente se subestiman las aceleraciones, mientras que para distancias lejanas a la fuente se sobrestiman los datos de las ecuaciones expuestas en [14]. Estos eventos en realidad son de tipo interplaca, los cuales no se presentan dentro de dicha zona. Ulteriormente, en [27] se propuso llevar a cabo un análisis en el que se integrara la teoría bayesiana y registros de 22 eventos sísmicos con magnitudes menores a $M=4.5$ y profundidades de entre 1 y 20 km, es decir, registros sísmicos corticales someros. De tal manera que se pudiera calcular un conjunto de relaciones de atenuación para las ordenadas espectrales, así como para las aceleraciones máximas de terreno, no obstante, a pesar de que se llegó a un resultado, no pudo encontrarse una solución estable, debido a que la cantidad de información con la que se contaba y la dispersión de los eventos sísmicos causaban una volatilidad entre los datos observados y los datos esperados, que después del análisis deberían haber sido semejantes a los primeros hasta cierto grado.

En esta investigación se ha calculado una relación de atenuación para las aceleraciones máximas de terreno de eventos sísmicos corticales que ocurrieron dentro de la zona Este

de la Faja Volcánica Transmexicana, así como es mostrado en [1], al partir del uso de una base de datos de 98 registros de 22 eventos. El método propuesto para llegar al resultado fue el método de máxima verosimilitud de una etapa expresado en [24], así como la formulación funcional de [28]. Además de eso, un análisis de datos emparejados fue realizado con el objetivo de determinar el grado de ajuste entre los registros obtenidos y los calculados por la expresión. Los resultados indican que la relación de atenuación obtenida se encuentra correctamente ajustada para distancias de entre 50 y 200 km, para magnitudes de entre 2.7 y 4.6.

METODOLOGÍA, MATERIALES Y MÉTODOS

Metodología

Esta investigación está marcada por los siguientes puntos, en primer lugar, se determinó cuál sería el área de estudio para la que se obtendría la relación de atenuación, por lo que se propuso considerar el sector Este de la FVTM, lo que se detallará en la siguiente sección. A partir de esta región se consiguieron y fueron procesados registros de sus eventos, de tal manera que se pudiera conformar una base de datos; a cada uno de estos registros se deconvulsionó y, en el caso en que estos fuesen registros de velocidad (sismogramas), su posterior derivación. Luego de que se procesaran los datos, se realizó un escrutinio con el objeto de revisar y eliminar aquellos registros que en realidad no proveyeran información valiosa para la investigación o que, al momento de derivar los datos, el registro no se pudiera ver claramente por confundirse con el ruido.

Los anteriores puntos llevarían a conformar una base de datos de registros claros para que se pudiera computar una relación

de atenuación. Es por ello que fue necesario escoger un modelo de regresión, así como una forma funcional que integrara variables características de los eventos sísmicos, para después llevar a cabo el análisis de regresión y, finalmente, determinar la bondad de ajuste entre los datos observados y los valores obtenidos por la relación de atenuación. En la Figura 2 se muestra un diagrama de flujo de la metodología para este proyecto de investigación, mientras que en las siguientes secciones se detalla cada uno de estos puntos de una forma más específica.



Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología.

Base de datos y estaciones

La base de datos para este artículo constó de un total de 97 registros de 22 eventos sísmicos corticales con distancias epicentrales máximas de alrededor de 430 km, con magnitudes entre los órdenes 2.7 y 4.6, y con profundidades focales entre 1 y 20 km, debido a que [1] refiere que la profundidad de este tipo de sismos dentro de la FVTM se encuentra como máximo hasta los 30 km y con el objetivo de emular lo realizado en [27] y [29]. Un resumen de los eventos sísmicos y sus características es mostrado dentro de la Tabla 1.

Como propuesta, se utilizaron señales registradas por estaciones sísmicas que están desplantadas en el interior del sector Este de la Faja Volcánica Transmexicana, o, cuando más, muy cercanas a este sector. De tal forma que se pudiera delimitar mejor el área misma. La subdivisión considerada está ubicada entre las longitudes $\sim 97^\circ$ W hasta $\sim 101^\circ$ W de acuerdo con [1] y se muestra en la Figura 3.

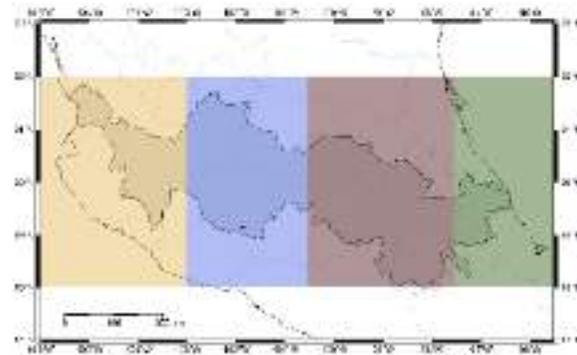


Figura 3. División aproximada de la FVTM en sectores

Fuente: imagen elaborada con base en [1]



Tabla 1. Eventos sísmicos compilados en esta investigación.

Número de evento	Fecha UTC	Hora UTC	Magnitud	Profundidad (km)	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Número de registros
1	07/08/2005	03:25:09	4.0	7.0	19.74	98.61	2
2	16/10/2005	14:12:36	3.5	14.0	19.30	99.20	3
3	23/11/2005	23:11:26	3.6	20.0	19.35	98.94	2
4	24/01/2006	12:59:38	3.7	5.0	20.34	99.22	4
5	12/03/2006	01:41:32	3.6	2.0	19.17	98.95	3
6	12/03/2006	01:47:21	3.4	5.0	19.18	98.96	3
7	05/05/2006	15:24:06	3.5	1.0	19.17	98.95	2
8	30/05/2007	20:42:28	4.0	3.0	19.21	99.45	3
9	17/04/2010	07:03:29	4.0	2.0	20.45	99.04	7
10	18/05/2010	05:29:09	4.0	5.0	20.35	98.92	7
11	18/05/2010	05:32:37	3.4	10.0	20.37	98.96	7
12	08/02/2013	01:24:58	3.8	6.5	20.12	100.47	6
13	21/06/2013	09:41:33	4.0	2.0	18.52	98.73	5
14	19/07/2014	11:57:23	3.5	8.0	19.17	98.97	5
15	01/12/2014	08:50:06	3.4	2.0	19.35	99.21	6
16	09/08/2015	15:17:17	3.7	5.0	18.95	98.20	7
17	08/02/2016	21:16:07	4.6	6.9	19.65	97.34	5
18	11/06/2016	19:06:14	3.9	12.5	18.85	97.19	7
19	29/08/2016	16:24:17	3.8	3.0	18.94	98.57	7
20	10/09/2017	02:54:12	2.7	9.4	19.30	99.18	6
21	06/11/2017	09:38:09	3.1	3.0	19.18	98.43	7
22	24/12/2017	12:25:12	3.4	3.1	18.82	98.59	7

(*) Esta magnitud es la que provee el Servicio Sismológico Nacional en [30].

Los registros constaron de sismogramas provistos por el Servicio Sismológico Nacional [30], que fueron procesados, deconvolucionados y diferenciados en el paquete *Seismic Analysis Code* [31]. En el proceso de deconvolución se multiplicaron las trazas correspondientes por las constantes empíricas de cada uno de los sismómetros de dichas estaciones. En la Figura 4 se muestra un mapa de la Faja Volcánica Transmexicana donde se pueden apreciar los eventos y estaciones sísmicas utilizadas. Los eventos se encuentran indicados con un símbolo de estrella, mientras que las estaciones del Servicio Sismológico Nacional fueron marcadas con triángulos.



Figura 4. Localización gráfica de las estaciones sísmicas (triángulos) y los eventos (estrellas).

En cuanto a la Tabla 1, cabe destacar que se registraron los eventos sísmicos por al menos dos estaciones sísmicas, aunque a la postre no se utilizaron todos los registros debido que muchos no podían distinguirse del ruido ambiental, lo que se abordará en la sección de resultados. Las estaciones sísmicas de este trabajo se encuentran dentro de la FVTM y pertenecen a la Red Sismológica de Banda Ancha del Servicio Sismológico Nacional. En la Tabla 2 se muestra un compendio en el que se incluye cada una de éstas, sus correspondientes características de localización, el suelo sobre el que se encuentran desplantadas, de acuerdo con el SSN, y la cantidad de registros de los eventos.

Forma funcional y método de máxima verosimilitud de una etapa

Con el fin de encontrar una relación de atenuación, se decidió usar un modelo de efectos aleatorios [13], pues los modelos de efectos fijos o de efectos mixtos no toman en consideración las variabilidades (errores) que pudieran surgir de acuerdo con características propias de las estaciones de registros o de los sismos, per sé [18], [24]. El modelo de efectos aleatorios tiene una forma de la Ecuación 1:

$$\log(A_i) = f(M_i, R_i) + \epsilon_r + \epsilon_e \quad (1)$$

Tabla 2. Estaciones sísmicas encontradas en el sector Este de la Faja Volcánica Transmexicana.

Estación	Ubicación	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Tipo de suelo	Porcentaje de eventos registrados
ACIG	Acambay, México	19.9845	99.8823	Roca	1%
CUIG	El Pozo, CDMX	19.3290	99.1780	Roca	11%
DHIG	Demacú, Hidalgo	20.3003	99.0354	Roca	18%
IGIG	Irapuato, Guanajuato	20.7530	101.3278	Roca	8%
MOIG	Morelia, Michoacán	19.6468	101.2271	Roca	10%
PPIG	Popocatepetl, México	19.0670	98.6281	Roca	22%
TPIG	Tehuacán, Puebla	18.4202	97.3619	Roca	12%
YAIG	Yautepec, Morelos	18.8625	99.0669	Roca	18%



Donde A_i es una variable característica del movimiento del terreno, ya sea la aceleración o velocidad, para el i -ésimo registro, $f(M_i, R_i)$ es la forma funcional en la que se incluyen la dependencia de la magnitud, M_i , así como la dependencia de la distancia, R_i , y, en otros casos, variables relacionadas a efectos como tipo hanging wall, foot wall, efectos de sitio, entre otros. mientras que ϵ_r y ϵ_e son componentes de variabilidad estocásticos, que son llamados registro-a-registro y evento-a-evento, respectivamente.

La forma funcional, que se ha decidido utilizar dentro de este trabajo, ha sido la de [28] a través de la modificación presentada en [24]. Además se muestra una separación de la dependencia de la magnitud y de la dependencia de la distancia, que son las siguientes:

$$f(M_i, R_i) = f(M_i) + f(R_i) \quad (2a)$$

$$f(M_i) = a + b(M_i - 6) + c(M_i - 6)^2 \quad (2b)$$

$$f(R_i) = -\log(R_i^2 + h'^2)^{1/2} + d(R_i + h'^2)^2 \quad (2c)$$

La Ecuación 2b expresa la dependencia de la magnitud, que consta de un polinomio de primer o segundo grado [32], del que se obtienen los coeficientes a , b y c a partir del análisis de regresión. El polinomio es de primer grado cuando el cálculo se realiza para aceleraciones máximas de terreno, por lo que c toma el valor de cero, mientras que para aceleraciones espectrales se debe de tomar íntegra la formulación. El cuanto a h'^2 , que es una distancia ficticia, se calcula a partir de la regresión, así como se lleva a cabo con los otros coeficientes [32]. Para encontrar la solución a la Ecuación 1, es necesario linearizar el problema usando expansiones de Taylor de primer grado, quedando la función en forma matricial, como se muestra en la Ecuación 3:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{XB} + \mathbf{e} \quad (3)$$

Donde, \mathbf{Y} es un vector conformado por la suma del logaritmo base 10 de los valores correspondientes a de aceleraciones (o velocidades) mas el logaritmo base 10 del valor de la distancia epicentral, \mathbf{X} es una matriz conformada por los valores conocidos asociados a cada una de las variables (véase [24]), \mathbf{B} es el vector de los coeficientes de la regresión y \mathbf{e} es el vector de las desviaciones, que está compuesto por ϵ_r y ϵ_e .

Posteriormente, para determinar los coeficientes de la regresión se ha planteado aplicar el método de máxima verosimilitud [33] de una etapa, debido a que como es mencionado por [18] los métodos tradicionales de mínimos cuadrados y mínimos cuadrados ponderadores tienden a ser inestables para formas funcionales no lineales o no resuelven el desacoplamiento entre las distancias de registros y las magnitudes de cada uno de los eventos sísmicos, como se puede observar en las Ecuaciones 2a, 2b y 2c. Estas inestabilidades causan que los coeficientes de la regresión que, en este caso son a , b , c y d , tengan resultados poco confiables y carentes de significado físico.

En contraste los métodos de máxima verosimilitud otorgan mejores resultados después de realizar los análisis de regresión. En [18], [24] se expresa que cualquiera de estos dos métodos otorga resultados igualmente correctos, con la única diferencia de que el método de una etapa [28] es menos eficiente en cuanto al tiempo de los resultados, aunque con una elegancia matemática mucho mayor, lo que lo lleva a ser más comprensible, y, por tanto, más utilizado. En cambio, el método de dos etapas [16], [24] separa por completo el análisis de la dependencia de la magnitud y la dependencia de la distancia, usando por tanto dos verosimilitudes en cada una de las etapas, mientras que el método de una etapa lo realiza al mismo tiempo y con un solo cálculo de verosimilitud. En otros aspectos, los métodos que utilizan la teoría bayesiana pueden ser incluso más efectivos que todos los

métodos anteriores, no obstante, para aplicar estos métodos es necesario considerar parámetros en lugar de coeficientes de regresión, como lo son los relacionados a la expansión geométrica de frente de onda, anelasticidad, atenuación intrínseca, atenuación extrínseca, el factor de calidad de la región, entre otros [18], mismos que dependen de cada una de las regiones o subregiones de las zonas sísmogénicas analizadas y que, para el caso de la Faja Volcánica Transmexicana, no se encuentran determinados. Hasta el momento aún se busca calcular estas características de la Faja Volcánica Transmexicana. Por la facilidad de uso del método de una etapa y su desarrollo matemático sencillo se optó por usarlo.

En los métodos de máxima verosimilitud, la verosimilitud, L , es obtenida a partir de la siguiente ecuación:

$$L = (2\pi)^{-N/2} |\mathbf{V}|^{-1/2} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\mathbf{Y} - \mathbf{XB})^T \mathbf{V}^{-1}(\mathbf{Y} - \mathbf{XB})\right\} \quad (4)$$

En ésta, \mathbf{V} es la matriz conformada por las varianzas y las covarianzas asociadas a las variables aleatorias que intervienen en este análisis, que en este caso serían las relacionadas a las desviaciones sitio-a-sitio y evento-a-evento. El vector de estimados de los coeficientes de la regresión $\hat{\mathbf{B}}$ se calcula de la misma forma que para el método de mínimos cuadrados generalizados, sin embargo, no es el mismo que para el método de mínimos cuadrados ordinarios, ya que en [34] fue comprobado que no otorga resultados adecuados. El vector $\hat{\mathbf{B}}$ se presenta como:

$$\hat{\mathbf{B}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{Y} \quad (5)$$

Análisis de datos emparejados

Una prueba t de Student para datos emparejados se utiliza a partir de la proposición de tener dos conjuntos de datos P y O con valores esperados $E(P)=\mu_1$ y $E(O)=\mu_2$, y de la supo-

sición de que cada uno de ellos se encuentra normalmente distribuido, es decir, contando con una media igual a cero, así como otro parámetro que sea la desviación estándar de cada uno de ellos. Al llamar a P al conjunto de los datos predichos por la relación de atenuación calculada, así como O al conjunto de los datos observados, es decir, los registrados por las estaciones sísmicas, entonces se puede formar un vector de diferencias de la siguiente manera:

$$D_i = P_i - O_i \quad (6)$$

Esto implicaría que las diferencias que se calculan son iguales a los residuos de la regresión, en la forma $D_i = Y_i - E[Y_i]$, o viceversa. Con base a lo anterior, y suponiendo que cada una de las diferencias es diferente entre sí, para todos sus casos, el valor esperado de la diferencia de los conjuntos equivale a:

$$\mu_D = \mu_1 - \mu_2 \quad (7)$$

Lo que supone que el conjunto de las diferencias D_i se halla a su vez normalmente distribuida, con una media μ_D y una varianza σ_D^2 . La hipótesis nula es representada como $H_0: \mu_D=0$, puesto que ésta indica que la variación debe de ser mínima entre los conjuntos utilizados, así como en la media de los totales [35]. Además, como se refiere en [36], para llevar a cabo esta prueba es necesario que los conjuntos analizados sean dependientes entre sí, pues de lo contrario debería de llevarse a cabo una prueba t de dos muestras. El estadístico t para el análisis de los datos de forma emparejada es calculado a partir de la siguiente formulación:

$$t = \frac{\bar{d}}{\frac{s_D}{\sqrt{n}}} \quad (8)$$

Donde \bar{d} y s_D son la media y la desviación estándar del vector de diferencias, que equi-



valdrían a μ_D y a σ_D , respectivamente. En la Ecuación 8, n corresponde al número total de eventos registrados, y, a partir de éste, se obtiene la cantidad de grados de libertad, ν , que equivalen a $n-1$. Para el cálculo del estadístico, por lo general, se considera un nivel de significancia, al que se le denomina como α y que, para esta investigación, ha sido tomado igual al 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base en los registros sísmicos que se presentan en la Tabla 1, se procesaron cada uno de sus sismogramas. De tal manera que se pudiera obtener la velocidad del movimiento del terreno al hacer un proceso de deconvolución, para el que se usaron constantes empíricas de cada uno de los aparatos de las estaciones sísmicas, que en la mayoría de los casos son sismómetros STS-2, salvo para el caso de la estación de Acambay, México, donde se encuentra un sensor tipo Trillium 120PA. De la misma manera, para algunos de los registros se aplicó un proceso de deconvolución a través de la función de transferencia, con ayuda de las especificaciones de polos y ceros de los mismos aparatos, con el fin de corroborar que los resultados obtenidos al aplicar la constante empírica fueran aproximadamente iguales.

Las constantes empíricas y las especificaciones de polos y ceros de los aparatos fueron provistas por el Servicio Sismológico Nacional [30]. Una vez hecho el proceso de deconvolución para todos los casos, se derivaron estos registros de velocidad, con ayuda del software Seismic Analysis Code (SAC), de forma en que se pudieran determinar las aceleraciones máximas del terreno (PGA). Cabe mencionar que este programa de cómputo utiliza por defecto el algoritmo para derivación entre dos puntos.

Posterior a esto, se tomaron las PGAs de cada uno de los registros y, partiendo de éstas y de las distancias epicentrales de todos los registros, se hizo un depurado de las señales para determinar si éstas se encontraban adecuadamente registradas, pues se observaba una confusión entre el ruido ambiental y las aceleraciones correspondientes al evento sísmico. En otros casos, además del ruido, tal como sucede en la estación IGIG, se hallaban incongruencias con los valores registrados, pues para algunos eventos si el registro se tenía en una distancia lejana, de alrededor de los 250 km o más, se mostraban aceleraciones que no correspondían a las reales. En muchos de los registros para esta estación se vio tal complicación, por lo que se trató de que se tuvieran los mejores y quitar aquellos que no. En otras oportunidades se pudo apreciar que había picos grandes, que eran muy próximos entre sí, lo que se aprecia únicamente en las señales registradas por esta estación y sucede sobre todo en los últimos años, por lo que se especula la posibilidad de una mala ubicación por parte de esta estación o por la existencia de algún factor que induzca picos de manera repetitiva y que deba revisarse en investigaciones posteriores.

Después de reducir la base de datos al extraer las señales pobremente registradas, como se ha mencionado en el párrafo anterior, se obtuvo una cantidad total de 81 registros que se pueden observar en la Tabla 3.

Tabla 3. Comparación entre el total de registros sísmicos iniciales, usados y removidos.

Número de evento	Número de registros iniciales	Número de registros usados	Porcentaje de registros removidos
1	2	1	50%
2	3	3	0%
3	2	1	50%
4	4	3	25%

Número de evento	Número de registros iniciales	Número de registros usados	Porcentaje de registros removidos
5	3	3	0%
6	3	3	0%
7	2	2	0%
8	3	3	0%
9	7	6	14%
10	7	6	14%
11	7	5	28%
12	6	5	16%
13	5	4	20%
14	5	5	0%
15	6	5	16%
16	7	2	70%
17	5	5	0%
18	7	3	57%
19	7	5	28%
20	6	3	50%
21	7	4	42%
22	7	4	42%

En el apéndice se muestra la base de datos de los eventos sísmicos registrados una vez que fueron removidos los registros que no satisficieron los criterios de exclusión considerados. También se exhiben el evento, las estaciones que registraron el sismo, así como los valores de aceleración máxima de terreno en sus coordenadas este-oeste (E-W), norte-sur (N-S) y la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de éstas con la que se ha hecho el análisis de regresión.

Ya con la base de datos filtrada, se hizo la regresión a partir de aplicar el método de máxima verosimilitud (Ecuación 5) para lo que fue necesario conformar las matrices varianza-covarianza para cada uno de los eventos e incluirlas como bloques dentro de la matriz general, así como del vector de los términos expresados en logaritmos base 10, Y , la cual incluyó las aceleraciones máximas de terreno (PGA) y las distancias epicentrales, R , en km. Asimismo, la matriz de los términos asocia-

dos a los coeficientes de la regresión, X , fue calculada, de tal manera que se determinaron los siguientes resultados de la relación de atenuación:

Tabla 4. Coeficientes y desviaciones de la regresión.

a	b	d	h'	ϵ_e	ϵ_r
1.5789	0.3383	-0.0015	3.70	0.2778	0.4686

Los coeficientes de la Tabla 4 deben ser incluidos dentro de las Ecuaciones 1-2c de tal manera que pueda escribirse algebraicamente la relación de atenuación.

Para comparar los datos observados por las estaciones sísmicas desplantadas dentro de la Faja Volcánica Transmexicana y los valores obtenidos a partir de la relación de atenuación para así observar las variaciones entre los datos originales, se dispuso inicialmente de revisar los residuos de la regresión, que se obtuvieron a través de la división entre las aceleraciones observadas y las predichas, de la misma manera en que se realiza dentro de [16]. Por lo general, los residuos son una resta entre el valor esperado y el valor observado, pero muchos de los autores, como el mencionado con anterioridad, practican esta modalidad en forma de cociente.

En la Figura 5 se muestran los residuos para este análisis de regresión, de la cual puede decirse que existe una variación muy alta de los datos sobre todo para distancias cercanas a la fuente, de tal manera que no se hallarían correctamente representadas por la relación de atenuación como podría esperarse. Lo anterior sucede para distancias de entre 0 y 70 km de manera visual, mientras que entre más se alejan los registros de la fuente, mejor representados se muestran los cocientes, pues la mayoría de los puntos tienen valores por debajo de diez, salvo pocos casos excepcionales.



Por este hecho, para determinar si los valores esperados tenían un adecuado ajuste con respecto a los valores observados, y a su vez que se corroboraba que los estimados para distancias cercanas a la fuente no eran correctamente representados por la relación de atenuación, se llevó a cabo un análisis de datos emparejados, en el que se tomaron las diferencias entre el vector de datos esperados y el vector de datos observados.

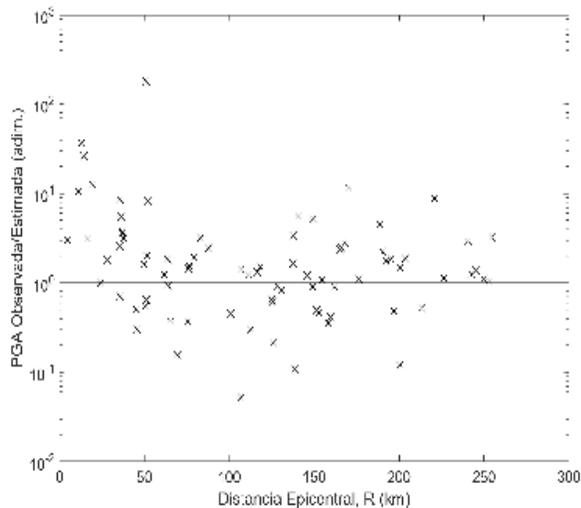


Figura 5. Residuos de la aceleración observada con referencia a la estimada, graficando contra la distancia epicentral.

De este análisis, si se consideran todos los datos, es decir, los datos para distancias iguales a 0 km hasta las distancias más lejanas, se desprendió que las diferencias poseían una media equivalente a $\bar{d} = -0.6696$, mientras que había una desviación estándar equivalente a $s_D = 2.7225$. Al conocer que el total de datos usados finalmente fue de 81, se obtuvo un valor para t equivalente a 2.2134. Con base en el estadístico ya calculado, se determinó el valor asociado a un nivel de significancia de 5% y a un número de grados de libertad igual a 80, que es igual a $t_{(\alpha, \nu)} = 1.99$, por lo cual se determinó que para el conjunto global de distancias la relación

de atenuación obtenida no era representativa. Lo anterior tuvo como significado que la forma funcional expresada por [28] no es la mejor para modelar la atenuación de la aceleración máxima de terreno para los sismos corticales de la Faja Volcánica Transmexicana, sin embargo, el uso de los métodos de máxima verosimilitud de [24] son útiles para calcular las relaciones de atenuación, pues con base en ellos se obtienen estas expresiones rápida y efectivamente. De modo en que se pudiera corroborar que la relación de atenuación tenía efecto para ciertas distancias, se analizaron los datos pareados para todos los registros que hubieran sido detectados a distancias mayores a los 0 km, por lo que se propuso que se tomaran como límite los valores 50 y 200 km, debido a que las aceleraciones máximas de terreno se buscan para distancias cercanas a la fuente. En la Tabla 5 se muestran los resultados del análisis.

Tabla 5. Resultados del análisis de datos pareados para distancias entre los 50 y 200 km.

Límite inferior (km)	Límite superior (km)	Número de registros	Grados de libertad, ν	t	$t_{(\alpha, \nu)}$
50	200	51	50	-1.2014	± 2.009

Lo mostrado por este último análisis supuso que la relación de atenuación efectivamente proyecta resultados con aproximaciones aceptables para distancias entre los 50 y los 200 km. Considerando esto, se tomaron como válidos los resultados expresados dentro de la Tabla 4, debido al grado de ajuste calculado, para a la postre graficar los datos obtenidos para las mismas distancias límite mencionadas en conjunto con la curva de tendencia de cada una de las magnitudes. Además, se agregaron las curvas de tendencia en las que se añade la desviación estándar, y así se obtuvo lo mostrado por Figura 7 y Figura 8.

En las gráficas correspondientes a las magnitudes 2.7, 3.6, 3.7, 3.9, 4.0 y 4.6 se puede observar que los resultados obtenidos por la relación de atenuación se encuentran justo encima de las líneas de tendencia, es decir, del valor esperado de la aceleración máxima de terreno, después de haber hecho la regresión, lo que indica un buen ajuste incluso sin tomar en cuenta las desviaciones estándar. Para los casos de las magnitudes iguales a 3.1, 3.4, 3.5 y 3.8 se aprecia una mayor volatilidad de los datos, lo que podría ser por causa de otros efectos que no se han contemplado dentro de este estudio, como son los efectos de sitio.

En las Figura 6, 7 y 8 es apreciable, incluso gráficamente, que más del 80% de los datos

caen dentro de los límites de las desviaciones estándar, lo que indica que el método de máxima verosimilitud de una etapa es efectivo para calcular sencillamente relaciones de atenuación, sin embargo, se debe de considerar, también, el entrecruzamiento entre las magnitudes, lo que siempre ha sido un tema de discusión entre toda la comunidad sismológica, pues no queda del todo definido hasta qué límites se puede determinar cuál es la aceleración correspondiente a una magnitud requerida, es decir, si se observa cualesquiera dos magnitudes consecutivas, se podrá ver que, para todos los casos, si superpusiéramos las dos gráficas, en la práctica serían casi idénticas una a la otra, salvo por un desfaseamiento por el incremento de la misma magnitud.

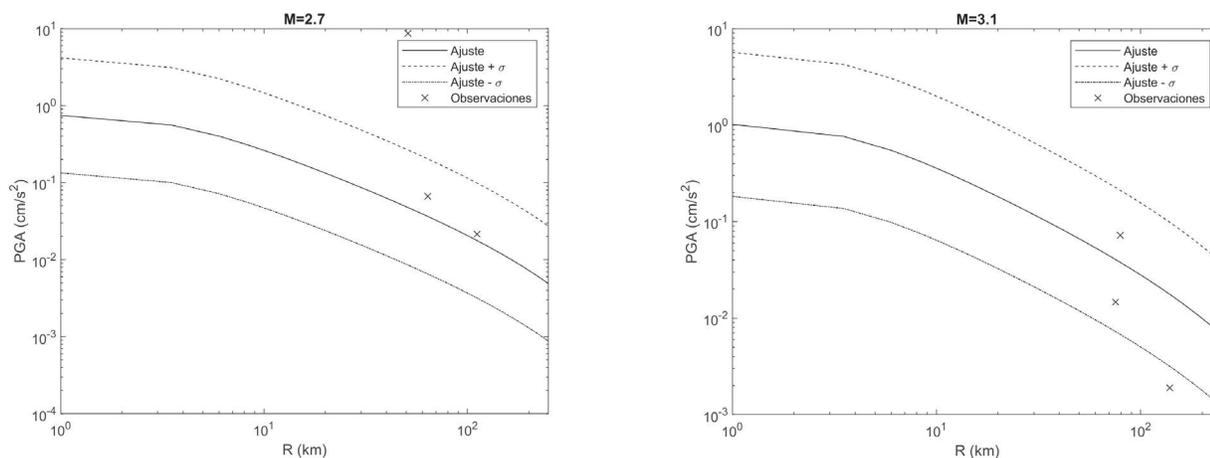


Figura 6. Curvas de ajuste para las aceleraciones máximas de terreno (PGA, en cm/s^2) contra distancias epicentrales (R) para magnitudes 2.7 y 3.1. En todos los casos se muestran las curvas de tendencia (líneas continuas), así como las desviaciones estándar (líneas punteadas) y los valores registrados por las estaciones sísmicas (observaciones, cruces).

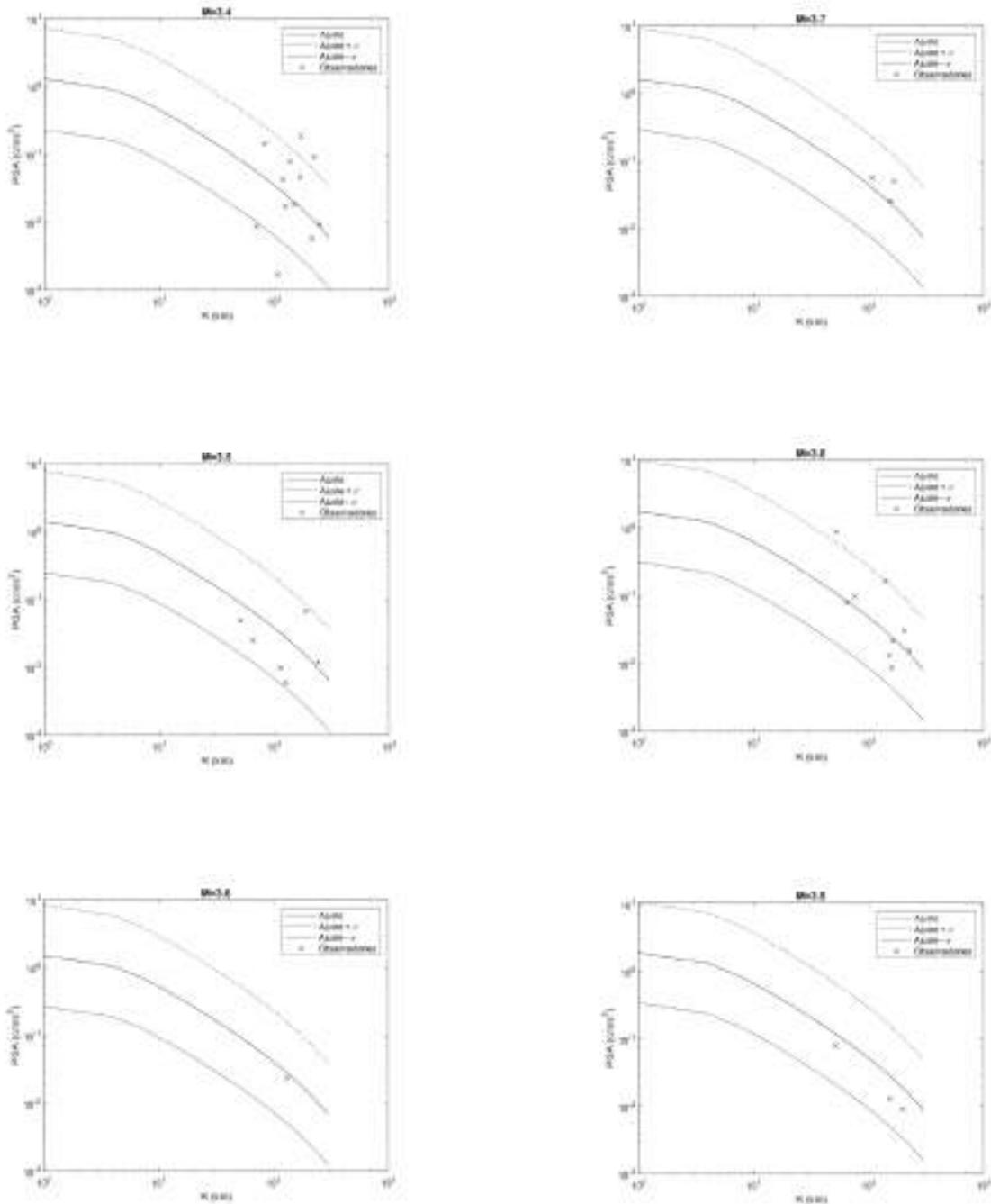


Figura 7. Curvas de ajuste para las aceleraciones máximas de terreno (PGA, en cm/s²) contra distancias epicentrales (R) para magnitudes 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9. En todos los casos se muestran las curvas de tendencia (líneas continuas), así como las desviaciones estándar (líneas punteadas) y los valores registrados por las estaciones sísmicas (observaciones, cruces).

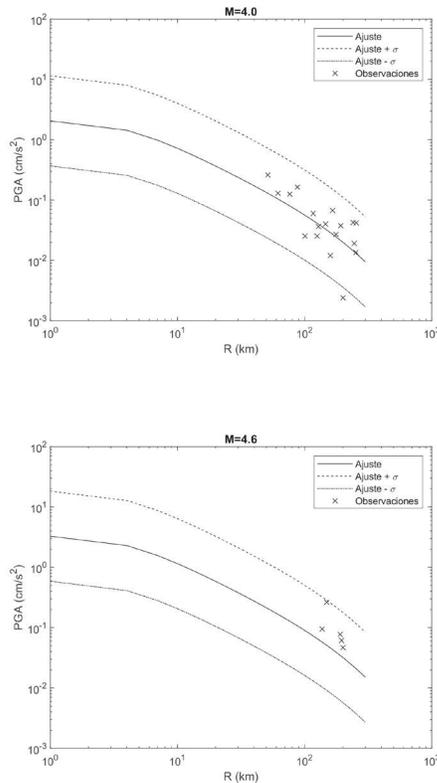


Figura 8. Curvas de ajuste para las aceleraciones máximas de terreno (PGA, en cm/s^2) contra distancias epicentrales (R) para magnitudes 4.0 y 4.6. En todos los casos se muestran las curvas de tendencia (líneas continuas), así como las desviaciones estándar (líneas punteadas) y los valores registrados por las estaciones sísmicas (observaciones, cruces).

CONCLUSIONES

Una relación de atenuación para estimar las aceleraciones máximas de terreno de la zona Este de la Faja Volcánica Transmexicana ha sido calculada dentro de este artículo basándose en utilizar sismos corticales someros con profundidades entre 1 y 20 km y magnitudes que rondan entre $2.7 \leq M \leq 4.6$, los cuales ocurrieron dentro de la misma región y fueron registrados por estaciones sísmicas de la misma área, entre los años de 2005 y 2017. Además, para calcular esta expresión fue utilizado el método de máxima verosimilitud de una eta-

pa de [24]. La relación de atenuación obtenida tiene la siguiente forma final:

$$\log_{10} A_n = -0.4509 + 0.3383M - \log_{10} r - 0.0015r \pm 0.7464P \quad (9a)$$

$$r = \sqrt{R^2 + 13.69} \quad (9b)$$

En la expresión 9a, el término correspondiente a P indica el percentil de la aceleración máxima de terreno a considerarse, de tal manera que se tomaría como $P=0$ al valor esperado o valor medio, es decir, el percentil 50, mientras que P tendría el valor de 1 cuando se toma en cuenta el percentil asociado a una desviación estándar. Además, en sismología es común considerar el percentil 84 como un valor estadístico idóneo, como es mencionado por [18]. Para usar esta expresión, es necesario retomar magnitudes, M , que se encuentren entre 2.7 y 4.6, ya que fueron las únicas que se tomaron para calcular y que provienen del Servicio Sismológico Nacional. De la misma manera, se deben de usar para su cálculo, distancias epicentrales, R , que, como se pudo apreciar dentro del análisis de datos emparejados, deben de estar entre los 50 y los 200 km, pues si se hiciera la aplicación de esta curva para estimar valores para distancias cercanas a las fuente, los resultados que se tendrían serían erróneos hasta cierto punto, ya que las variabilidades que se han calculado, con base en el análisis de residuos, son considerablemente altas, y que en muchos de los casos llegan a decuplicar (o más) las ampliificaciones de los valores esperados. Lo anterior posibilita aplicar factores que contemplen la proximidad a la falla para futuras investigaciones relacionadas al cálculo de expresiones como ésta, o que se agreguen dentro de la forma funcional características de los efectos de sitio, como la velocidad de onda de corte en los 30 metros superficiales, V_{s30} , o realizar



un análisis de cocientes espectrales [37], los cuales no fueron considerados directamente en este artículo, y que podrían mostrar cambios considerables en los resultados de la relación de atenuación.

Asimismo, se sugiere que, para magnitudes por encima de $M=4.6$, se revise la aplicabilidad de las expresiones expuestas en este artículo, pues, debido a la falta de instrumentación y ocurrencias dentro de esta zona, es ardua la labor para determinar un modelo real que comprenda no sólo magnitudes en las que las deformaciones en el suelo se comporten dentro del rango elástico, sino también uno que incluya magnitudes superiores en las que el comportamiento es por completo diferente. Además, a partir de la base de datos que se muestra al final de este texto, y de los registros sísmicos de estos eventos, puede surgir un conjunto de ecuaciones para las ordenadas espectrales, de tal manera que en un futuro se pueda elaborar un espectro de diseño propio de la zona con el que se pueda realizar los cálculos estructurales de edificios al interior de esta provincia sísmica, no obstante, por el momento conviene utilizar aún las ecuaciones de [13], por las razones antedichas.

Finalmente, es menester usar registros de aceleración, en lugar del uso de sismogramas, de tal manera que se pueda comparar los resultados obtenidos en este trabajo y los que pueden proveer dichas aceleraciones, así, se podrá determinar si tal expresión es, en efecto, apropiada para las estimacio-

nes de las aceleraciones máximas de terreno para las distancias mencionadas. De lo contrario, habrá de calcularse una expresión que esté basada en las aceleraciones máximas de terreno registradas por acelerómetros per sé.

APÉNDICE

En la Tabla 6, se muestra la base de datos reducida utilizada en esta investigación. Para cada uno de los eventos sísmicos registrados dentro de la Faja Volcánica Transmexicana, se anexan las estaciones que compilaron cada una de las señales, las aceleraciones máximas de terreno (PGA) para la orientación Este-Oeste, la orientación Norte-Sur, así como la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los últimos dos términos, la cual se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$PGA_{HOR} = \sqrt{\frac{((PGA_{E-W})^2 + (PGA_{N-S})^2)}{2}} \quad (A1)$$

Igualmente, en la Tabla 6 son mostrados los valores esperados de aceleración máxima que se calcularon a partir de la relación de atenuación obtenida en este trabajo (Ecuaciones 9a-9), los cuales se muestran en la columna con el encabezado $E(PGA_{HOR})$. Finalmente, en la última columna se exponen las diferencias entre los valores esperados y los valores observados. Todos los valores de aceleración listados, así como las diferencias, se encuentran en cm/s^2 (gals), las que son unidades básicas para este tipo de análisis.

Tabla 6. Base de datos reducida de eventos sísmicos utilizados dentro de este trabajo.

No. Evento	Estación	PGA _{E-W}	PGA _{N-S}	PGA _{HOR}	E(PGA _{HOR})	Di
1	DHIG	0.1044	-0.1423	0.1248	0.0800	-0.0448
2	DHIG	-0.0101	0.0095	0.0098	0.0325	0.0227
	PPIG	-0.0248	-0.0247	0.0248	0.0658	0.0411
	YAIG	-0.0507	-0.0467	0.0488	0.0894	0.0407
3	PPIG	0.0465	0.0623	0.0549	0.1097	0.0547
4	DHIG	3.7009	3.6851	3.6930	0.2936	-3.3994

No. Evento	Estación	PGAE-W	PGAN-S	PGAHOR	E(PGAHOR)	Di
	PPIG	0.0218	0.0295	0.0260	0.0240	-0.0020
	YAIG	-0.0544	-0.0463	0.0505	0.0216	-0.0289
5	DHIG	-0.0238	-0.0231	0.0235	0.0284	0.0049
	PPIG	-0.3395	0.4030	0.3726	0.1439	-0.2287
	YAIG	-0.7065	-0.8278	0.7695	0.1411	-0.6284
6	DHIG	-0.0176	0.0167	0.0172	0.0260	0.0088
	PPIG	0.4418	0.4323	0.4371	0.1181	-0.3190
	YAIG	0.3170	-0.5082	0.4236	0.1182	-0.3054
7	DHIG	-0.0057	-0.0062	0.0059	0.0278	0.0218
	PPIG	0.0847	0.1010	0.0932	0.1331	0.0399
8	DHIG	0.0381	-0.0345	0.0364	0.0397	0.0034
	MOIG	0.0307	-0.0434	0.0376	0.0213	-0.0163
	PPIG	0.1581	-0.1701	0.1642	0.0671	-0.0971
9	CUIG	0.0238	-0.0266	0.0253	0.0412	0.0160
	DHIG	1.4586	1.2691	1.3671	0.4427	-0.9245
	IGIG	-0.0477	0.0358	0.0422	0.0145	-0.0278
	MOIG	-0.0150	-0.0225	0.0191	0.0139	-0.0052
	PPIG	-0.0132	-0.0106	0.0120	0.0288	0.0168
	YAIG	0.0187	-0.0334	0.0271	0.0246	-0.0025
10	CUIG	0.0605	0.0601	0.0603	0.0457	-0.0146
	DHIG	-18.2441	22.5625	20.5172	0.5538	-19.9634
	IGIG	-0.0474	0.0358	0.0420	0.0130	-0.0290
	MOIG	0.0139	0.0131	0.0135	0.0131	-0.0004
	PPIG	0.0458	-0.0337	0.0402	0.0330	-0.0072
	YAIG	-0.0434	-0.0848	0.0674	0.0271	-0.0403
11	CUIG	0.0466	0.0380	0.0425	0.0282	-0.0143
	DHIG	5.4024	-2.9785	4.3622	0.4127	-3.9494
	MOIG	0.0093	-0.0094	0.0093	0.0084	-0.0009
	PPIG	-0.0191	0.0175	0.0183	0.0201	0.0017
	YAIG	0.0402	0.0517	0.0463	0.0167	-0.0297
12	ACIG	0.0845	0.0752	0.0800	0.0857	0.0057
	CUIG	0.0201	-0.0229	0.0215	0.0241	0.0026
	DHIG	-0.0136	0.0129	0.0133	0.0267	0.0134
	PPIG	-0.0150	-0.0161	0.0156	0.0138	-0.0018
	YAIG	-0.0227	-0.0375	0.0310	0.0166	-0.0144
13	CUIG	0.0246	-0.0258	0.0252	0.0557	0.0305
	DHIG	-0.0022	0.0026	0.0024	0.0199	0.0175
	PPIG	0.1456	-0.1110	0.1295	0.1039	-0.0256
	YAIG	0.2239	-0.2924	0.2604	0.1296	-0.1308
14	CUIG	-0.2458	-0.3669	0.3122	0.1731	-0.1392
	MOIG	0.0104	0.0131	0.0119	0.0096	-0.0022
	PPIG	0.3739	-0.4169	0.3960	0.1252	-0.2707
	TPIG	0.0670	-0.0660	0.0665	0.0149	-0.0516
	YAIG	-0.8083	-1.3840	1.1333	0.1332	-1.0001
15	CUIG	2.7432	-2.0627	2.4269	0.8117	-1.6153



No. Evento	Estación	PGAE-W	PGAN-S	PGAHOR	E(PGAHOR)	Di
	DHIG	-0.0018	0.0015	0.0017	0.0323	0.0306
	MOIG	-0.0047	0.0067	0.0058	0.0112	0.0054
	PPIG	0.0093	0.0082	0.0088	0.0566	0.0478
	TPIG	0.1095	-0.0697	0.0918	0.0105	-0.0812
16	PPIG	0.0363	-0.0333	0.0349	0.1168	0.0820
	TPIG	-0.0635	-0.0505	0.0574	0.0407	-0.0167
17	CUIG	-0.0705	-0.0514	0.0617	0.0332	-0.0285
	DHIG	-0.0868	0.0666	0.0774	0.0347	-0.0427
	PPIG	0.2876	0.2365	0.2633	0.0509	-0.2124
	TPIG	0.0985	-0.0907	0.0947	0.0576	-0.0371
	YAIG	0.0491	0.0442	0.0467	0.0317	-0.0150
18	PPIG	-0.0118	0.0143	0.0131	0.0285	0.0154
	TPIG	0.0748	0.0825	0.0787	0.1204	0.0416
	YAIG	0.0106	0.0076	0.0092	0.0190	0.0097
19	CUIG	-0.1079	0.0876	0.0983	0.0690	-0.0293
	DHIG	-0.0097	0.0078	0.0088	0.0250	0.0162
	PPIG	-10.6441	12.3926	11.5515	0.4350	-11.1164
	TPIG	0.1793	0.1505	0.1655	0.0298	-0.1357
	YAIG	-0.9027	0.8628	0.8830	0.1090	-0.7740
20	DHIG	0.0180	0.0245	0.0215	0.0177	-0.0038
	PPIG	-0.0672	0.0650	0.0661	0.0363	-0.0298
	YAIG	7.5097	-9.6570	8.6502	0.0476	-8.6026
21	CUIG	-0.0768	-0.0676	0.0724	0.0379	-0.0345
	DHIG	0.0015	0.0022	0.0019	0.0177	0.0158
	PPIG	-0.1480	0.1489	0.1485	0.1489	0.0004
	YAIG	-0.0136	0.0157	0.0147	0.0404	0.0257
22	CUIG	0.1589	0.1271	0.1438	0.0451	-0.0987
	PPIG	0.1945	-0.1769	0.1859	0.0162	-0.1696
	TPIG	0.0804	-0.0743	0.0774	0.0226	-0.0548
	YAIG	0.1404	-0.1359	0.1382	0.0848	-0.0534

AGRADECIMIENTOS

Se agradece fundamentalmente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haber provisto los fondos necesarios para desarrollar esta investigación, así como al Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial al departamento del Servicio Sismológico Nacional por haber provisto los registros sísmicos de velocidad y aceleración que se

utilizaron dentro de este trabajo. Los autores agradecen al grupo de trabajo de la maestría en Ciencias línea terminal en Estructuras de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro por hacer posible realizar este artículo.

REFERENCIAS

[1] L. Ferrari, T. Orozco-Esquivel, V. Manea, and M. Manea, "The dynamic history

of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone," *Tectonophysics*, vol. 522–523, pp. 122–149, 2012.

[2] L. Ferrari, "Avances en el Conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la Última Decada," *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. LIII, pp. 84–92, 2000.

[3] A. Gómez-Tuena, M. T. Orozco-Esquivel, and L. Ferrari, "Igneous Petrogenesis of the Trans-Mexican Volcanic Belt," *GSA Special Papers*, vol. 2422, no. 05, pp. 129–181, 2007.

[4] A. Demant, "Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus Problemas de Interpretación," *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista*, vol. 2, no. 2, pp. 172–187, 1978.

[5] A. Clemente et al., "On the Behavior of Site Effects in Central Mexico (the Mexican Volcanic Belt - MVB), Based on Records of Shallow Earthquakes that Occurred in the Zone Between 1998 and 2011," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 14, no. 6, pp. 1391–1406, 2014.

[6] F. R. Zúñiga, "El Otro Riesgo Sísmico: los Sismos en el Centro de México," in *XI Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica*, 2010, p. 15.

[7] A. Mendoza-Ponce, Á. Figueroa-Soto, D. Soria-Caballero, and V. H. Garduño-Monroy, "Active faults sources for the Pátzcuaro-Acambay fault system (Mexico): Fractal analysis of slip rates and magnitudes Mw estimated from fault length," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 18, no. 11, pp. 3121–3135, 2018.

[8] F. R. Zúñiga, J. M. Gómez-González, and M. Guzmán Speziale, "La Sismicidad en Querétaro," in *El Valle de Querétaro y su Geotorno*, 1st ed., J. Arzate Flores and A. Cortés, Eds. Querétaro: CONCYTEQ, 2007, p. 171.

[9] F. R. Zúñiga, G. Suárez, Á. Figueroa-Soto, and A. Mendoza-Ponce, "A first-order seismotectonic regionalization of Mexico for seismic hazard and risk estimation," *Journal of Seismology*, vol. 21, no. 6, pp. 1295–1322, 2017.

[10] INEGI, "Instituto Nacional de Estadística y Geografía." [Online]. Available: <https://www.inegi.org.mx/>. [Accessed: 27-Aug-2019].

[11] CFE, *Manual de Diseño de Obras Civiles Capítulo C.1.3 Diseño por Sismo*. México, D.F., México, 2015, p. 389.

[12] F. O. Strasser, J. J. Bommer, and N. A. Abrahamson, "Estimating Ground-Motion Variability: Issues, Insights & Challenges," in *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 2008, p. 8.

[13] N. A. Abrahamson and W. J. Silva, "Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes," *Seismological Research Letters*, vol. 68, no. 1, pp. 94–127, 1997.

[14] CFE, *Manual de Diseño de Obras Civiles Capítulo C.1.3 Diseño por Sismo*. México, D.F., México: Instituto de Investigaciones Eléctricas, 2008, p. 745.

[15] M. Ordaz, E. Reinoso, S. K. Singh, E. Vera, and J. M. Jara, "Espectros de respuesta en diversos sitios del Valle ante temblores postulados en la brecha de Guerrero," in *Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, 1989, pp. A187–A198.

[16] W. B. Joyner and D. M. Boore, "Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong-Motion Records including Records from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 71, no. 6, pp. 2011–2038, 1981.

[17] S. K. Singh and M. Ordaz, *Sismicidad y movimientos fuertes en México: una visión actual*. México, D.F.: Centro Nacional de Prevención de Desastres, 1990.

[18] D. García, "Estimación de Parámetros del Movimiento Fuerte del Suelo para Terremotos Interplaca e Intraslab en México Central," Universidad Complutense de Madrid, 2006.

[19] H. Cruz, F. Chávez, and T. Furumura, "Differences in Attenuation of Ground Motion Perpendicular to the Mexican Subduc-



tion Zone between Colima and Guerrero: an Explanation based on Numerical Modeling," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 99, no. 1, pp. 400–406, 2009.

[20] M. Mora, D. Arroyo, M. Ordaz, D. García, and K. Singh, "Modelo para la Atenuación de la Seudoaceleración Generada por Sismos Interplaca en la Zona de Subducción Mexicana," in *XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, 2009, pp. 1–21.

[21] M. Ordaz, S. K. Singh, and A. Arciniega, "Bayesian Attenuation Regressions: an Application to Mexico City," *Geophysical Journal International*, vol. 117, no. 2, pp. 335–344, 1994.

[22] D. Arroyo and M. Ordaz, "Multivariate Bayesian Regression Analysis Applied to Pseudo-Acceleration Attenuation Relationships," in *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 12–17.

[23] Q. Rodríguez-Pérez, "Ground-Motion Prediction Equations for Near-Trench Interplate and Normal-Faulting Inslab Subduction Zone Earthquakes in Mexico," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 104, no. 1, pp. 427–438, 2014.

[24] W. B. Joyner and D. M. Boore, "Methods for Regression Analysis of Strong-Motion Data," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 83, no. 2, pp. 469–487, 1993.

[25] L. Manjarrez and S. García, "Atenuación del Valor de la Aceleración Máxima en Superficie de Sitios en Roca para Zonas en Subducción," in *XXVII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, 2014, pp. 1–8.

[26] A. Clemente, G. Arroyo, R. Zúñiga, Á. Figueroa, M. Pérez, and C. López, "Relación de Atenuación del Movimiento del Suelo para la Aceleración Máxima (PGA) sobre el Cinturón Volcánico Mexicano (MVB); Análisis por Trayectoria: Guerrero-Querétaro," *Revista de Ingeniería Sísmica*, vol. 93, no. 87, pp. 67–93, 2012.

[27] L. F. Pérez, "Análisis Bayesiano de Leyes de Atenuación Sísmica para la Región de

la Faja Volcánica Transmexicana," Universidad Autónoma de Querétaro, 2018.

[28] D. R. Brillinger and H. K. Preisler, "An Exploratory Analysis of the Joyner-Boore Attenuation Data," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 74, no. 4, pp. 1441–1450, 1984.

[29] J. A. Bayona Viveros, G. Suárez Reynoso, and M. Ordaz, "A probabilistic seismic hazard assessment of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico based on historical and instrumentally recorded seismicity," *Geofísica Internacional*, vol. 56, no. 1, pp. 87–101, 2017.

[30] SSN, "Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Servicio Sismológico Nacional, México," 2019. [Online]. Available: <http://www.ssn.unam.mx>. [Accessed: 28-Aug-2019].

[31] P. Goldstein and J. A. Snoke, "SAC Availability for the IRIS Community," *Incorporated Institutions for Seismology Data Management Center Electronic Newsletter*, 2005.

[32] W. B. Joyner and D. M. Boore, "Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion," in *Earthquake Engineering and Soil Dynamics II - Recent Advances in Ground-Motion Evaluation: Proceedings of the Specialty Conference*, 1988, pp. 43–102.

[33] S. R. Searle, *Linear Models*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1971.

[34] Y. Fukushima and T. Tanaka, "A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan," *Bulletin of the Geological Society of America*, vol. 80, no. 4, pp. 757–783, 1990.

[35] H. Hsu and P. A. Lachenbruch, "Paired T Test," *Wiley Encyclopedia of Clinical Trials*. John Wiley & Sons, Inc., pp. 1–3, 2008.

[36] J. L. Devore, *Probability & Statistics*, Eighth. Boston, MA: Cengage Learning, 2010.

[37] Y. Nakamura, "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface," *QR of RTR1*, vol. 30, no. 1, pp. 25–33, 1989.

MOVILIDAD DE PERSONAS EN SITUACIÓN DE DISCAPACIDAD MOTRIZ, COMPARACIÓN ENTRE UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BARCELONA Y DE QUERÉTARO

Mobility of people with motor disabilities, comparison between the Autonomous Universities of Barcelona and Querétaro

Carlos Augusto Hernández-Alcalá^{1*}, Àngel Cebollada-Frontera²,
Ovidio Arturo González-Gómez ¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro

²Universidad Autónoma de Barcelona

*Autor de correspondencia:
carlos1995alcala@gmail.com

RESUMEN

Las personas en situación de discapacidad viven dificultades al realizar sus tareas diarias. Las desatenciones sistemáticas a sus necesidades en aspectos como educación, movilidad, acceso a espacios públicos, transporte y trabajo han hecho que este colectivo se mantenga aislado y opte por nuevas formas de educación remota. Al respecto, la educación en línea y a distancia han crecido exponencialmente desde su creación, resultando una opción viable para las personas en situación de discapacidad, sin embargo, esta práctica normaliza la exclusión de este colectivo a la participación activa de actividades académicas y culturales. Las universidades deben proveer una educación inclusiva que pueda ser disfrutada por cualquier persona, para lograrlo son necesarios procesos bien definidos en su sistema de vinculación y seguimiento de estudiantes en situación de discapacidad. La recopilación de información estadística sobre este colectivo, el respeto por lugares reservados, las adecuaciones en las instalaciones y servicios, los cursos y talleres de sensibilización son herramientas que ayudan a promover la participación activa de este colectivo en estudios universitarios.

Este artículo compara los diferentes organismos de vinculación y seguimiento para alumnos en situación de discapacidad en diferentes universidades, es decir, en diferentes contextos económicos, sociales y culturales. La replicabilidad no es posible debido a las diferentes particularidades contextuales en cada institución, sin embargo, es una herramienta para parametrizar el alcance de un servicio de atención para alumnos con discapacidad que pueda incentivarlos a realizar estudios universitarios en modalidad presencial.

Palabras clave: movilidad, transporte público, espacio público, inclusión, exclusión.

ABSTRACT

People with disabilities experience daily difficulties in carrying out their daily tasks. The

systematic neglect of their needs in aspects such as education, mobility, access to public spaces, transport and work caused this group to remain isolated and opt for new forms of remote education. Online and distance education has grown exponentially since its inception, and it has resulted in a viable option for people with disabilities; however, this practice normalizes the exclusion of this group from the active participation in academic and cultural activities. Universities must provide an inclusive education that can be enjoyed by any person. To achieve this, a well-defined process in their system of linking and monitoring students in a situation of disability is necessary. The collection of statistical information on this group, respect for reserved places, adaptations in facilities and services, awareness courses and workshops are tools that help promote the active participation of this group in university studies.

This article makes a comparison of the different linking and monitoring organizations for students with disabilities in different universities with different economic, social and cultural contexts. Replicability is not possible due to the different contextual particularities in each institution; however, it is a tool to parameterize the scope of an attention service for students with disabilities that can encourage them to carry out university studies.

Keywords: mobility, public transport, public space, inclusion, exclusion.

INTRODUCCIÓN

Contexto actual de la discapacidad

La exclusión se puede definir como desatención, aislamiento y segregación de participación, así como vinculación y relación a diferentes actividades, eventos, productos, servicios o cualquier entorno donde participan personas con especificidades puntuales, generando un panorama desalentador para quienes no cuenten con tales características. Este término se vuelve crucial cuando se pone en riesgo la integridad de cualquier



persona. La exclusión tiene consecuencias sociales de gran importancia en el desarrollo de una sociedad sana, en la cual sus integrantes se sientan seguros, cómodos y puedan tener una plena apreciación de la vida con el respeto intacto a su integridad. Históricamente hemos sido testigos de lo que puede provocar la barbarie humana a partir de diferentes manifestaciones de la exclusión como racismo, clasismo, xenofobia o antisemitismo.

En la actualidad todas las personas merecen y esperan que se respeten sus derechos y obligaciones que les otorga su condición humana. Del mismo modo los derechos de las personas en situación de discapacidad se reconocen como inviolables en los países que conforman la Organización de las Naciones Unidas, sin embargo, todavía es discutible si es respetado de forma irrestricta el derecho universal a la educación, debido a estipulaciones de diseño tanto en la infraestructura como de los planes de estudio. Este derecho no ha sido garantizado eficientemente a diferentes colectivos, generalmente grupos de minorías que sistemáticamente fueron segregados e ignorados debido a sus condiciones físicas, mentales, sociales o de cualquier índole [2], [6].

A lo largo de este artículo se expondrá los patrones, puntos de convergencia y divergencia en dos universidades Ibérico-Americanas: la Universitat Autònoma de Barcelona y la Universidad Autónoma de Querétaro. Se analizarán aspectos del ámbito universitario relacionado al acceso de espacios públicos universitarios, inmobiliario, vinculación y movilidad para las personas en situación de discapacidad. La intención primordial del estudio es comprender las particularidades de los procesos administrativos y de vinculación de ambas universidades en diferentes contextos económicos, sociales y territoriales, los cuales pueden darnos un panorama a grosso modo del alcance de dichos procesos. Se espera en primera instancia, una estructura más sólida, relacionado a la estructura de los procesos establecidos y protocolos definidos por parte de la institución mejor posicionada en los

rankings universitarios a nivel global. Si bien es difícil aseverar una replicabilidad de procesos y estructuras en dichas instituciones, se podrá asentar un principio de mejora en el ámbito de estudio [1].

Históricamente la necesidad de movilidad en la sociedad ha sido crucial para el desarrollo tanto personal como profesional de las personas, sin embargo, se debe reconocer la realidad de nuestro entorno: no todas las personas pueden disfrutar de una movilidad integral y puede ser debido a diferentes circunstancias como limitaciones físicas, cognitivas o factores sociales que impiden el libre desplazamiento en un entorno específico. El libre acceso a los espacios públicos y sistemas de transporte son algunas áreas donde puede observarse de manera generalizada la exclusión sistemática hacia algunas personas a causa de, entre otras cosas, barreras arquitectónicas, urbanísticas y sociales que deben enfrentar de manera cotidiana en su desplazamiento, educación o empleo.

En el ámbito español el Instituto Nacional de Estadística (INE) publicó en 2008 los resultados de la Encuesta de Discapacidad, Autonomía personal y situaciones de Dependencia (EDAD), en los que se menciona que existían 3'847'900 personas residentes en España que reportaron algún tipo de discapacidad, lo que suponía 8.5% del total poblacional residente, con una distribución de 59.7% de mujeres en situación de discapacidad y 40.3% de hombres. Para 2008 se reportó que la edad media de las personas con discapacidad reportada era de 64.3 años (véase Tabla 1).

Tabla 1. Distribución de personas con discapacidad por edad en España. Fuente: INE, 2008.

Edad de las personas en situación de discapacidad en el Reino de España (2008)		
	No. de personas (miles)	% de personas con discapacidad
Total	3847.9	100.0
0 a 5 años	60.4	1.6
6 a 64 años	1560	40.5

Edad de las personas en situación de discapacidad en el Reino de España (2008)		
	No. de personas (miles)	% de personas con discapacidad
65 a 79 años	1201.7	31.2
80 y más años	1025.8	26.7

Para el caso mexicano la última Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica (ENADID) se realizó en 2014 y arrojó los siguientes resultados: existían alrededor de 7'100'000 personas que reportaron alguna limitación o discapacidad, lo que era equivalente al 6% de la población total, de los cuales 4'551'100 declararon problemas para caminar, moverse y subir o bajar escaleras. La discapacidad motriz era la más frecuente en México y representa el 64.1% de las personas en situación de discapacidad.

Tabla 2. Distribución de personas con discapacidad por edad Fuente: INEGI, 2016

ENADID 2014 % de personas con discapacidad	
TOTAL	100.0
0 a 30 años	18.2
30 a 59 años	34.8
Mayores a 60 años	47.3

Para el caso de la región autónoma de Cataluña, hasta 2008, contaba con 511 700 personas en situación de discapacidad mayor a 6 años, y era la región con mayor número de personas con discapacidad, no obstante, en relación con la población total la región catalana contaba con 7.61 personas con discapacidad por cada 100 habitantes, inferior a la media nacional (véase Tabla. 3).

Tabla 3. Personas de seis y más años con discapacidad por comunidad autónoma. Fuente: EDAD, 2008.

Personas de seis y más años con discapacidad		
	No. de personas (miles)	Tasa por cada 100 habitantes
Reino de España	3787.4	8.97
La Rioja	17.9	6.16

Personas de seis y más años con discapacidad		
	No. de personas (miles)	Tasa por cada 100 habitantes
Cataluña	511.7	7.61
Galicia	292.9	11.29

Por su parte, el Estado de Querétaro según la ENADID reportó hasta 2014 un total de 60 personas en situación de discapacidad por cada 1000 habitantes, concordante con la media nacional (véase Tabla 4).

Tabla 4. Personas con discapacidad por estado en México. Fuente: INEGI 2016

Personas de seis y más años con discapacidad		
	No. de personas (miles)*	Tasa por cada 1000 habitantes
Estados Unidos Mexicanos	125900	60
Chiapas	5217	41
Querétaro	2038	60
Nayarit	1181	82

*Corresponden al año 2015

La relación entre la discapacidad y la educación han tenido una gran evolución desde el siglo XX con la Declaración Universal de los Derechos Humanos publicada por la Organización de las Naciones Unidas en 1948, pues desde entonces diferentes organismos han publicado medidas, planes y acciones para atenuar la exclusión de este sector poblacional. A continuación se muestra una tabla en la cual se condensa de forma global las diferentes medidas publicadas por organismos internacionales y regionales para disminuir la vulnerabilidad de las personas en situación de discapacidad.



Tabla 5. Ámbito jurídico sobre Discapacidad en el Reino de España.
Fuente: Propia a partir de UAB 2018.

Evolución del marco jurídico para los derechos de personas con discapacidad en el Reino de España			
	Institución	Año	Publicación
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura	1998	Declaración mundial sobre la educación superior en el siglo XXI
AGNU	Asamblea General de las Naciones Unidas	2006	Convención Internacional sobre los derechos de las personas con discapacidad.
AGNU	Asamblea General de las Naciones Unidas	2008	Entra en vigor el CISDPD, con medidas de no discriminación y acción positiva.
Estatuto de Autonomía de Cataluña		2010	Incluyó a personas con discapacidad al artículo 40 sobre protección de las personas y familias.
Comunidad Autónoma de Cataluña		2015	Ley Catalana 17/2015 de igualdad efectiva de género incluyendo al sector con discapacidad.

En el ámbito educativo		
Institución	Año	Publicación
Consejo de la Unión Europea	2010	Resolución de un nuevo marco europeo de discapacidad
Jefatura del Estado de España, Boletín Oficial del Estado	2001	Ley Orgánica de Universidades regula los derechos de las PCD en universidades públicas.

En el ámbito educativo		
Institución	Año	Publicación
Ley de Universidades de Cataluña	2003	Establece el derecho del alumno a la igualdad de oportunidad sin discriminación de cualquier tipo
Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad	2010	Real Decreto 1791 detalla las obligaciones, condiciones y acciones que se deben tomar para garantizar la inclusión de PCD
Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad	2013	Real Decreto Legislativo 1, Ley general de derechos de las PCD y de su inclusión social.
Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad	2014	Real decreto 412 sobre normativa de proceso de admisión universitaria de grado, con al menos 5% reservado a PCD

Tabla 6. Ámbito jurídico sobre discapacidad en la República Mexicana.
Fuente: Elaboración propia a partir de Gallegos y French (2018) y Sandoval et al. (2017).

Evolución del marco jurídico para los derechos de personas con discapacidad en la República Mexicana			
Institución	Año	Publicación	
UNESCO	1998	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura	Declaración mundial sobre la educación superior en el siglo XXI
AGNU	2006	Asamblea General de las Naciones Unidas	Convención Internacional sobre los derechos de las personas con discapacidad.

Evolución del marco jurídico para los derechos de personas con discapacidad en la República Mexicana			
Institución	Año	Publicación	
AGNU	2008	Asamblea General de las Naciones Unidas	Entra en vigor el CISDPD, con medidas de no discriminación y acción positiva.
Ley General para la Inclusión de las Personas con Discapacidad	2011	Creación del Consejo Nacional para el Desarrollo y la Inclusión de las Personas con Discapacidad (CONADIS).	
Ley Orgánica de la Administración pública	2013	CONADIS se sectorizó a la Secretaría de Desarrollo Social	
Junta de Gobierno del CONADIS y presidencia nacional	2016	Creación del Sistema Nacional para el Desarrollo y la Inclusión de las Personas con Discapacidad	

En el ámbito educativo		
Institución	Año	Publicación
Poder Legislativo "Reforma educativa"	2014	Establece el derecho del alumno a la igualdad de oportunidad sin discriminación de cualquier tipo
Secretaría de Educación Pública SEP	2017	Estrategia para la Equidad e Inclusión de Alumnos con Discapacidad, impulsa la integración social en las escuelas y eleva la calidad de la oferta educativa
SEP y Comisión Nacional de Libros de Texto Gratuito	2017	Distribución de Libros en sistema de lectura Braille

El acceso a la educación, como es de esperarse, es diferente en ambos países a continuación se muestran las cifras de accesibilidad a la educación de dichas naciones. Por un lado, España, según los datos estadísticos del Instituto Nacional de Estadística en un estudio del 2016, cuenta con 3.56% del total de personas en situación de discapacidad con analfabetismo, y sólo 9.29% tiene acceso a estudios universitarios. El grueso de la población que es el 29.40% cuenta con enseñanza secundaria de primera etapa.

En el ámbito educativo		
Institución	Año	Publicación
Diario Oficial de la Federación	2014	Programa Nacional para el Desarrollo y la Inclusión de las Personas con Discapacidad 2014-2018 (PNDIPD)
Programa Nacional para el Desarrollo y la Inclusión de las Personas con Discapacidad	2014	Objetivo 4: Fortalecimiento de la participación de las PCD en la educación inclusiva, cultura, deporte y turismo

Tabla 7. Comparativa entre jóvenes con y sin discapacidad según nivel de estudios de España 2012.
Fuente. INE, 2014. Fuente. INE, 2014

	Jóvenes con discapacidad	Jóvenes sin discapacidad	Diferencia porcentual
No sabe leer o escribir	3.56%	0.30%	3.26%
Educación Primaria Incompleta	4.25%	0.32%	3.93%
Educación Primaria completa	15.36%	8.97%	6.39%



	Jóvenes con discapacidad	Jóvenes sin discapacidad	Diferencia porcentual
Enseñanza secundaria de 1° etapa (ESO, EGB, Bachillerato Elemental)	29.40%	34.87%	-5.46%
Estudios de Bachillerato (BUP, Bachillerato Superior)	19.94%	18.25%	1.70%
Enseñanzas profesionales de grado medio o equivalente	12.85%	9.86%	2.99%
Enseñanzas profesionales de grado superior o equivalente	4.43%	9.27%	-4.85%
Estudios universitarios o equivalentes	9.29%	17.97%	-8.68%

En México la situación es diferente, pues recientemente un estudio (ENADIS, 2017) publicó resultados sobre la brecha educacional para las personas en situación de discapacidad. Se contaba hasta 2017 con 20.2% del total sin escolaridad alguna y 23% de las personas en situación de discapacidad, sin embargo, México muestra un mayor acceso en educación superior para las personas con discapacidad con 11.2%, a diferencia de 1.91% de España [8].

Tabla 8. Distribución porcentual de la población con discapacidad de 15 a 59 años según grado de escolaridad 2017.
Fuente: ENADIS, 2017

	Promedio nacional	Promedio de población	
Sin escolaridad	2.9 %	20.2 %	17.3 %
Primaria incompleta	6.7 %	15.1 %	8.4 %
Primaria completa	15.7 %	19.3 %	3.6 %

	Promedio nacional	Promedio de población	
Secundaria	27.5 %	23.0 %	- 4.5 %
Media superior	25.0 %	11.2 %	-13.8 %
Superior	21.9%	10.8 %	-11.1%
No especificado	0.3 %	0.4 %	0.1 %

En relación con el ámbito universitario, para España, se observa una notable mejora en el acceso a la educación superior (véase Tabla 7), sin embargo, en los datos obtenidos de la Fundación Universia en su estudio más reciente sobre el grado de inclusión del sistema universitario español, respecto de la realidad de la discapacidad (Fundación Universia, 2018), se muestra que existe una creciente tendencia sobre el acceso a la educación. La mayoría de las personas en situación de discapacidad han optado por una educación en línea y a distancia, los números son claros, el acceso a la educación existe tanto presencial como electrónicamente, no obstante, no hay un estudio que pueda mostrar las razones del por qué se ha tomado esta elección.

Tabla 9. Evolución de la proporción de estudiantes con discapacidad.
Fuente: Fundación Universia, 2018.

Proporción de estudiantes con discapacidad				
	I Estudio (2011-2012)	II Estudio (2013-2014)	III Estudio (2015-2016)	IV Estudio (2017-2018)
Total de estudiantes*	1.1%	1.3%	1.7%	1.5%
Total en universidades públicas	1.1%	1.3%	1.8%	1.5%
Total en universidades privadas	1.1%	0.9%	1.1%	1.2%

Proporción de estudiantes con discapacidad				
	I Estudio (2011- 2012)	II Estudio (2013- 2014)	III Estudio (2015- 2016)	IV Estudio (2017- 2018)
Total en uni- versidades modalidad presencial	0.8%	0.9%	1.2%	1.0%
Total en uni- versidades de modalidad a distancia	2.1%	3.1%	3.3%	4.1%

De acuerdo con datos estadísticos de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM, 2015), el número de alumnos admitidos a nivel licenciatura del Sistema Universidad Abierta y Educación a Distancia en los últimos 15 años ha crecido en más de 500% como se muestra a continuación.

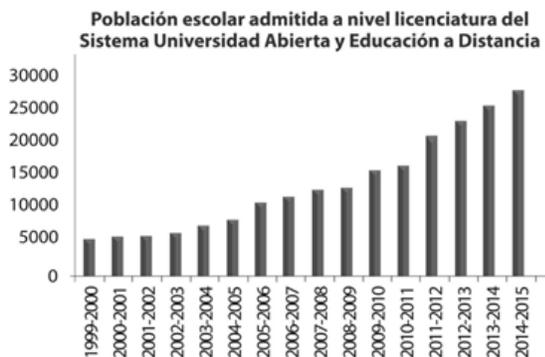


Figura 1. Población escolar admitida a nivel licenciatura del Sistema Universidad Abierta y Educación a Distancia.
Fuente: UNAM, 2015

Se prevé un panorama alentador para el libre desarrollo de actividades para las personas en situación de discapacidad, sin embargo, este colectivo ha optado por tomar una educación a distancia, y pueden ser varios factores los que determinen esta elección como costos, dificultades, barreras urbanísticas o arquitectónicas externas al lugar de estudios, barreras sociales, entre muchas otras. Ciertamente este tipo de modalidad de estudios facilita el acceso a estudios superio-

res, no obstante, mantiene una exclusión y aislamiento de los espacios públicos, por lo que se debe hacer un esfuerzo por entender las condiciones propicias que incentiven a las personas en situación de discapacidad al uso del espacio público, transporte y servicios universitarios. El proporcionar accesibilidad en el entorno está íntimamente relacionado a la consecución de una mayor autonomía y permitir una vida independiente y plena disminuyendo la institucionalización y la dependencia familiar [2].

METODOLOGÍA

El enfoque cualitativo puede ser particularmente apropiado para la investigación de fenómenos, actividades o características sociales. A continuación, se plantean algunos métodos que servirán para comprender los diferentes procesos y fenómenos en relación con la condición actual de la UAB y la UAQ sobre la movilidad, acceso a espacios públicos universitarios y al transporte (Munarriz, 1992).

Personas a analizar y áreas de estudio

Se decidió estudiar el sector poblacional conformado por los estudiantes, profesores e investigadores, personal docente y usuarios en situación de discapacidad motriz en la Universidad Autónoma de Barcelona y la Universidad Autónoma de Querétaro (véase Tabla 10).

Según datos estadísticos del Plan de acción sobre discapacidad e inclusión de la UAB [3], el porcentaje de personas con al menos alguna discapacidad física asciende al 59.3%, siendo el principal tipo de discapacidad en el colectivo. En cuanto a la Universidad Autónoma de Querétaro, no cuenta con datos estadísticos disponibles en ninguna de sus plataformas en línea sobre personal administrativo, docentes y alumnos en situación de cualquier tipo de discapacidad.



Figura 2. Área de estudio, instalaciones de la UAB.
Fuente: UAB

El Área de estudio se define por el campus universitario de la Universidad Autónoma de Barcelona, ubicado en 08193 Bellaterra, Cerdanyola de Valles, Barcelona, España, y las instalaciones del campus central de la Universidad Autónoma de Querétaro, ubicado en 76010 Centro universitario, colonia Las Campanas, Santiago de Querétaro, México.



Figura 3. Área de estudio, instalaciones de Ciudad Universitaria de la Universidad Autónoma de Querétaro. Fuente: UAQ.

Investigación documental

La investigación documental, de artículos y documentos relacionados, se realizó en base de datos como Scielo, Google académico y la normativa vigente. Se consultó en el plan de acción sobre discapacidad del observatorio para la igualdad de la Universidad Autónoma de Barcelona y los documentos oficiales de la Universidad Autónoma de Querétaro, así como se indagó en tesis y publicaciones universitarias del departamento de Geografía en la Universidad Autónoma de Barcelona.

Entrevistas exploratorias

Se llevaron a cabo tres entrevistas exploratorias con autoridades o administrativos universitarios, quienes tienen influencia directa en la dirección del plan de acción para la discapacidad e inclusión de la universidad, así como con un estudiante de doctorado quien realizó una investigación paralela con ciudadanos sin autonomía en Lima, y por último con una chica extranjera que realizó estudios de verano en el campus y su experiencia en primera instancia sobre accesibilidad, acceso a la información y facilidades de vinculación y movilidad. El objetivo primordial de estas entrevistas es que el autor pueda conocer las percepciones y opiniones acerca de temas relacionados para nutrir de información a la investigación.

Tabla 10. Personas con Discapacidad en la UAB.

	Estudiantes con discapacidad		Personal académico		Personal administrativo y servicios	
	Total	Porcentual	Total	Porcentual	Total	Porcentual
Hombres	152	47.65%	18	54.54%	25	40.99%
Mujeres	167	52.35%	15	45.46%	36	59.01%
Total	319	33	61			

Se realizaron entrevistas abiertas en las cuales se plantearon temas a cerca del progreso y las acciones implementadas en el plan de acción, el planteamiento metodológico que han seguido diferentes investigadores relacionados con el tema y las primeras impresiones sobre la señalización, movilidad y acceso a espacios universitarios.

Tabla 11. Selección de personas para entrevistas exploratorias.
Fuente: Propia.

Tipo	Género	Institución	Campo de estudio o relación a la investigación
Tipo 1 "A1"	Hombre	UAB	Estudiante de doctorado que realiza investigación relacionada.
Tipo 2 "A1"	Mujer	UAB	Estudiante de Summer School en situación de discapacidad motriz
Tipo 3 "A1"	Mujer	UAB	Autoridad responsable del PIUNE (Servicio para la inclusión de los estudiantes con necesidades educativas específicas)
Tipo 4 "A2"	Hombre	UAQ	Encargado de protección civil universitaria, con proyectos de análisis de riesgo en los diferentes campus

Las entrevistas exploratorias fueron abiertas y tienen fundamento en el tema a estudiar, pero

van desarrollándose de tal forma que el entrevistador pueda obtener la mayor cantidad de información relevante al tema estudiado, lo que otorga mayor facilidad de expresión al entrevistado y es flexible en cuanto a estructura pues va modificándose al desarrollarse (Hernández et al., 2010)

Entrevistas semiestructuradas

La entrevista es un método para obtener información cualitativa, que consiste en el intercambio de información entre un entrevistado y el entrevistador, a partir de esta herramienta se puede lograr una retroalimentación conjunta respecto a un tema de interés (Hernández et. al, 2010; Munarriz, 1992). Con la ayuda de este método se plantea conocer la realidad actual en el tema de la movilidad, acceso a espacios públicos y transporte, narrada de forma explícita por los actores principales, ya sean PCD o administrativos encargados de órganos facultados para emitir acciones en pro de la igualdad de oportunidades en el ámbito universitario.

En las entrevistas planteadas se preguntaron cuestiones relacionadas a la percepción del uso las nuevas tecnologías de la información y comunicación como aplicaciones móviles, softwares especializados, dispositivos electrónicos, redes sociales, entre otros, y su necesidad para obtener grado en la modalidad presencial, las barreras físicas y urbanísticas, transporte y la accesibilidad al espacio público universitario. De igual forma se preguntó a las autoridades y personal administrativo encargado de implementar el segundo plan de discapacidad e inclusión de la Universidad Autónoma de Barcelona acerca de la integración actual y progresiva de los objetivos y medidas a seguir según el segundo plan de acción sobre discapacidad e inclusión de la Universidad Autónoma de



Barcelona [3], al que se hace referencia en el segundo eje "Accesibilidad y movilidad". Este cuenta con nueve puntos que tratan sobre garantizar la aplicación de las medidas necesarias para facilitar la movilidad, respetar las pautas marcadas por el plan de accesibilidad para las nuevas edificaciones y habilitar los edificios, garantizar progresivamente que todos los servicios de la UAB sigan accesibles para las personas con discapacidad, mantener el servicio de transporte adaptado a este colectivo, garantizar su participación en el diagnóstico y mejorar los aspectos relacionados con la movilidad y accesibilidad, diseñar mecanismos para garantizar y controlar el aparcamiento reservado, ampliar la información sobre evacuación de emergencia, mejorar la accesibilidad de la web universitaria y el acceso a la información institucional.

Selección de la muestra

La selección de la muestra se realizó con base en "La muestra de casos tipo", donde el principal objetivo es la concentración en la calidad y profundidad de la información a obtener, no así la cantidad y estandarización de la muestra (Hernández Sampieri et.

al, 2010). Por el fenómeno a estudiar se optó por esta propuesta pues el estudio plantea conocer las percepciones, expectativas y características específicas sobre el ámbito académico de las personas en situación de discapacidad motriz. En la Tabla 12, se describen los diferentes modelos ideales que se tomaron en cuenta para la investigación en función del número de estudiantes según el grado académico y el área de estudio.

La selección de la muestra se propuso de la forma anterior (véase Tabla 10) y se cuidó pues la intención principal fue conocer en diferentes áreas tanto de estudio como administrativas la experiencia, opinión y expectativas sobre el servicio de vinculación universitaria para personas en situación de discapacidad motriz.

Al realizar la entrevista se cuestionó sobre temas de movilidad, acceso a espacios públicos y transporte procesos de vinculación y servicios para personas en situación de discapacidad. Se realizó una carta de consentimiento informado donde se menciona sobre la confidencialidad sobre el uso de su información personal sin fines de lucro, de la misma forma el entrevistado podía finalizar la entrevista de forma anticipada si es que así lo deseaba.

Tabla 12. Selección de la muestra a entrevistar.
Fuente: Elaboración propia.

	Institución	Género	Cargo	Área de trabajo
Perfil deseado		Descripción del perfil		
Tipo 3 "G1"	UAB	Hombre	Vicedecano de Estudiantes y Promoción	Facultad de Ciencias
Tipo 4 "G1"	UAB	Hombre	Vicedecano de Comunidad universitaria.	Facultad de Filosofía y Letras
Tipo 5 "G1"	UAB	Hombre	Encargado de la Unidad de Planificación y gestión de la movilidad	Área de servicios logísticos y de administración.
Tipo 6 "G2"	UAQ	Mujer	Encargada de ATEDI UAQ	Secretaría de Rectoría
Tipo 7 "G2"	UAQ	Hombre	Coordinador de Enlace UAQ	Dirección de planeación

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Actualidad del proceso de vinculación universitaria

Vinculación inicial en la Universidad Autónoma de Barcelona

Por parte de la Universidad Autónoma de Barcelona se cuenta con una estructura sólida sobre el alumnado en situación de Discapacidad. En primera instancia se tiene la Fundació Autònoma Solidària, encargada de fomentar una participación ciudadana activa, garantizar la continuidad de los estudios universitarios a jóvenes en situación de refugiados y formar grupos de voluntariados para misiones de carácter ambiental, solidaria y filantrópica. De manera específica a las necesidades especiales de alumnos en situación de discapacidad se tiene el servicio para la inclusión a la UAB y el Soporte a estudiantes con Necesidades Educativas Específicas (PIUNE), el cual tiene como objetivo trabajar para garantizar que independientemente de la condición física, psicológica o de cualquier índole se pueda acceder a los estudios superiores con igualdad de oportunidades, disfrutar de una vida académica y social así como un sentido de autonomía como el resto de sus compañeros. Judith Oliver, coordinadora del PIUNE, expresa:

El PIUNE trabaja para garantizar al alumnado una igualdad de oportunidades sin importar la condición física o social. Este programa tiene colaboración directa con ONCE, (una de las asociaciones más importantes de España en pro de las personas invidentes y en situación de discapacidad), cuenta con asesoría especializada, y gestiona los diferentes requerimientos que puedan necesitar nuestros estudiantes.

Para registrarse en el PIUNE se debe seguir un proceso establecido por la coordinación del PIUNE, a los estudiantes de nuevo ingre-

so se les invita a una plática informativa en la que se les explica paso a paso el proceso de registro y vinculación, los servicios que ofrecen y cómo solicitarlos.



Figura 4. Cartel de sesión informativa del PIUNE.
Fuente: elaboración propia.

Dicha sesión informativa se realiza dentro de las instalaciones del campus Bellaterra de la UAB, y se discuten las líneas de acción en diferentes ámbitos del PIUNE. Se pueden facilitar algunos aspectos académicos y tecnológicos, de movilidad, becas, estudiantes de soporte e inserción laboral con la ayuda del colectivo UAB-Impuls. El proceso de registro para el PIUNE es como se muestra en la siguiente ilustración.



Figura 5. Proceso de vinculación y registro PIUNE.
Fuente: Traducción sobre Pagina Web.

Una vez matriculado a la UAB, el alumno que solicite registro para el PIUNE deberá acudir a sus instalaciones para realizar una entrevista que será agendada electrónicamente en el

periodo correspondiente. Una vez culminada la entrevista deberá entregar un informe de necesidades y adaptaciones que necesitará a lo largo del semestre con la carga de materias en curso. El PIUNE asignará a un tutor que será un vínculo entre el PIUNE y el alumno para solicitar cualquier tipo de adaptación y necesidad que pueda surgir a lo largo del periodo escolar. El seguimiento será semestral y anualmente deberá hacer una entrevista con el PIUNE para mantener el registro en el mismo, si lo desea el estudiante, podrá asesorarse directamente con el PIUNE para las ofertas laborales, prácticas profesionales o cualquier primer contacto con empresas y entidades con oportunidades de empleo.

Vinculación inicial en la Universidad Autónoma de Querétaro

En la información obtenida por medios electrónicos sobre un primer contacto de las personas en situación de discapacidad y la Universidad Autónoma de Querétaro es la siguiente: existe un servicio de Atención a Estudiantes con Discapacidad (ATEDI) que plantea la creación de un modelo educativo inclusivo. Este servicio está relacionado al portal de la Secretaría de la Rectoría en el apartado de becas, sin embargo, no tiene información sobre los servicios que ofrece, algún correo de contacto, lugar de contacto o persona responsable de este servicio, lo único existente en la página se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Interfaz de página web ATEDI UAQ.
Fuente: Página electrónica UAQ

El autor se dirigió directamente a las instalaciones de la Universidad Autónoma de Querétaro en la Secretaría de Rectoría, donde se pudo realizar una entrevista con la persona encargada del ATEDI, Verónica Núñez, quien comentó lo siguiente:

Existe una parte de atención y otra de procesos. La primera es para todas las personas que vienen en la universidad, se está trabajado en un protocolo de atención para poder otorgar el servicio en función de las necesidades de cada persona, lo primero que estamos haciendo es explorar cuantas personas (en situación de discapacidad) tenemos, trabajamos en identificar a las personas, cuáles son sus necesidades y cómo podemos ayudarlos, por ejemplo, cuando llega un estudiante con interés de realizar estudios, se canaliza a esta área y se vincula con las autoridades de la facultad. Se dio el caso de un par de estudiantes sin audición y se trabajó durante un año en la preparación del examen de admisión y antes de realizarlo se comunicó con los coordinadores de la carrera para avisarles que iban a necesitar un intérprete para el curso propedéutico, es importante que la persona como interprete sepa cuál es su función, una vez acreditado el propedéutico se realiza el examen EXCOBA se trabaja con servicios académicos para ver las adecuaciones necesarias antes de presentar el examen, si logran acreditar el examen se trabaja con tres entidades, el director de la facultad, el coordinador de la carrera, el cual habla directamente con los profesores de la carrera, y con sus compañeros de grupo. El proceso es el mismo para cualquier estudiante en situación de discapacidad.

Aún se está trabajando con algún instrumento y diagnóstico para alumnos con discapa-

cidad, un protocolo que pueda ayudar en el registro y seguimiento de las personas en situación de discapacidad.

Información sobre el alumnado en situación de discapacidad

Información sobre el alumnado en situación de discapacidad en la UAB

Se tomó en cuenta la información estadística publicada en el plan de acción sobre discapacidad e inclusión de la Universidad Autónoma de Barcelona, donde se menciona la existencia de alrededor de 319 estudiantes con algún tipo de discapacidad, y específicamente a las personas que mencionan al menos una discapacidad física para realizar la segunda tabla de este apartado. En la Tabla 13 y 14, se muestra la relación estadística según el género, nivel de estudios, área de estudios y tipo de discapacidad.

Información sobre el alumnado en situación de discapacidad en la UAQ

Actualmente no cuenta con datos publicados ni propios en los cuales se tenga registrado el número de alumnos, administrativos y profesores en situación de discapacidad, sin embargo, en palabras de Verónica Núñez, coordinadora del ATEDI, se está trabajando en un protocolo de atención y un diagnóstico de la situación actual de este colectivo. Ella misma menciona:

Se está construyendo un instrumento que permita el registro de las personas en situación de discapacidad al ATEDI, para que desde el primer día se puedan detectar sus necesidades, debido a que han existido casos de personas débiles visuales que no han comunicado su condición y el profesor continúa exponiendo su clase pensando que todos tienen la misma capacidad de visión, afectando el rendimiento del alumno, debido a esto se

está trabajando en el protocolo que nos ayude con el proceso de registro y seguimiento de las necesidades de los chicos. La situación en discapacidad no es motivo para disminuir la exigencia académica, todos los alumnos requieren las mismas acreditaciones para ser admitidos y egresados en esta institución, solo se realizan adecuaciones tanto en material de apoyo, e impartición de clases para que su estancia en la universidad sea cómoda y en igualdad de condiciones.

Acceso a espacios universitarios y movilidad

Acceso a espacios universitarios y movilidad en la UAB

La Universidad Autónoma de Barcelona cuenta con accesibilidad a todos los centros docentes, solamente algunos accesos a la Facultad de Economía no están adaptados, sin embargo, están conectados con edificios que tienen elevadores, rampas y señalización para el desplazamiento de personas con movilidad reducida. También existen algunas zonas de la Facultad de Ciencias de la Educación, Comunicación y Biociencias que no cuentan con acceso para este colectivo. En total se cuenta con 83.3% de accesos principales con adaptaciones, y 50% de accesos secundarios adaptados (UAB, 2018). Manuel Santirso Rodríguez, Vicedecano de Comunidad Universitaria, menciona:

He recibido comentarios acerca de la falta de accesibilidad a la biblioteca de Humanidades, debido a que las puertas son pesadas y no están automatizadas, para una persona que se desplaza en silla de ruedas le resulta muy difícil abrir las puertas y desplazarse simultáneamente, se está realizando un proyecto con la dirección de arquitectura para arreglar este punto, sin embargo, actualmente no existe presupuesto para esta partida.



Tabla 13. Estudiantes con discapacidad en la UAB.
Fuente: UAB, 2018.

Estudiantes con discapacidad		
	Total	Porcentual
Hombres	152	47.65%
Mujeres	167	52.35%
Total	319	100%
Edad media	31 años	
Área de conocimiento	42.01 % Ciencias sociales y jurídicas	

Tabla 14. Estudiantes con discapacidad y su distribución según nivel académico y área de conocimiento.
Fuente: Elaboración propia a partir de UAB, 2018.

Estudiantes con discapacidad						
	Mujeres		Hombres		Total	
Área de conocimiento	Neto	%	Neto	%	Global	Disc. Física *
Artes y humanidades	36	48	39	52	75	44
Biociencias	2	40	3	60	5	3
Ciencias	4	26.67	11	73.33	15	9
Ciencias de la salud	54	71.05	22	28.95	76	45
C. sociales y jurídicas	70	52.24	64	47.76	134	80
Ingeniería	1	7.14	13	92.86	14	8
Total	167	52.35	152	47.65	319	189

Distribución por sexo y nivel académico						
	Mujeres		Hombres		Total	
Nivel Académico	Neto	%	Neto	%	Global	Disc. Física *
Doctorado	12	44.44	15	55.56	27	16
Grado	144	54.75	119	42.25	263	156
Licenciatura	1	33.33	2	66.67	3	2
Maestría	10	38.46	16	61.54	26	15
Total	167	52.35	152	47.65	319	189

*Estas cantidades son aproximadas a partir del número de personas con al menos una discapacidad física en la UAB



Figura 7. Instalaciones adaptadas, rampas, baños, elevadores y rampas mecánicas.

Fuente: Elaboración propia.

La Universidad Autónoma de Barcelona tiene una amplia cobertura en el tema de accesibilidad a espacios universitarios, del mismo modo ofrece un transporte interno en el que traslada a estudiantes de este colectivo dentro de la universidad. El área de logística también cuenta con datos sobre el modo de transporte del hogar a la universidad de sus estudiantes. En cuanto a ello, alrededor de 60% se trasladan en transporte público, 37% en auto privado y alrededor de 3% en bicicleta. El transporte público para llegar a la universidad en su mayor parte también

cuenta con adaptaciones para este colectivo. Rafael Requena, Encargado de la Unidad de Planificación y Gestión de la Movilidad, explica:

Existe un sistema de transporte adaptado del PIUNE en la UAB el cual consiste en furgonetas adaptadas para personas en situación de discapacidad. Este transporte sólo funciona dentro del campus y los horarios son particulares según las necesidades del estudiante, del mismo modo el modo de transporte a la universidad en muchas ocasiones tiene adaptaciones para personas con movilidad reducida, en su totalidad el sistema de ferrocarriles tiene adaptaciones para este colectivo, los autobuses interurbanos deben contar con un mínimo de unidades adaptadas. En la web de movilidad se tiene una herramienta de cálculo de rutas en la cual existe una opción de movilidad para personas con discapacidad. El plan de movilidad es un proyecto político, ya que lo aprueba el ayuntamiento y el rector, su desarrollo se va actualizando cada año en función del presupuesto, se está trabajando en la adaptación de puertas automáticas, mantenimiento de elevadores y señalización dentro del campus.

Según datos del plan de plan de acción sobre discapacidad e inclusión de la UAB (Universidad Autónoma de Barcelona, 2018), la percepción menos favorable en temas de accesibilidad es la señalización sobre servicios, elevadores y rutas para personas en situación de al menos una discapacidad. En opinión de sus estudiantes, en promedio el 30% no está de acuerdo con la señalización a diferentes zonas y servicios. Los alumnos en situación de discapacidad de la Universidad Autónoma de Barcelona no han tenido la dificultad de realizar algún trabajo de campo, materia, actividad o evento por su condición física, emocional,



mental o cognitiva. Lluís Casas, Vicedecano de estudiantes de ciencias, menciona:

Recuerdo el caso de un aspirante que asistió al día de las familias para contemplar la posibilidad de incorporación a la universidad. La facultad de Ciencias no tenía forma de acceso para silla de ruedas y los ascensores en ese momento tenían llave, lamentablemente la logística fue deficiente y no pudo concretar el recorrido, sin embargo, fue hace tiempo y actualmente no se han tenido casos de imposibilidad sobre algún trabajo de campo, prácticas o cursos para este colectivo.

La Universidad Autónoma de Barcelona tiene una beca para personas en situación de discapacidad llamada Beca Impuls. Esta beca está dirigida a estudiantes con discapacidad y en situación de dependencia en grado 3 y 2, según lo establecido en la ley 39/2006 de Promoción de la Autonomía Personal y Atención a las Personas en Situación de Dependencia, y el requisito es mostrar un certificado de discapacidad y contar con al menos 60% de los créditos aprobados para el plan de estudios de su programa. Esta beca cubre los conceptos de asistencia personal para la contratación de un profesional que realizará tareas de ayuda al estudiante y a las actividades básicas de la vida diaria en el ámbito académico, así como para cubrir necesidades de movilidad y desplazamiento de los estudiantes. El monto otorgado a cada estudiante dependerá directamente de las necesidades del estudiante. La Beca Impuls otorgará como máximo un total de 3000 euros por estudiante, cerca de \$66,258.00 pesos para el curso 2018-2019. Las autoridades entrevistadas no reportaron alguna barrera social, discriminación o exclusión por parte de sus compañeros, al contrario, existe un programa donde puedes ser becario y ayudar a los estudiantes con discapacidad

en las labores puntuales que puedan dificultarse incentivando el tejido social universitario. Respecto a los costos asociados al estudio, los estudiantes en situación de discapacidad no pagan inscripción y la matrícula de las materias es totalmente gratuita. Las autoridades no reportaron casos de deserción escolar, sin embargo, no se tienen datos estadísticos al respecto.

Acceso a espacios universitarios y movilidad en la UAQ

La Universidad Autónoma de Querétaro tiene dos planes de inclusión "La UAQ incluye a todos" y el "Programa de inclusión y equidad educativa" en que se plantean objetivo y metas para la inclusión educativa en la institución. Al respecto, las autoridades de la Universidad Autónoma de Querétaro opinaron acerca de la infraestructura de la institución, movilidad, proyectos actuales y futuros en este rubro. A continuación, se muestran las perspectivas de Alfredo Vanegas, coordinador de enlace UAQ:

La dirección de planeación es responsable de un programa de inclusión y equidad educativa que gestiona financiamiento para obtener recursos que permiten borrar esas barreras de movilidad, crear accesibilidad en la universidad, edificios, baños, niveles superiores. Aquí en el centro universitario tiene la mayor inversión de presupuesto en cuanto a accesibilidad se refiere, yo creo debe estar en un 80% la accesibilidad a las instalaciones del campus. Actualmente existen dos proyectos para la inclusión de los estudiantes el programa de inclusión y equidad educativa y la UAQ incluye a todos que lo coordina la Secretaría de Atención a la Comunidad Universitaria, en el programa de inclusión que nosotros coordinamos, se dirige principalmente a personas con discapacidad y población indígena, y

el programa de la UAQ incluye a todos a cargo de la Secretaría de Atención a la Comunidad Universitaria aborda la diversidad sexual, equidad de género y otra tipo de grupos. Para este año la UAQ cuenta con ocho elevadores en el campus central, también cuenta con un elevador en Amealco y se instalará uno en San Juan del Río.

Verónica Núñez, encargada del ATEDI, expresa:

Yo alguna vez tuve un esguince de rodilla y tuve que usar muletas, en función de mi experiencia dentro de la universidad, yo pensaría que tenemos un 7 sobre 10, tengo que aclarar, tenemos más rampas y elevadores, antes no teníamos algo así, antes no teníamos nada de eso y las rampas que teníamos contaban pendientes muy altas que serían poco cómodas para los usuarios con discapacidad. La universidad es accesible actualmente en un 70% tomando en cuenta esta analogía, poniéndolo muy alto porque por ejemplo hay algunos edificios muy antiguos los cuales fueron construidos con muchos escalones, no es tanto la falta de voluntad, pensando en la Facultad de Filosofía se han hecho las adecuaciones recientemente que facilitan su movilidad. Se instaló un elevador en rectoría debido a su importancia en los trámites universitarios, también tenemos guía para personas invidentes en la cual está continuamente trabajando, nos falta más letreros en braille, nos falta interprete y orientadores con lenguaje de señas. Vamos trabajando en este aspecto pero aún nos falta, también contamos con algunos baños adaptados tanto para personas con discapacidad e inclusión de género. Actualmente se está trabajando en el Protocolo de atención, las evaluaciones de rampas, elevadores y accesibilidad en todos los

sentidos, cursos y talleres de accesibilidad y sensibilización, lenguaje de señas y braille.



Figura 8. Adaptación de instalaciones en buen estado UAQ.
Fuente: Elaboración propia.



La realidad parece ser distinta pues actualmente en la Universidad Autónoma de Querétaro tiene una accesibilidad a niveles superiores muy pobre en diferentes edificios, dificultando las consultas, tutorías y desplazamientos de las personas en situación de discapacidad. Si bien es cierto es que existe un trabajo constante en la construcción de rampas, mantenimiento de ascensores y señalización, no es suficiente para alcanzar a cubrir el 70% de sus instalaciones.



Figura 9. Instalaciones de la UAQ con calidad deficiente. Fuente: Elaboración propia

Existen también lugares de estacionamiento reservados para personas en situación de discapacidad, la información del número de espacios no está disponible tampoco, debido a que recientemente se realizó un ajuste de espacios de estacionamiento en la Facultad de Ingeniería. Cabe destacar que en ocasiones estos espacios no son respetados, y no existe penalización alguna para los infractores. Para este tipo de situaciones también se han impartido diferentes cursos y talleres de sensibilización dirigidos a la comunidad universitaria, incluidos profesores, alumnos, administrativos y trabajadores.

Alfredo Vanegas, coordinador de Enlace UAQ, explica:

El mayor reto de accesibilidad es el acceso a niveles superiores, circuito de rampas y señalética, más o menos el 20% restante de las instalaciones inaccesibles, realmente creo que con lo que tenemos actualmente, se puede acceder a todos los espacios, biblioteca, servicios escolares, rectoría, sin embargo, algunos elevadores necesitan llave para funcionar, lo que significa una desventaja en el funcionamiento y logística, dos elevadores, en psicología y bellas artes, tienen fallas en el funcionamiento; todas las rampas están en normativa. Se cuenta con alrededor de 30 espacios de estacionamiento para personas en situación de discapacidad, y estos algunas veces no se han respetado, se han impartido cursos de sensibilización universitaria manifestando la importancia de respetar los espacios reservados. El próximo año se planea un incremento de entre 5% y 8% de accesibilidad, y se trabajará en otros campus para recortar recorridos en sillas de ruedas.

La Universidad Autónoma de Querétaro tiene una beca universitaria orientada a personas con discapacidad llamada "Beca para estudiantes con discapacidad", a la que pueden

aplicar todas los estudiantes en situación de discapacidad de Bachillerato y Licenciatura del segundo semestre en adelante. Para recibir la beca se requiere mantener carga de materias completas correspondiente al semestre que cursa dentro del plan de estudios establecidos, no contar con otra beca durante el periodo vigente, mantener un promedio mínimo general de 7.5 sobre 10, tener ingreso menor o igual a 4 salarios mínimos per cápita, nacionalidad mexicana y no tener relación laboral con la UAQ. La recepción de documentos es permanente, el monto de la beca son \$1'500.00 pesos mexicanos mensuales y la convocatoria es anual.

La encargada del programa ATEDI reportó un caso sobre comentarios ofensivos y excluyentes de parte de un profesor y algunas dificultades de comunicación por parte de la comunidad estudiantil con este colectivo, debido al desconocimiento sobre cómo tratar o comunicarse con PCD. También se conocen casos sobre deserción escolar e imposibilidad de realizar algunas prácticas o actividades de campo relacionadas al ámbito académicas. Este colectivo paga los mismos montos que cualquier alumno relacionado a inscripción y materias académicas. Verónica Núñez, encargada del ATEDI, explica:

Solo sé de un profesor el cual tenía a una alumna sorda y le dijo que no tenía nada que hacer aquí en la universidad. Eso fue muy fuerte, ella está aquí estudiando con nosotros en la UAQ, debido a que cumplió los mismos requisitos de admisión que sus compañeros.

Cuadro comparativo de síntesis

A continuación, se mostrará un cuadro comparativo a modo de resumen sobre algunos aspectos relevantes en relación con los diferentes procesos de vinculación universitaria para las personas en situación de discapacidad de la Universidad Autónoma de Barcelona y la Universidad Autónoma de Querétaro.

Tabla 15. Cuadro comparativo a modo de resumen.
Fuente: Elaboración propia.

	Universitat Autònoma de Barcelona	Universidad Autónoma de Querétaro
Órgano de servicios para PCD	PIUNE	ATEDI
Beca para alumnos con discapacidad	Beca Impuls	Beca para estudiantes con discapacidad
Oficina de dedicación exclusiva	Sí	No
Servicio de transporte interno universitario	Sí	No
Acceso a información estadístico sobre el colectivo con discapacidad	Sí	No
Instalaciones universitarias adaptadas al colectivo	Promedio 73.3%	Desconocido, según opinión de directivos 70%-80%
Deserción escolar registrada sobre este colectivo	Desconocido	Se sabe de casos, no se sabe en qué magnitud
Proyectos en servicio para la inclusión	II Plan de acción sobre discapacidad e inclusión de la UAB	Programa de inclusión y equidad educativa y La UAQ incluye a todos
Faltas de respeto reportadas a este colectivo	No	Sí
Presupuesto total universitario	2019 €321'572'579.00 \$6'913'810'448.5 256.72% UAQ 2018 Fuente: Presupuesto 2019 UAB	2018 \$2'693'075'854.58 €125'259'342.07 38.95% UAB Fuente: Estado de resultados UAQ del 01/01/18-31/12/18

CONCLUSIONES ¿UN PANORAMA ALENTADOR?

Difícilmente se pueden brindar conclusiones puntuales sobre una comparación sin tomar en cuenta aspectos envolventes a la proble-



mática, debe existir un matiz que tome en cuenta diferentes particularidades contextuales las cuales son críticas para el entendimiento del funcionamiento de los diferentes sistemas analizados, sin embargo, es un parámetro válido para desarrollar nuevos métodos de vinculación funcional, así como un indicador sobre la importancia de la recolección de información sobre la población universitaria con problemas de discapacidad, regular procesos e implementar ideas innovadoras y vanguardistas con respectivas modificaciones necesarias para las locales.

Para esta población, implementar y utilizar diferentes tecnologías de información y comunicación pueden facilitar diferentes actividades que convencionalmente necesitaban de movilidad constante para su elaboración, así como ahorrar tiempo dinero y esfuerzo. En el ámbito educativo no es la excepción pues dinamiza el aprendizaje con recursos didácticos, también brinda autonomía al estudiante de realizar otras actividades y estudiar en horarios flexibles que se puedan complementar con su ritmo de vida. La educación en línea y a distancia resulta una solución viable, remota y flexible, actualmente las tendencias sobre educación online están creciendo de forma exponencial, debido a todas las bondades que ofrece esta modalidad. Al respecto, las personas en situación de discapacidad tienen una opción más para acceder a estudios universitarios y de posgrado. Esta modalidad ha sido bien recibida por este colectivo en España pues reduce las dificultades de movilidad, acceso a espacios públicos, barreras sociales y costos de estudios.

En México no se cuentan con cifras sobre la relevancia de esta modalidad para personas con discapacidad, sin embargo, el optar por esta modalidad también reduce las interacciones sociales del colectivo, manteniéndose en aislamiento, minimizando su participación en actividades culturales, deportivas,

de ocio y académicas que brinda la educación en modo presencial, lo que debilita el tejido social y normaliza la segregación y exclusión de este colectivo en actividades formativas y laborales. Es necesario promover la participación de este colectivo en la vida universitaria a partir de estrategias y proyectos de inclusión. Para lograrlo es necesario hacer un campus universitario que cuente con 100% de sus instalaciones accesibles para este colectivo, realizar cursos y talleres de sensibilización a la comunidad universitaria tanto a alumnos, profesores, como trabajadores y administrativos, permitirles tecnologías de información y comunicación como dispositivos electrónicos, aplicaciones móviles y softwares especializados para dinamizar y cubrir las necesidades especiales de su aprendizaje, enfocar estímulos sociales y económicos para culminar sus estudios, así como promover políticas públicas sobre sistemas inclusivos de transporte público y facilitar sus desplazamientos cotidianos entre su hogar y la universidad de forma autónoma.

La Universidad Autónoma de Barcelona tiene una estructura sólida sobre vinculación y servicios para las personas en situación de discapacidad, sus procesos están disponibles en medios electrónicos para consulta remota, también cuentan con un espacio universitario enfocado a este colectivo, donde pueden ser atendidos y resolver dudas, comentarios o quejas sobre actividades académicas, inserción profesional, becas especializadas, servicios de transporte interno, estudiantes de soporte para estudiantes con discapacidad. De igual manera, tienen un control sobre datos estadísticos, percepción y expectativas de sus estudiantes en situación con discapacidad, así como un plan de trabajo sexenal con objetivos y metas específicas en cada ámbito universitario tanto académico, social, laboral, de movilidad y acceso a la información para lograr la inclusión total de este colectivo, su alcance

es muy amplio, tiene muy buena percepción por parte de sus estudiantes. Los estudiantes con discapacidad no pagan inscripción y tampoco créditos, además que mantiene una beca enfocada a este colectivo, sin embargo, no se tienen datos estadísticos sobre su deserción escolar. También, continúan en trabajo constante sobre puntos con percepción débil como señalización, puertas de acceso a bibliotecas o respeto a espacios reservados a personas con discapacidad.

Por su parte, la Universidad Autónoma de Querétaro no cuenta con información estadística sobre este colectivo. El organismo encargado de ofrecer vinculación y servicios de atención a los alumnos con discapacidad (ATEDI) no cuenta con una oficina dedicada a la atención de este sector, pues su ubicación se encuentra en la oficina de la Secretaría de la Rectoría a cargo de la Lic. Verónica Núñez y no existe proceso de inscripción o seguimiento para el centro de atención para alumnos con discapacidad. La universidad cuenta con espacios adaptados para este colectivo en sus instalaciones, elevadores en edificios donde se realizan la mayor cantidad de trámites burocráticos, pero no en la gran mayoría de los edificios universitarios y algunos existentes no están en funcionamiento. Cabe mencionar que actualmente se realizaron diferentes rampas de acceso en zonas del campus donde no existían. Las oficinas, servicios y aulas principales cuentan con entradas a nivel y se cuenta con una beca institucional para este colectivo. Los esfuerzos de accesibilidad e inclusión existen tanto es así que actualmente la UAQ cuenta con dos diferentes programas de inclusión para diferentes grupos vulnerables en los que se planea lograr un 100% de acceso a espacios universitarios y realizar cursos de sensibilización y participación de la comunidad universitaria, debido a que han existido casos de deserción escolar de estudiantes en situación de discapacidad y un caso de

falta de respeto y discriminación por parte de un profesor universitario. Es inadmisibles permitir bajo ninguna circunstancia signos de discriminación a este colectivo, mucho menos de profesores institucionales quienes son encargados de vigilar que la convivencia en el aula de clase se mantenga con respeto y cordialidad.

No basta con buenas intenciones para este colectivo, si bien es visible el incremento en la atención del colectivo, también es una realidad la escasa infraestructura y accesibilidad en el campus central de la Universidad Autónoma de Querétaro pues realizar un recorrido, por ejemplo, desde la División de Posgrado de la Facultad de Ingeniería hasta las instalaciones de rectoría resulta una proeza, debido a la escasa infraestructura, las diferentes barreras físicas con las que se encuentra el usuario, la señalización y el trazo geométrico entre ambos edificios. Es cierto que existe un panorama alentador en el cual se plantean diferentes estrategias para disminuir el impacto de la falta de accesibilidad y movilidad para este colectivo, existen programas sólidos y objetivos claros, paralelamente el cumplimiento y desarrollo de dichos objetivos y programas es lento y se deben plantear estrategias catalizadoras que generen los resultados planteados en dichos documentos a la brevedad.

Los recursos de la UAQ ascienden a 30% de los percibidos por la UAB, lo que es un factor determinante para realizar cualquier obra o actividad en pro de este colectivo. Se está trabajando en diferentes puntos de accesibilidad, sin embargo, la realidad actual sobre acceso a las instalaciones sobre el campus central de estudios superiores en la UAQ no favorece a este colectivo y la realidad sobre accesibilidad en el campus central universitario dista mucho de la percepción de autoridades universitarias. La voluntad para la inclusión universitaria de este colectivo en la UAQ existe y se espera que la próxima



publicación del protocolo de atención tenga metas y objetivos claros para mejorar aspectos de inclusión a colectivos vulnerables. Se debe ser consciente también que la replicabilidad de estrategias y organismos en una institución no es posible de forma directa, se debe generar un plan estratégico de acción para la universidad que promueva y facilite la inclusión de este colectivo a espacios y actividades universitarios, generar información estadística sobre número de alumnos situación de discapacidad, tipo de discapacidad, posibles adaptaciones para mejorar su aprovechamiento, deserción escolar, percepciones sobre instalaciones, opinión sobre cátedras impartidas por profesores, señalización, convivencia universitaria y propuestas de mejoramiento de equipo y material universitario que permitan su formación de manera normalizada.

Para un colectivo que ha sido desatendido y segregado desde la creación de la máxima institución de educación regional, el tiempo es un lujo que no puede desperdiciarse. Cada día las exigencias de un mundo globalizado son más severas y requieren de una preparación y actualización constante, herramientas vanguardistas para enfrentar los retos colectivos e individuales que exige este ritmo de vida. El tener acceso integro a una educación de calidad puede atenuar los impedimentos y barreras físicas y sociales e integrar de manera absoluta a las personas en situación de discapacidad.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo durante toda esta investigación. Agradezco también a la Universidad Autónoma de Barcelona y la Universidad Autónoma de Querétaro, así también a las personas y autoridades entrevistadas por su tiempo, atención y amabilidad, la

Mtra. Judit Oliver, Dr. Lluís Casas, Dr. Manuel Santirso e Ing. Rafael Requena autoridades de la UAB, Mtra. Verónica Núñez, Lic. Alfredo Vanegas e Ing. Rafael Porrás autoridades de la UAQ. Por último, agradezco a mi familia y a la matemática Julie Gonot por su apoyo y motivación constante e incondicional.

REFERENCIAS

[1] A. Vásquez, "La discapacidad en América Latina," *Organización Panamericana de la Salud, Publicación Científica y Técnica No. 616*, pp. 9-24, 2006.

[2] A. Olivera Poll, "Discapacidad, accesibilidad y espacio excluyente. Una perspectiva desde la geografía social urbana," *Treballs de la Societat Catalana de Geografia*, p. 326/343, 2006.

[3] Universidad Autónoma de Barcelona, «Segundo plan de acción sobre discapacidad e inclusión de la Universidad Autónoma de Barcelona,» Consejo de gobierno, Barcelona, 2018.

[4] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado y M. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*, quinta edición, Ciudad de México: Mc Graw Hill, 2010.

[5] S. Kates y P. Clarkson, «Countering Design Exclusion Through Inclusive Design,» *Computers and the Physically Handicapped*, pp. 69-76, 2002.

[6] S. Kose, «Toward Inclusive Public Transportation: Rights, not privileges» *Advances in Intelligent Systems and Computing*, pp. 334-350, 2017.

[7] B. Munarriz, «Técnicas y métodos en Investigación cualitativa» *Metodología educativa I. Jornadas de Metodología de Investigación Educativa*, pp. 101-116, 1992.

[8] INJUVE- CERMI, «Jóvenes con discapacidad en España 2016,» Instituto de la Juventud, Madrid, 2016.

[9] UAB, «Discapacidad i NEEE- Beques,»

08 09 2019. [En línea]. Available: <https://www.uab.cat/web/discapacitat-i-nee/tots-els-serveis/beques-1345767370885.html>.

[10] UAB , «Impulsant Oportunitats,» 25 07 2019. [En línea]. Available: <https://www.uab.cat/doc/BasesImpuls1819>.

[11] UAQ, «Convocatoria Beca Para Estudiantes con Discapacidad,» 08 09 2019. [En línea]. Available: <https://becas.uaq.mx/docs/becas-internas/Convocatoria-beca-Discapacidad.pdf>.

[12] J. Zubieta y C. Rama, «La educación a distancia en México: Una realidad universitaria,» Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 2015.

[13] Secretaría de Desarrollo Social , «Diagnóstico sobre la situación de las personas con discapacidad en México,» Secretaría de Desarrollo Social , México, 2016.

[14] Consejo Nacional Para Prevenir la Discriminación , «Ficha temática, personas con discapacidad,» 08 09 2019. [En línea]. Available: <https://www.conapred.org.mx/userfiles/files/Ficha%20PcD%281%29.pdf>.

[15] CONAPRED, «Encuesta Nacional sobre Discriminación, Prontuario de resultados 2017,» Consejo Nacional para Prevenir la Discriminación, Ciudad de México, 2018.

[16] UAQ , «Modalidades de Becas de la Universidad Autónoma de Querétaro,» 08 09 2019. [En línea]. Available: <https://becas.uaq.mx/index.php/conocenos/modalidades-de-becas>.

[17] UAQ, «Universidad Autónoma de Querétaro, Secretaría de rectoría, Becas UAQ,» 08 09 2019. [En línea]. Available: <https://becas.uaq.mx/index.php/becas/internas>.

[18] UAB, «Acciones y actividades. Becas Impuls UAB,» 08 09 2019. [En línea]. Available: <https://www.uab.cat/web/becas-impuls-1345679533341.html>.

[19] UAB, «Discapacitat i NEE, Com accedir als serveis PIUNE,» 08 09 2019. [En línea]. Available: <https://www.uab.cat/web/discapacitat-i-nee/com-accedir-als-ser>

[veis-1345767249636.html](https://www.uab.cat/web/discapacitat-i-nee/tots-els-serveis/beques-1345767249636.html).

[20] UAB, Barcelona, «Pressupost 2019,» Universitat Autònoma de Barcelona, Cerdanyola del Valles., 2019.

[21] UAQ, «Dirección de Planeación,» 08 09 2019. [En línea]. Available: <https://directorio.uaq.mx/index.php/direcciones/direccion-de-planeacion>.

[22] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, «La discapacidad en México, datos al 2014,» Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Aguascalientes, 2016.

[23] T. Gallegos y S. French, «Inclusión y Equidad en el Nuevo Modelo Educativo,» *Revista de Administración Pública* 145, pp. 77-87, 2018.

[24] H. Sandoval, I. Pérez, F. Martínez, M. del Valle y C. . Pineda, «Disability in Mexico: a comparative analysis between descriptive models and historical periods using a timeline,» *Salud pública de México*, pp. 429-436, 2017.

REDUCCIÓN DEL EFECTO DOMINÓ MEDIANTE LA DISTRIBUCIÓN DE EQUIPOS PARA LA PRODUCCIÓN DE ETILENO

Domino effect reduction through the process layout for an ethylene process production

Francisco Ortiz-Tena^{1*}, Julio A. de Lira-Flores ², Luisa Ramírez-Granados ²

¹Universidad Tecnológica de San Miguel de Allende

²Universidad Autónoma de Querétaro

*Autor de correspondencia:
francisco.ortiz.tena@gmail.com

RESUMEN

El proceso de producción de etileno opera con la probabilidad de generar escenarios de efecto dominó, debido a los diferentes químicos que almacenan y procesan. Una forma de reducir la probabilidad es instalar protecciones, sin embargo, estas salvaguardas pueden fallar. En trabajos recientes, se ha demostrado que el diseño del equipo en las primeras etapas minimiza la probabilidad del efecto dominó, por lo tanto, se propone un modelo para distribuir el equipo en una planta de proceso de etileno, estimando la probabilidad de daño por la sobrepresión y los valores de umbral de escalada y agregando restricción de distribución de equipo como coordenadas y orientación del equipo. El modelo matemático se formuló usando programación mixta entera no lineal.

Palabras clave: layout, efecto dominó, seguridad, función probit, reducción de riesgo.

ABSTRACT

The ethylene production process operates with the probability of generating domino effect scenarios due to the different chemicals that are stored and processed. A way to reduce that probability is to install protections. However, these safeguards can fail. In recent works, it has been demonstrated that the equipment layout in the early stages of the design minimize the domino effect probability. Thus, a model is proposed to distribute the equipment in an ethylene processing plant by calculating the probability estimation of damage due to overpressure and the escalation threshold values, adding equipment distribution restrictions (such as coordinates and equipment orientation). The mathematical model was formulated using mixed-integer nonlinear programming.

Keywords: layout, domino effect, safety, probit function, risk reduction

INTRODUCCIÓN

El etileno es un compuesto químico en forma de gas, inflamable, incoloro y con un ligero olor dulce, que está conformado por dos átomos de carbono, que se encuentran unidos por un doble enlace, y cuatro átomos de hidrógeno ($H_2C=CH_2$). También, es uno de los hidrocarburos olefínicos más importantes por su doble enlace altamente reactivo, pudiendo participar en diferentes tipos de reacciones como adición, oxidación o polimerización. Además, es una materia prima en la producción de plásticos, textiles, papel, solventes, tintes, aditivos alimenticios, pesticidas y farmacéuticos [1].

Para obtener etileno, se utilizan como materia prima las mezclas de hidrocarburos, altamente inflamables, que se van separando, lo que lo vuelve un proceso con materiales, reacciones y equipos peligrosos con la probabilidad de provocar un accidente que pueda generar un escenario de efecto dominó. En ocasiones, esto puede deberse a deficiencias en la planeación y ejecución del diseño del proceso o de toda la planta. Bajo esta situación, el procedimiento a seguir es controlar los peligros mediante la instalación de sistemas de protección independientes, por ejemplo, para mitigar el riesgo es posible instalar muros contra fuegos, muros contra explosiones, detectores de gas, alarmas, entre otros. Estos mecanismos son barreras para contener o prevenir los efectos de la radiación térmica, la propagación del fuego y ondas de choque, por lo que, en muchos casos, la garantía de que no suceda un evento de tipo dominó dependerá principalmente de la efectividad de las protecciones. Una desventaja es que la instalación de estos sistemas aumenta los costos de adquisición y operación. Por esta razón, se han buscado estrategias para eliminar los peligros antes que controlarlos mediante el diseño de procesos inherentemente más seguros y, cuando esto



no es posible, la mejor opción es resolver la distribución de los elementos de la planta reduciendo el riesgo de accidentes [2].

Las plantas de procesos químicos almacenan y procesan una cantidad importante de materias peligrosas, que al ser liberadas accidentalmente pueden afectar la salud de las personas, las estructuras y el medio ambiente. En varios casos, un accidente inicial puede dañar equipos cercanos y producir lo que se conoce como efecto dominó, que es definido por Cozzani *et al.* [3] como un accidente en el que un equipo de proceso es afectado, escenario primario, y así se afecta a por lo menos otro equipo del proceso.

Estudios estadísticos muestran que accidentes incluyendo un efecto dominó continúan incrementándose principalmente en países en vías de desarrollo [4]. Varios de los trabajos para reducir el riesgo del efecto dominó se enfocan en mitigar o eliminar las consecuencias y reducir la frecuencia de los accidentes mediante la instalación de barreras de protección, incluso se han realizado esfuerzos para disminuir o eliminar los peligros por medio de diseños inherentemente más seguros [5-7]. Otras investigaciones están orientados en el desarrollo de un software para determinar la probabilidad de daño y las consecuencias de los accidentes [8-10], mientras que algunas otras se han detenido no sólo en evaluar el efecto dominó dentro de la planta química, sino también buscan prevenir daños de los alrededores de la planta [11-13].

La distribución de los equipos en la planta juega un rol importante en la reducción del riesgo de accidentes tipo dominó, así como, en los costos de planta [14]. La finalidad de ubicar los equipos radica en encontrar la mejor ubicación para cada uno de ellos, en un principio, con la finalidad de minimizar el área ocupada y los costos de interconexión, ya que la experiencia indica que se incrementa en un 80% el costo total de la tubería, debido a una mala ubicación [15], y que del 15 al 70% del costo total operativo depende principalmente de la

distribución de equipos [16]. En este sentido, existen modelos basados en programación matemática que se han propuesto para dar solución a los problemas de diseño de la distribución de instalaciones y de equipos de proceso químicos considerando aspectos seguridad. López-Molina *et al.* [17] propusieron un modelo para reducir la probabilidad de efecto dominó a causa de explosiones, basándose en el modelo de multi-energía para el cálculo de sobrepresión. Seunkyu Dan *et al.* [18] proponen un modelo de programación mixta entera lineal para la distribución de equipos y así para prevenir el efecto dominó en una planta de licuefacción de gas natural. Latifi *et al.* [19] resuelven la distribución de equipos en una refinería, planteando una programación mixta entera no lineal y considerando riesgo de emisión tóxica como escenarios de fuego, explosión y efecto dominó. Jude *et al.* [20] establecen un modelo MILP para la distribución de 7 unidades de proceso, con la finalidad de disminuir la probabilidad de daño a la propiedad. Los diferentes métodos sólo han sido aplicados a problemas con un número reducido de equipos, lo que dificulta su aplicación a problemas reales. Por esta razón, en este trabajo se propone un modelo de optimización que minimice la probabilidad de efecto dominó, producido por explosiones, en el proceso de producción de etileno [21] y en etapas tempranas del diseño de la distribución de los equipos.

METODOLOGÍA

Una vez establecido que el proceso a estudiar es la producción de etileno, la formulación del modelo se basa en un enfoque de programación mixta entera no lineal (MINLP por sus siglas en inglés Mixed Integer Non-Linear Programming). La función objetivo consiste en minimizar los costos de instalación de equipos, costos de área así como de riesgo de accidentes, sujetos a restricciones de orientación de equipos, de no superposición,

de distribución y de probabilidad de daño por una sobrepresión. El modelo matemático, incluyendo las restricciones y la función objetivo, se muestran a continuación.

Restricción de orientación de equipos

La longitud l_i y profundidad d_i del i -ésimo equipo se determina por las restricciones de orientación (Ecuaciones 1 y 2) propuestas por Papageorgiou y Rotstein [22]:

$$l_i = \alpha_i O_i + \beta_i (1 - O_i) \quad \forall i \quad (1)$$

$$d_i = \alpha_i + \beta_i - l_i \quad \forall i \quad (2)$$

Donde O_i es una variable binaria, que decide que orientación tendrá el equipo, y α_i y β_i son las dimensiones del i -ésimo equipo.

Restricción de no superposición

Las restricciones establecidas en las Ecuaciones 3, 4, 5 y 6 son las restricciones de no superposición, propuestas en [22]. La finalidad es prevenir que dos equipos, como el equipo i y el equipo j , sean colocados en la misma posición física, asignando al i -ésimo equipo la coordenada (x_i, y_i) .

$$x_i - x_j + M \cdot (E1_{ij} + E2_{ij}) \geq \frac{l_i + l_j}{2} \quad (3)$$

$$\forall i = 1, \dots, N - 1, j = i + 1, \dots, N$$

$$x_j - x_i + M \cdot (1 - E1_{ij} + E2_{ij}) \geq \frac{l_i + l_j}{2} \quad (4)$$

$$\forall i = 1, \dots, N - 1, j = i + 1, \dots, N$$

$$y_i - y_j + M \cdot (1 + E1_{ij} - E2_{ij}) \geq \frac{d_i + d_j}{2} \quad (5)$$

$$\forall i = 1, \dots, N - 1, j = i + 1, \dots, N$$

$$y_j - y_i + M \cdot (2 - E1_{ij} - E2_{ij}) \geq \frac{d_i + d_j}{2} \quad (6)$$

$$\forall i = 1, \dots, N - 1, j = i + 1, \dots, N$$

Donde M es una distancia mayor o igual a la distancia máxima permisible entre los equi-

pos, y $\{E1\}_{ij}$ y $\{E2\}_{ij}$ son variables binarias de no superposición.

Restricción de distancia

Las Ecuaciones 7, 8, 9, 10, 11 y 12 permiten determinar la distancia rectilínea o Manhattan, la cual es útil para el cálculo de longitud de tubería requerida [23].

$$R_{ij} - L_{ij} = x_i - x_j \quad (7)$$

$$\forall i = 1, \dots, N - 1, j = i + 1, \dots, N$$

$$A_{ij} - B_{ij} = y_i - y_j \quad (8)$$

$$\forall i = 1, \dots, N - 1, j = i + 1, \dots, N$$

$$R_{ij} \leq M \cdot W_{ij}^x \quad (9)$$

$$\forall i = 1, \dots, N - 1, j = i + 1, \dots, N$$

$$L_{ij} \leq M \cdot (1 - W_{ij}^x) \quad (10)$$

$$\forall i = 1, \dots, N - 1, j = i + 1, \dots, N$$

$$A_{ij} \leq M \cdot W_{ij}^y \quad (11)$$

$$\forall i = 1, \dots, N - 1, j = i + 1, \dots, N$$

$$B_{ij} \leq M \cdot (1 - W_{ij}^y) \quad (12)$$

$$\forall i = 1, \dots, N - 1, j = i + 1, \dots, N$$

Donde W_{ij}^x y W_{ij}^y son variables binarias que ayudan a determinar los valores $|x_i - x_j|$ y $|y_i - y_j|$, respectivamente, al forzar a uno de (R_{ij}, L_{ij}) y a uno de (A_{ij}, B_{ij}) a valer cero. Posteriormente la distancia Manhattan D_{ij} , entre los equipos i y j , está dada por las Ecuaciones 13 y 14.

$$D_{ij} = R_{ij} + L_{ij} + A_{ij} + B_{ij} \quad (13)$$

$$\forall i = 1, \dots, N - 1, j = i + 1, \dots, N$$

$$D_{ij} = D_{ji}$$

$$\forall i = 1, \dots, N - 1, j = i + 1, \dots, N \quad (14)$$

La Ecuación 14 garantiza que la distancia Manhattan total entre los equipos i y los equipos j , sea la misma que entre los equipos j a los equipos i .



Estimación de la probabilidad de daño debido a una sobrepresión

Diferentes accidentes, como el de San Juanico en 1984, ubicado al Norte de la Ciudad de México [24], han demostrado que la sobrepresión es un factor importante al producir efectos dominó en unidades de proceso y almacenamiento. Al ocurrir una explosión en un equipo, se genera una sobrepresión que incide sobre los equipos cercanos. Varios autores han desarrollado propuestas para evaluar el daño por una sobrepresión [25, 26]. En la mayoría de estas propuestas, se proponen aproximaciones estocásticas que incluyen cuestiones de seguridad, basándose en modelos probit (véase Ecuación 15).

$$Y_{ij} = a_k + b_k(\Delta P_{ij}) \quad (15)$$

Donde Y_{ij} es la variable probit para estimar el daño en la unidad de proceso j , teniendo una k unidad debido a la sobrepresión producida por la explosión de la unidad i , ΔP_{ij} es el pico de sobrepresión estática (Pa) y a_k y b_k son constantes del modelo.

El análisis probit es un método conocido para evaluar la relación dosis-efecto de la respuesta de humanos a sustancias tóxicas, radiaciones térmicas y sobrepresión, que se deriva de la expresión acumulativa de la función de distribución de la probabilidad Gaussiana normal.

Las constantes de la función probit son obtenidas de modelos estadísticos, provenientes de registros históricos de accidentes y escalando datos de experimentos [27, 25]. En este trabajo se han utilizado los propuestos por Mingguang y Juncheng [28] que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores umbral propuestos para equipos de proceso de la función probit

Tipo de recipiente	Función probit	Valor umbral de 30% de daño (kPa)	Valor umbral de 70% de daño (kPa)
Atmosférico	$Y = -9.36 + 1.43 \ln(\Delta P)$	15	33
Presurizado	$Y = -14.44 + 1.82 \ln(\Delta P)$	32	58
Equipos grandes	$Y = -12.22 + 1.65 \ln(\Delta P)$	24	46
Equipos chicos	$Y = -12.42 + 1.64 \ln(\Delta P)$	29	56

Con la finalidad de evitar un evento de escalamiento, el porcentaje de daño debe ser considerable. Se han definido valores umbral de escalamiento para diferentes unidades, con la finalidad de representar el porcentaje suficiente de daño estructural para producir un escalamiento. La probabilidad de daño utilizada en este trabajo está dada por la Ecuación 16 y es propuesta por Mingguang y Juncheng [28].

$$P_{Dij} = \frac{1.005}{1 + e^{-\left(\frac{Y_{ij} - 5.004}{0.6120}\right)}} \quad (16)$$

El cálculo de sobrepresión se realiza por medio de diferentes métodos, entre los más utilizados se encuentran el método TNT, el método de multi-energía y el método Baker-Strehlow. Una descripción detallada de los métodos se encuentra en [29].

Para este trabajo, se calculó la sobrepresión por el método de multi-energía por su eficiencia y confiabilidad. Cabe mencionar que su desventaja como método es que asume simetría en la explosión [29]. Al asumir esta propagación simétrica de las ondas de explosión, implica que la atmósfera se considera homogénea sin ninguna obstrucción, sin embargo, la propagación se puede ver afectada por la distribución de la velocidad del viento, la estratificación de la atmósfera y de algunas obstrucciones en tierra. El hacer una aproximación con este método permite dar una idea de lo que realmente puede ocasionar.

Tradicionalmente una gráfica es usada en el método de multi-energía para estimar el pico de sobrepresión, (ΔP), como función de la distancia característica, R_o . La sobrepresión dependerá también del nivel de intensidad seleccionado, que se puede medir en una escala de diez, donde el diez representa la mayor intensidad, mientras que las primeras son las menos intensas. Se propone una escala de siete ya que representa una mayor aproximación [28]. Las gráficas propuestas se han traducido a ecuaciones [19] que se muestran en Ecuaciones 17 y 18.

$$0.2 \leq R_{oij} \leq 2 \quad (17)$$

$$\Delta P_{1ij} = 134.1196e^{-0.8967 \cdot R_o}$$

$$2 \leq R_{oij} \leq 100 \quad (18)$$

$$\Delta P_{2ij} = 32.946R_o^{-1.121}$$

Donde:

$$R_{oij} = \left(\frac{E}{P_a}\right)^{-\frac{1}{3}} D_{eij} \quad (19)$$

La Ecuación 19 representa la distancia característica de distancia de separación entre equipos, $[[D_e]]_{ij}$, la energía de explosión que depende del tipo de material, E , y de la presión atmosférica, P_a . Para unir la disyunción presente en las Ecuaciones 17 y 18 se propone utilizar la Ecuación 20:

$$\Delta P_{ij} = \Delta P_{1ij} \cdot (1 - \gamma_{ij}) + \Delta P_{2ij} \cdot \gamma_{ij} \quad (20)$$

Donde γ_{ij} es la función relajada alrededor de la distancia característica de $R_{(oij)}=2$ y se presenta en la Ecuación 21.

$$\gamma_{ij} = \frac{R_{oij} - 2}{2 \cdot \sqrt{1 + (R_{oij} - 2)^2}} + \frac{1}{2} \quad (21)$$

La distancia $D_{(eij)}$ representa la distancia euclidiana y viene dada por la Ecuación 22.

$$D_{eij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (22)$$

Para calcular la sobrepresión y la probabilidad de daño que previamente se han descrito. La probabilidad de daño debe ser definida por ingenieros de seguridad de la planta y sus valores deben ser agregados como restricciones adicionales. Se usará el valor sugerido de 30% y la restricción queda en la Ecuación 23.

$$P_{Dij} \leq 30 \quad \forall i, j: i \neq j \quad (23)$$



Función objetivo

La función objetivo consiste en minimizar el costo total, el cual está conformado de tubería, costo de terreno y el costo asociado a la explosión, que a su vez, se asocia con el efecto dominó. El costo de daño asociado a la explosión de la i -ésima unidad, C_i^E , afectando la j -ésima unidad cercana se estima con la Ecuación 24.

$$C_i^E = C_i^P + \sum_{j \neq i} C_j^P \cdot P_{D_{ij}} \quad (24)$$

Donde C_j^P es el costo de compra del j -ésimo equipo.

El área del terreno ocupado se estima al construir el menor rectángulo, que incluya a todos los equipos de proceso. Al considerar que el inicio del terreno comienza en el origen de las coordenadas (0,0), entonces el valor para el área ocupada consistirá en detectar al equipo más lejano en la dirección de las coordenadas x (véase Ecuación 26), así como el equipo más lejano en la dirección de las coordenadas y (véase Ecuación 27). Para calcular el área se utilizará la Ecuación 25.

$$A = L_x L_y \quad (25)$$

Donde

$$L_x \geq x_i + \frac{l_i}{2} \quad (26)$$

$$L_y \geq y_i + \frac{d_i}{2} \quad (27)$$

Por lo tanto, el costo total por el terreno ocupado se obtiene de multiplicar el área por un costo específico de tierra por metro cuadrado, C_{area} . Puesto que se busca minimizar el

costo de terreno ocupado, se deberá tener valores apropiados para L_x y L_y . El costo de tubería total se considerará de la distancia obtenida del i -ésimo equipo conectado con el j -ésimo equipo y será multiplicado por un valor de tubería, $c_{(p_{ij})}$. Este costo será de cero si un equipo no se encuentra conectado con otro. Por lo tanto, la función objetivo se define como:

$$\min \sum_i \sum_{j \neq i} C_{p_{ij}} \cdot D_{ij} + \sum_i C_i^E + A \cdot C_{\text{area}} \quad (28)$$

La función objetivo junto con sus restricciones corresponde a un tipo de problema mixto entero no lineal (MINLP) de optimización.

Caso de estudio

El procedimiento propuesto se aplicará al proceso de producción de etileno propuesto por Lincoff [20], que se muestra en la Figura 1. La alimentación de proceso consiste de un gas de pirolisis que contiene una mezcla de agua, hidrógeno, metano, etano, etileno, propano, propileno, butadieno e hidrocarburos de orden superior. Cada uno de los equipos tiene un potencial de explosión, que se determinó mediante un análisis de riesgo.

Las especificaciones de los costos de los equipos y tanto de longitud α_i y de la profundidad β_i se muestran en la Tabla 3, así como la asignación de un número a cada equipo que será usado en el resto del trabajo. Se considera el peor escenario creíble, donde el material dentro del equipo es liberado a través de una tubería de 4 pulgadas durante 5 minutos, con condiciones de viento en calma y se considera que la explosión ocurre en el centro del equipo. Para este caso se tomarán en cuenta la función probit como equipos grandes y se comparará la distribución de equipos, sin considerar las restricciones de seguridad. El costo de conexión y de terreno es de 90USD/m y de 50USD/m², respectivamente.

Tabla 3. Especificaciones de los equipos longitud, profundidad, costo de USD, así como energía de explosión.

Equipo	Longitud (m)	Profundidad (m)	Costo USD	Energía de Explosión (Pa)
Flash 1 (301)	2.60	2.60	\$780,000.00	100
Flash 2 (302)	2.60	2.60	\$780,000.00	90
Flash 3 (303)	2.60	2.60	\$780,000.00	80
Flash 4 (304)	2.60	2.60	\$780,000.00	70
Flash 5 (305)	2.60	2.60	\$780,000.00	60
Secador (5)	3.50	3.25	\$2,000,000.00	50
Separador de metano (6)	3.25	3.00	\$1,900,000.00	50
Separador de etano (7)	3.00	2.75	\$1,800,000.00	50
Separador C-2 (8)	2.75	2.50	\$1,700,000.00	50
Separador de propano (9)	2.50	2.25	\$1,600,000.00	50
Separador de butano (10)	2.25	2.00	\$1,500,000.00	50
Separador de membrana (11)	2.00	2.00	\$1,000,000.00	50
Separador de condensados (12)	6.00	5.00	\$1,000,000.00	150

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo de optimización para el caso de estudio se resolvió en NEOS Server [30], usando DICOPT y SNOPT. Los resultados numéricos de la ubicación y orientación de los equipos se indican en la Tabla 4.

La función objetivo para la distribución de equipos sin considerar la probabilidad de efecto dominó es de \$19,116 y al consi-

derar la probabilidad de efecto dominó es de \$31'622,776, lo que representa un incremento sustancial, lo que se debe a que, en la distribución de equipos en la función objetivo, no se considera los costos asociados al efecto dominó, por lo que ubica los equipos juntos entre sí. Si se presenta algún accidente, en cualquiera de los equipos, en esta distribución la probabilidad de que suceda un



Tabla 4. Ubicación y orientación de los equipos para la distribución de equipos sin considerar y considerando la probabilidad de efecto dominó.

	Distribución de equipos sin considerar la probabilidad de efecto dominó				Distribución de equipos considerando la probabilidad de efecto dominó.			
Equipo	x_i	y_i	$l_{i(m)}$	$d_{i(m)}$	x_i	y_i	$l_{i(m)}$	$d_{i(m)}$
Flash 1 (301)	2.200	9.550	2.60	2.60	78.875	23.925	2.60	2.60
Flash 2 (302)	2.200	12.150	2.60	2.60	8.300	56.771	2.60	2.60
Flash 3 (303)	7.300	1.700	2.60	2.60	82.050	91.200	2.60	2.60
Equipo	x_i	y_i	$l_{i(m)}$	$d_{i(m)}$	x_i	y_i	$l_{i(m)}$	$d_{i(m)}$
Flash 1 (301)	2.200	9.550	2.60	2.60	78.875	23.925	2.60	2.60
Flash 2 (302)	2.200	12.150	2.60	2.60	8.300	56.771	2.60	2.60
Flash 3 (303)	7.300	1.700	2.60	2.60	82.050	91.200	2.60	2.60
Flash 4 (304)	4.250	4.300	2.60	2.60	1.300	67.771	2.60	2.60
Flash 5 (305)	9.900	1.700	2.60	2.60	8.300	74.771	2.60	2.60
Secador (5)	7.300	4.625	3.500	3.250	23.904	23.925	3.250	3.500
Separador de metano (6)	1.625	1.500	3.250	3.000	23.904	53.846	3.000	3.250
Separador de etano (7)	4.625	1.500	2.750	3.000	95.250	94.000	2.750	3.000
Separador C-2 (8)	1.700	4.375	2.500	2.750	76.200	1.250	2.750	2.500
Separador de propano (9)	4.750	7.375	2.500	2.250	98.875	23.925	2.250	2.500
Separador de butano (10)	7.000	7.375	2.000	2.250	90.250	99.000	2.250	2.000
Separador de membrana (11)	1.625	7.250	2.000	2.000	33.904	23.925	2.000	2.000
Separador de condensados (12)	7.300	11.000	6.000	5.000	95.250	50.300	5.000	6.000

escenario de escalamiento es muy alta (con una probabilidad del 97%), lo que ocasionaría pérdidas totales. Al calcular los costos de un efecto dominó con la misma metodología se obtiene un costo de \$208'163,169.

La representación de la ubicación física de los equipos se muestra en la Figura 2 y los efectos provocados por equipos peligrosos en términos de la probabilidad del daño se observan en la Tabla 5. Los resultados obtenidos indican que, a pesar de que se ha realizado la distribución de equipos, utilizando la metodología tradicional, sigue latente un escenario dominó. Tomemos por ejemplo el equipo 12, que es el que recibe todos los condensados de los flash y afecta de manera directa a todos los equipos. Este equipo se verá severamente afectado por el flash 1 (93% de probabilidad), flash 2 (73% de probabilidad), flash 3 (88% de probabilidad), separador de etano (81% de probabilidad) y separador de propano (90% de probabi-

lidad), por lo que en caso de que se tenga alguna explosión en alguno de estos cinco equipos iniciaría un efecto dominó, explotando el separador de condensados y a su vez explotando todos los equipos de la planta con al menos un 86% de probabilidad de presentarse el efecto dominó. En la misma Tabla 5 se observa que se comienza a reducir algunos escenarios de escalamiento y que las probabilidades son cada vez menores. Tomemos por ejemplo el equipo 8, las probabilidades de que se vea afectado el equipo 302, 304, 305, 6, 7 y 10 es menor que un 20%, por lo que se concluye que una distribución adecuada de equipos reduce el efecto dominó. Por otra parte, se evidencia también la necesidad de incorporar sistemas de control como alarmas de procesos, alarmas críticas, acciones automáticas, protecciones físicas, como válvulas de alivio o barreras de contención contra explosiones o incendios.

Tabla 5. Valores de probabilidad de daño PD.

Equipo	301	302	303	304	305	5	6	7	8	9	10	11	12
301		0.73	0.87	0.63	0.63	0.91	0.82	0.81	0.96	0.97	0.81	0.93	0.93
302	0.67		0.64	0.97	0.97	0.91	0.97	0.52	0.52	0.52	0.52	0.88	0.73
303	0.81	0.54		0.57	0.68	0.39	0.64	0.97	0.64	0.72	0.97	0.47	0.88
304	0.28	0.96	0.44		0.97	0.78	0.92	0.29	0.15	0.15	0.29	0.7	0.37

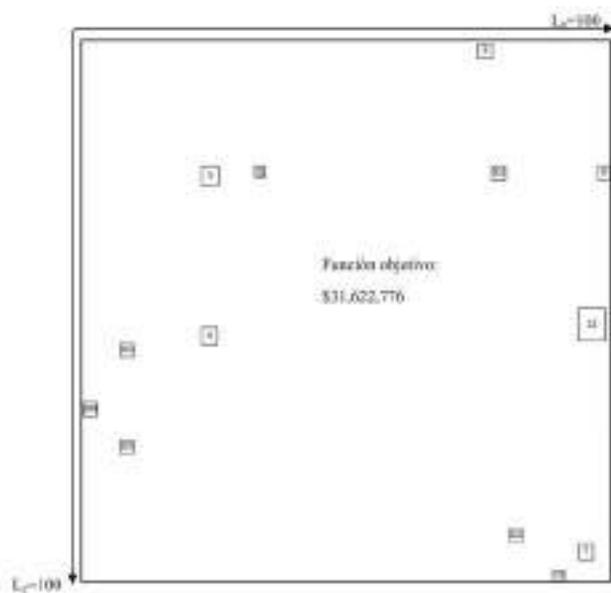


Figura 2. Distribución óptima del proceso de etileno utilizando DICOP y SNOPT considerando probabilidad de efecto dominó.

CONCLUSIONES

Se propuso un modelo basado en programación matemática para distribuir equipos en el área del proceso, con la finalidad de reducir la probabilidad de un evento de tipo dominó, debido a una sobrepresión en alguno de los equipos del proceso de producción de etileno. El modelo incluye restricciones como la orientación de equipos, de no superposición, de distancia, así como la estimación de la probabilidad de daño por una sobrepresión, mediante una función probit. Se observa que se reduce en cierta medida el efecto dominó, pero no completamente, debido a que la mayoría de los equipos opera con hidrocarburos altamente explosivos, es de esperarse entonces que la distribución de equipos ayude en reducir el riesgo de efecto dominó, pero no lo suficiente para decir que el proceso es seguro. Es así que se necesitan estudios posteriores, donde se incluyan protecciones en el modelo basado en optimización matemática,

provocando incluso mejores distribuciones de equipos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Autónoma de Querétaro y a la Universidad Tecnológica de San Miguel de Allende por su apoyo durante toda esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Yan M. "Simulation and optimization of an ethylene plant", Texas Tech University, 2000.
- [2] R. Vázquez-Román and M. S. Mannan, A new trend in designing plant layouts for the process industry, Modeling, simulation and optimization-tolerance and optimal control. IntechOpen, 2010.
- [3] V. Cozzani, G. Gubinelli and E. Salzano, "Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events," Journal of hazardous materials, vol. 129, pp. 1-12, 2006.
- [4] S. P. Kourniotis, C. T. Kiranoudis and N. C. Markatos, "Statistical analysis of domino chemical accidents," Journal of hazardous materials, vol. 71, pp. 239-252, 2000.
- [5] F. I. Khan and S. A. Abbassi, "Models for domino effect analysis in chemical process industries," Process safety progress, vol. 17, pp. 107-123, 1998
- [6] V. Cozzani and E. Salzano, "The quantitative assessment of domino effect caused by overpressure: Part II. Case studies," Journal of hazardous materials, vol. 107, pp. 81-92, 2004.
- [7] V. Cozzani, G. Gubinelli, G. Antonioni, G. Spadoni and S. Zanelli, "The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis," Journal of hazardous materials, vol. 127, pp. 14-30, 2005.
- [8] F.I. Khan and S. A. Abbassi, "DOMIFFECT (COMIno eFFECT): user-friendly software for

domino effect analysis," *Environmental modelling & software*, vol. 13, pp. 163-177, 1998.

[9] V. Cozzani, G. Antonioni and G. Spadoni, "Quantitative assessment of domino scenarios by GIS-based software tool," *Journal of loss prevention in the process industries*, vol. 19, pp. 463-477, 2006.

[10] G. L. Reniers and W. Dullaert, "DomPrevPlanning©: User friendly software for planning domino effects prevention," *Safety science*, vol. 45, pp. 1060-1081, 2007

[11] G. L. Reniers, W. Dullaert, B. J. M. Ale and K. Soudan, "Developin an external domino accident prevention framework: Hazwim," *Journal of loss prevention in the process industries*, vol. 18, pp. 127-138, 2005.

[12] G. L. Reniers, W. Dullaert, B. J. M. Ale and K. Soudan, "Managing domino effect-related security of industrial areas," *Journal of loss prevention in the process industries*, vol. 21, pp. 336-343, 2008.

[13] G. L. Reniers. "An external domino effects investment approach to improve cross-plant safety within chemical clusters," *Journal of hazardous materials*, vol.177, pp. 167-174, 2010.

[14] S. M. Mannan, H. H. West and P. C. Berwanger, "Lessons learned from recent incidents: facility siting, atmospheric venting, and operator information systems," *Journal of loss prevention in the process industries*, vol. 20, pp. 644-650, 2007.

[15] M. S. Peters, K. D. Timmerhaus, R. E. West, K. Timmerhaus and R. West, *Plant design and economics for chemical engineers*, 1st edition, Ed. McGrawHill, New York, 1968.

[16] J. A. Tompkins and J.A. White, *Facility Planning*, 1st edition, Ed: Wiley and Sons, New York, 1996.

[17] López-Molina, A., R.Vázquez-Román, M.S. Mannan and M.G. Félix Flores, "An approach for domino effect reduction based on optimal layouts". *Journal of loss prevention in the process industries*, vol. 26, pp. 887-894, 2013

[18] Dan, S. Shin, D. and Yoon, E.S. "Layout optimization of LNG-liquefaction process on LNG-FPSO preventing domino effects", *Journal of chemical engineering of Japan*, vol. 48, pp.646-655.

[19] Latifi, S.E., Mohammadi, E. and Khakzad, N. "Process play layout optimization with uncertainty and considering risk". *Computers &chemical engineering*, vol. 106, pp.224-242.

[20] Egeh, J. O., Liu, S., and Papageorgiou, L. G., "An MILP model for safe multi-floor process plant layout". In *computer aided chemical engineering*, vol. 46, pp. 379-384.

[21] A. M. Lincoff, "Separation system for recovery of ethylene and light products for naphtha- pyrolysis gas stream, process design, case study" Cache corp. Austin Texas, 1983.

[22] L.G. Papageorgiou and G.E. Rotstein. "Continous-domain mathematical models for optimal process plant layout," *Industrial & engineering chemistry research*, vol.37, pp.3631-3639, 1998

[23] D.I. Patsiatzis, G. Knight and L.G. Papageorgiou. "An MILP approach to safe process plant layout," *Chemical engineering research and design*, vol. 82, pp. 579-586, 2004.

[24] G. Arthurson. "The tragedy of san juanico-the most severe LPG disaster in history", *Burns*, vol 13 pp. 87-102, 1987.

[25] V. Cozzani and E. Salzano. "The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure: Part I. Probit models," *Journal of Hazadous Materials*, vol. 107, pp. 67-80, 2004.

[26] F. I. Khan, A. Iqbal and S.A. Abbasi. "Risk analysis of a petrochemical industry using ORA (Optimal Risk Analysis) procedure," *Process safety progress*, vol. 20, pp. 95-110, 2001.

[27] F. I. Khan and S. A. Abbasi. "Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries," *Journal of loss prevention in the process industries*, vol. 11, pp. 261-277, 1998.

[28] Z. Mingguang and J. Juncheng. "An



improved probit method for assessment of domino effect to chemical process equipment caused by overpressure," *Journal of hazardous materials*, vol. 158, pp. 280-286, 2008.

[29] D. M. Crowl and J. F. Louvar, *Chemical Process Safety*, 2nd ed., Ed. Prentice Hall, New Jersey: Upper Saddle River, 2002.

[30] (2019) The NEOS Server [Online] Available: neos-server.org/neos/solvers/lp:CPLEX/GAMS.html

ANÁLISIS DE LA NORMATIVA PARA LA EDIFICACIÓN: UNA APROXIMACIÓN A LA REGULACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE DEL HÁBITAT DE LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS EN LAS RESERVAS DE LA BIÓSFERA

Analysis of the regulations for the building: an approach to the regulation of the sustainable construction of the hábitat of the human settlements in the Biosphere Reserves

Lervin Benítez Álvarez^{1*}, Carlos Cobreros Rodríguez¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro

*Autor de correspondencia:
Craft.vink@gmail.com

RESUMEN

Las Reservas de la Biósfera son áreas que buscan llevar a cabo prácticas de uso sostenible que permita el bienestar del ser humano sin degradar el ambiente, al promover así la conservación, el desarrollo y el apoyo logístico dentro de la reserva. Es por ello que en la medida de lo posible se debe regular la construcción del hábitat de los asentamientos humanos dentro de las zonas permitidas de las reservas para evitar el desequilibrio en la relación del hombre con su medio ambiente.

El análisis bibliográfico y documental de este escrito busca las normativas sobre la construcción del hábitat de los asentamientos humanos en México y dentro de las Reservas de la Biósfera. Se genera una comparativa entre las ventajas y desventajas ante una normativa de sostenibilidad que regule la construcción del hábitat, y los primeros indicios sobre lo que se puede hacer en la Reserva de la Biósfera de la Sierra Gorda de Querétaro como primera aproximación para comenzar a regular la construcción del hábitat y buscar el equilibrio entre la reserva de la biósfera y los asentamientos humanos.

Palabras clave: normativa, hábitat, construcción, reserva de la biósfera, asentamientos.

ABSTRACT

Biosphere Reserves are areas that seek to develop sustainable use practices that allow human well-being without degrading the environment, and promote the conservation, development and logistical support within the reserve. That is why, as far as possible, the regulation of construction of human settlement habitats within the zones allowed in the reserves should be carried out in order to avoid the imbalance in man's relationship with his environment.

The bibliographic and documentary analysis presented in this paper looks at the

regulations that exist on the construction of human settlement habitats in Mexico and within the Biosphere Reserves. It presents a comparison between the advantages and disadvantages that exist in a regulation of sustainability that allows the regulation of habitat construction; from there, the first indications are generated about what can be done in the Sierra Gorda of Querétaro Biosphere Reserve (as a first approximation) to begin a regulation of habitat construction that seeks to have the balance between the biosphere reserve and human settlements.

Keywords: regulations, habitat, construction, biosphere reserve, settlements.

INTRODUCCIÓN

En épocas actuales el término sostenibilidad ha sido un tema controversial a nivel mundial y se entiende como: el desarrollo que busca satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones, garantizando su equilibrio a través del crecimiento económico, el cuidado del medio ambiente y el bienestar social [1].

El desarrollo sostenible busca crear conciencia de que el medio ambiente no es una fuente generadora de recursos inagotables, por lo cual es necesario la protección y el uso racional de los mismos y promueve el desarrollo social a través de las relaciones entre las comunidades y culturas para alcanzar niveles favorables en salud, educación y calidad de vida. La sostenibilidad establece una estrecha relación entre el aspecto ambiental, económico y social, al trabajar conjuntamente en la búsqueda de soluciones ante estas problemáticas [2].

En 1971 la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, por sus siglas en inglés) lanzó el programa El Hombre y la Biósfera (MAB, por



sus siglas en inglés), con el objetivo de establecer el uso racional y la conservación de los recursos de la biósfera para mejorar el vínculo global entre el ser humano y el medio ambiente, y como una alternativa para gestionar la apropiada convivencia entre los seres humanos y la naturaleza de manera equilibrada, justa y equitativa, al permitir la conservación de importantes ecosistemas del planeta [3].

Actualmente el cuidado y la conservación del medio ambiente se han convertido en temas de importancia mundial y han sido abordado por diversos países. Ante ello, se presenta una problemática que es el crecimiento de la población en las diferentes partes del mundo como uno de los principales factores que generó la dispersión de los asentamientos humanos en zonas restringidas para uso habitacional, lo que trajo como consecuencia la explotación y el uso irracional de los recursos por parte del hombre, y así daños irreversibles al ambiente y el rompimiento de la relación hombre-medio ambiente. Cabe mencionar que el desarrollo de las ciudades ha convertido a la construcción en la fuerza impulsora del sector económico, sin embargo, es la principal industria que produce mayor contaminación al medio ambiente, ya que cualquiera de sus procesos requiere del uso de diversas maquinarias y recursos naturales [4].

Reserva de la Biósfera

Las reservas de la biósfera son áreas biogeográficas naturales y culturales, regidas bajo la soberanía de su respectivo país y reconocidas por el Programa MAB que mantiene el equilibrio entre la conservación de la naturaleza, la protección de la diversidad cultural y el desarrollo económico local. Estas reservas se establecen en ecosistemas terrestres, marinos y costeros, dentro de los cuales son de vital importancia la integración de las comunidades locales y sus actividades para la conservación [5].

Como misión principal la reserva de la biósfera busca las prácticas de uso sostenible que permitan el bienestar humano sin alterar el ambiente, para lo cual debe cumplir con tres funciones principales:

Conservación: proteger los ecosistemas y paisajes junto con su diversidad genética.

Desarrollo: generar el desarrollo económico y humano dentro de las reservas de la biósfera de forma sostenible desde el ámbito socio-cultural y ambiental a través de la implementación del uso de la tierra en relación con la comunidad y el medio ambiente.

Apoyo logístico: promover la educación, la investigación y la vigilancia del medio ambiente.

La estructura de las Reservas de la Biósfera se compone de 3 zonas (véase Figura 1), que se encuentran vinculadas y complementadas entre sí, y se describen a continuación [6]:

a) Zona Núcleo: se compone de un ecosistema estricta y rigurosamente protegido que contribuye a conservar la riqueza natural de la reserva (paisajes, ecosistemas, especies y variaciones genéticas). La intervención humana está permitida de forma limitada.

b) Zona Tampón o de Amortiguamiento: rodean a las zonas anteriores, por lo que actúan como regiones para amortiguar los efectos de las acciones humanas sobre las zonas núcleo y se utilizan para actividades compatibles con prácticas ecológicas sólidas que pueden reforzar la investigación científica, el monitoreo, la capacitación y la educación.

c) Zona de Transición: en esta parte de la reserva se permite el mayor número de actividades, al fomentar un desarrollo económico y humano que sea sociocultural y ecológicamente sostenible.

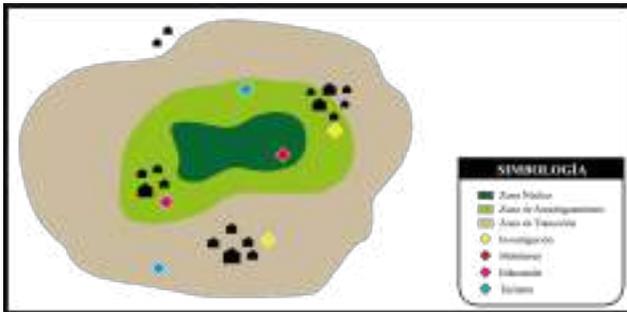


Figura 1. Zonificación de la Reserva de la Biosfera.

Fuente: Elaboración propia a partir de información de [6]

En México, las reservas de la biósfera se componen aproximadamente del 59.8% de la superficie protegida, sin embargo, las actividades humanas se ven limitadas a las zonas de amortiguamiento, donde se han establecido restricciones para aprovechar el uso de los recursos de forma sustentable y sin alterar las condiciones del medio ambiente. En épocas actuales en la gestión ambiental del país, los procesos de interacción e integración entre el hombre y la naturaleza se han debilitado por los factores que han dejado de lado los asentamientos humanos y se han enfocado principalmente en el cuidado y conservación de los recursos y la biodiversidad [7].

Cabe mencionar que en las diversas reservas del mundo se ha comenzado a alterar el equilibrio entre el medio ambiente y el ser humano, viéndose reflejado dentro del entorno a falta de una normativa que regule la construcción del hábitat de los asentamientos humanos como un factor importante por ser inclusive el causante de la pérdida de identidad, tradiciones y cultura, como se observa específicamente en el contexto de la Reserva de la Biósfera de la Sierra Gorda de Querétaro.

Objetivo

Por lo anterior, el presente artículo tiene como objetivo principal la recolección y el análisis comparativo de la información referente a la

normativa para la construcción del hábitat de los asentamientos humanos dentro de la Reserva de la Biósfera, centrándose específicamente en la Reserva de la Biósfera de la Sierra Gorda de Querétaro y tomando como base el eje principal del programa el Hombre y la Biósfera (MAB). Este establece que la Reserva de la Biósfera es un espacio de equilibrio entre el medio ambiente y los asentamientos humanos, y al no existir una regulación o normativa de sostenibilidad de la construcción del hábitat se puede causar una alteración del equilibrio dentro de la reserva.

La estructura del artículo se presenta en tres partes: metodología en la que se muestra la información bibliográfica referente a la normativa de sostenibilidad sobre la construcción del hábitat de los asentamientos humanos y de los que aplican a las Reservas de la Biósfera, al hacer un análisis comparativo entre estas normativas. En el apartado de Resultados y discusión se explica el conjunto de estrategias que surgió del análisis comparativo de las normativas y se discute sobre los primeros indicios que se podrían tomar para establecer una posible regulación de la construcción del hábitat de los asentamientos humanos en la Reserva de la Biósfera. Finalmente en las conclusiones se expone la reflexión crítica sobre la importancia de regular la construcción en la Reserva de la Biósfera al ayudar a mantener el equilibrio entre el hombre y el medio ambiente como se establece en el programa el Hombre y la Biosfera (MAB) de la UNESCO.

METODOLOGÍA

A continuación, se comienza a exponer el marco normativo de la construcción en México que servirá como base para el análisis crítico y comparativo de la normativa que se aplica o se puede aplicar a la construcción del hábitat de los asentamientos humanos en la Reserva de la Biósfera.



Marco Normativo de la construcción en México

Por la evolución del sector de la construcción se ha desarrollado un conjunto de normas y reglamentos que ha servido de base para su regulación y se han ido modificando y adecuando con el paso del tiempo para mejorar el crecimiento y el diseño de las ciudades. En la Tabla 1 se muestra la estructura del funcionamiento sobre el proceso de edificación, donde se observa que las autoridades locales (estados y municipios) son quienes se encargan de vigilar el cumplimiento del marco jurídico establecido para la industria de la construcción, así como de actualizar y promover los servicios e infraestructura.

El objetivo principal de la normatividad aplicada a los proyectos arquitectónicos consiste en mejorar las condiciones en el contexto donde se encuentra inmerso el ser humano, al definir la reglamentación referente al diseño y a la construcción basados en el confort, la habitabilidad y la funcionalidad en las edificaciones y los espacios urbanos [9].

El Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., (ONNCCE) es la principal entidad que se encarga de la certificación en materia de construcción tomando en cuenta los

criterios de calidad, seguridad y confort de las edificaciones de uso residencial y no residencial [10].

Así mismo las Normas Mexicanas (NMX) enfocadas a la industria de la construcción se basan principalmente en la búsqueda de la calidad de los productos empleados para elaborar vivienda o infraestructura, y así una edificación sustentable [11].

En México, las Secretarías con la facultad de desarrollar Normas Oficiales Mexicanas (NOM's) son: Secretaría de Gobernación (SEGOB), Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), Secretaría de Energía (SENER), Secretaría de Economía (SE), Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT), Secretaría de Trabajo y Previsión Social (STPS), Secretaría de Turismo (SECTUR), Secretaría de Salud (SSA), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SEMARNAT), Secretaría del Medio Ambiente y Recurso Naturales (SAGARPA), Secretaría de Seguridad Pública (SSP) y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) [12].

En la Tabla 2 se exhiben las diversas normativas y reglamentaciones que rigen la construcción de edificaciones e infraestructura dentro del país.

Tabla 1. Elementos involucrados en el proceso de la construcción [8].

Autoridades locales	Marco normativo	Proyecto y	Usuario-propietario	Proveedores de insumos
Marco normativo actualizado	Códigos o reglamentos de construcción	Diseñador	Conservación y mantenimiento	Productos de calidad
Supervisión, vigilancia en el cumplimiento del marco normativo (permisos y licencias, visto bueno de ocupación, uso de suelo, entre otros)	Reglamentos de fraccionamientos	Constructor-desarrollador	Pago de derechos	Productos certificados
Proveer infraestructura y servicios	Normas o estándares	Perito o responsable de la obra		Participación en desarrollo de normas

Tabla 2. Instrumentos de regulación para construir edificaciones e infraestructura en el país.

Instrumento	Objetivo	Especificaciones
Reglamentos de construcción [9]	Instrumento legal emprendido por el Gobierno Estatal cuya finalidad es aportar los criterios para todo tipo de edificación (públicas o privadas) al regular su diseño y construcción.	Establece los trámites para el registro del desarrollo de la construcción. Licencias Normas arquitectónicas y de seguridad estructural Instalaciones mínimas
Normas Técnicas Complementarias (NTC) [13]	Proporcionan los requerimientos mínimos para el diseño y la construcción de diferentes tipos de edificaciones, con las especificidades que otorgan el correcto funcionamiento, accesibilidad, habitabilidad, higiene, servicios, comunicación, evacuación y prevención de emergencias, integración, contexto e imagen urbana y sus instalaciones.	Diseño por sismo y por viento. Diseño y construcción de cimentaciones. Estructuras de concreto, madera, metálicas y mampostería. Criterios y acciones para el diseño estructural de edificaciones.
Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano [14], [15]	Establece las normas básicas e instrumentos de gestión para la planeación, ordenación y regulación de los asentamientos humanos en el territorio nacional, con pleno respeto a los derechos humanos, así como al cumplimiento de las obligaciones del Estado para promoverlos, respetarlos, protegerlos y garantizarlos plenamente.	Se liga con el cumplimiento de seis de los Objetivos del Desarrollo Sostenible: Se liga con el cumplimiento de seis de los Objetivos del Desarrollo Sostenible: 1. Erradicación de la pobreza 2. Igualdad de género 3. Agua potable y saneamiento 4. Energías renovables 5. Ciudades y comunidades sostenibles 6. Alianza para el logro de los objetivos
Plan de Desarrollo Urbano [16]	Conjunto de normas estratégicas territoriales que orientan el desarrollo urbano y regional de cada entidad.	Elemento principal en cuestión de ordenamiento territorial, basándose en tres tipos de políticas: Impulso al desarrollo urbano De consolidación De control
Ley de Vivienda [9]	Dictamina y regula la política nacional, los programas, instrumentos y los apoyos a las familias para que puedan tener una vivienda digna y decorosa.	Brindar protección al patrimonio familiar de los mexicanos. Promover el fomento al ahorro para el financiamiento y la edificación de la vivienda. Dar créditos accesibles y protección a los derechohabientes. Facilitar acceso a la vivienda para un mayor número de familias. Priorizar programas y soluciones de vivienda de las zonas afectadas por desastres naturales y actos terroristas.
Códigos de Edificación [17]	Regula el desarrollo de una vivienda, al agregar el reglamento necesario para que sea segura, confiable, habitable y sustentable dentro de un contexto urbano y equilibrado.	Aplicados generalmente a la construcción de vivienda y emitidos por el Gobierno Federal y la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI).
Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) [18]	Conjunto de normas enfocadas a la preservación, restauración del equilibrio ecológico y protección al medio ambiente, dentro del territorio nacional y en los entornos donde la nación aún ejerce su soberanía y jurisdicción.	Marco general sobre información y participación en temas ambientales, responsabilidad por el impacto ambiental y otras maneras de recurrir.



Tanto en México como en otros países existen instrumentos que regulan o certifican la construcción sostenible del hábitat, los cuales están basados en criterios como suelo, agua, energía, materiales para la construc-

ción, responsabilidad social, entre otros. A continuación en la Tabla 3, se muestran estos instrumentos, así como sus características principales y el objetivo de cada uno sobre el tema de la construcción sustentable.

Tabla 3. Instrumentos de regulación o certificación para la construcción sustentable

Instrumento de regulación o certificación	Objetivo	Especificaciones
Programa de Certificación de Edificaciones Sustentables (PCES) [19]	Promueve y fomenta la reducción de emisiones contaminantes y el uso eficiente de los recursos naturales en el diseño y operación de edificaciones en la CDMX, basándose en criterios de sustentabilidad y eficiencia ambiental, en la implementación y certificación de un proceso de regulación voluntaria, y en el otorgamiento de incentivos económicos, para un beneficio social y una mejor calidad de vida de los habitantes.	Edificaciones en operación o en desarrollo (diseño, construcción, renovación u operación), destinadas a uso habitacional o a oficinas. Los puntos son otorgados por el Organismo Certificador y el COPES, ya que no cuenta con una herramienta que realice el cálculo del puntaje obtenido en los diferentes rubros ambientales. Los rubros y créditos de evaluación son: Energía: de 8 hasta 40 puntos. Agua: de 5 hasta 25 puntos. Residuos sólidos: de 7 hasta 10 puntos. Calidad de vida y responsabilidad social: de 11 hasta 25 puntos. Impacto ambiental y otros: de 15 hasta 20 puntos. Se evalúan 46 criterios que pueden sumar en total hasta 120 puntos. Y se considera: Cumplimiento: 21 a 50 puntos. Eficiencia: 51 a 80 puntos. Excelencia: 81 a 100 puntos.
Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) for Homes [20]	Propone soluciones para mantener un equilibrio entre el ambiente, la sociedad y la economía, basado en usar datos científicos y técnicos que permiten proteger, preservar y restablecer el medio ambiente, los ecosistemas y las especies.	Certificación que evalúa el desempeño ambiental desde la perspectiva de todo el edificio, proporcionando un estándar para edificios verdes en el diseño, construcción y operación. Requiere principios ecológicos y de eficiencia energética. Fue desarrollado por Estados Unidos: Green Building Council (USGBC). Se basa en los siguientes criterios: Proceso integrativo: hasta 2 puntos. Ubicación y Transporte (LT): hasta 30 créditos. Sitios Sostenibles (SS): hasta 7 créditos. Eficiencia de Agua (WE): hasta 22 créditos. Energía y Atmósfera (EA): hasta 66 créditos. Materiales y Recursos (MR): hasta 10 créditos. Calidad Ambiental Interior (EQ): hasta 16 créditos. Innovación (IN): hasta 6 créditos. Prioridad Regional (RP): hasta 4 créditos. Se pueden alcanzar hasta 163 créditos sin considerar los puntos adicionales. La escala de la certificación es: Básica: 34-49 Plata: 50-59 Oro: 60-79 Platino: 80+

Instrumento de regulación o certificación	Objetivo	Especificaciones
<p>Excellence in Design for IFC Excellence in Design for Greater Efficiencies (EDGE) [21]</p>	<p>Busca crear una nueva vía para el crecimiento verde, al demostrar el caso financiero de una forma práctica, orientada a la acción que hace hincapié en un enfoque cuantitativo. Y de esta manera cerrar la brecha entre las normas de construcción verde inexistentes o poco reforzadas, las normas internacionales y los costos. El potencial se realizará a más bajos costos de servicios públicos al tiempo que reduce drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero.</p>	<p>Herramienta de creación de diseño, sistema de certificación y norma verde mundial.</p> <p>Permite el descubrimiento de soluciones técnicas en la etapa inicial de diseño con el fin de reducir gastos operativos y el impacto ambiental.</p> <p>Empleado para edificios nuevos como casas, oficinas, retail u hospitales. Sólo se certifican proyectos de construcción. EDGE calcula ahorros operativos y menores emisiones de carbono para su edificio, a comparación con un caso base.</p> <p>Se analizan 3 parámetros: energía, agua y materiales, los cuales deben lograr un ahorro mínimo del 20% en cada uno y sólo se certifica como pasa/no pasa.</p>
<p>Norma Mexicana</p>	<p>Contribuir en la mitigación de impactos ambientales y en el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, sin dejar de lado los aspectos socioeconómicos que aseguran su viabilidad, habitabilidad e integración al entorno urbano y natural.</p>	<p>Especifica los criterios y requerimientos ambientales mínimos para una edificación sustentable.</p> <p>Especifica los criterios y requerimientos ambientales mínimos para una edificación sustentable.</p> <p>Las unidades de verificación han sido aprobadas por la PROFEPA, de acuerdo con los artículos 68 y 70 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.</p> <p>Es de aplicación voluntaria para los edificios ubicados dentro del territorio mexicano, ya sean públicos o privados, destinados en su totalidad o en uso mixto a diferentes actividades de índole habitacional, comercial, de servicios o industrial. Aplica a las edificaciones y sus obras exteriores, sean edificios individuales o en conjunto, nuevos o existentes, sobre uno o varios predios, en renta o propias.</p> <p>Se basa en los siguientes rubros: suelo, energía, agua, materiales y residuos, calidad ambiental y responsabilidad social, paisaje, calidad del ambiente interior y responsabilidad social.</p> <p>Toda edificación sustentable debe lograr un balance entre los distintos rubros ambientales considerados a lo largo de su ciclo de vida, al conceder importante atención a los aspectos de localización, funcionalidad, desempeño, aprovechamiento y diseño.</p>



Instrumento de regulación o certificación	Objetivo	Especificaciones
<p>Sistema de Evaluación de la Vivienda Verde SISEVIVE-ECO-CASA (INFONAVIT) [23]</p>	<p>Mejorar el programa Hipoteca Verde y elevar la calidad de vida de sus acreditados al disminuir el gasto familiar, optimizar el uso de recursos y mitigar emisiones de CO₂ al medio ambiente.</p>	<p>Desde una perspectiva energética y medioambiental, este sistema permite evaluar y calificar el comportamiento de la vivienda.</p> <p>El procedimiento se realiza a través del Registro Único de Vivienda (RUV), y de dos herramientas de cálculo que en conjunto dan como resultado el impacto energético y medioambiental de la vivienda:</p> <p>DEEVi: Hoja de cálculo para el diseño energéticamente eficiente de la vivienda.</p> <p>SAAVi: Simulador de ahorro de agua en la vivienda. Desde una perspectiva energética y medioambiental, este sistema permite evaluar y calificar el comportamiento de la vivienda.</p> <p>El procedimiento se realiza a través del Registro Único de Vivienda (RUV), y de dos herramientas de cálculo que en conjunto dan como resultado el impacto energético y medioambiental de la vivienda:</p> <p>DEEVi: Hoja de cálculo para el diseño energéticamente eficiente de la vivienda.</p> <p>SAAVi: Simulador de ahorro de agua en la vivienda.</p> <p>Para la evaluación se consideran:</p> <p>Demanda específica total: diseño constructivo, materiales de la envolvente y diseño bioclimático.</p> <p>Demanda de energía primaria: consumo de electricidad y gas.</p> <p>Consumo proyectado de agua.</p> <p>Compara la vivienda a construir con una vivienda diseñada y equipada de manera convencional denominada línea base y para ello toma en cuenta:</p> <p>Índice de Desempeño Global (IDG): expone el desempeño energético y medioambiental mediante una escala que va de la G a la A, siendo A la más eficiente, y de la suma del DEEVi y el SAAVi.</p>
<p>Acciones de Mitigación Nacionalmente Apropriadas (NAMA).</p>	<p>Mitiga emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el sector de la vivienda para mejorar la eficiencia energética y disminuir el consumo de combustibles fósiles y del agua, al promover financiamiento adicional y al implementar eco-tecnologías, mejoras en el diseño arquitectónico y el uso de materiales constructivos eficientes.</p>	<p>Aplica para viviendas nuevas y existentes. Crea el diseño técnico, las estructuras financieras y la infraestructura de reportes necesarios en la búsqueda de fondos adicionales en apoyo al desarrollo sustentable.</p>

Instrumento de regulación o certificación	Objetivo	Especificaciones
<p>Certificación del Edificio Vivo (Living Building Challenge) [25]</p>	<p>Ofrece un marco para el diseño, la construcción y la relación simbiótica entre los individuos y todos los aspectos de su comunidad, cuya relevancia consiste en ser una serie de verbos que convocan a la acción para construir los objetos más duraderos de la humanidad y para generar las relaciones entre estos objetos que crean el sentido amplio de la comunidad y conectividad.</p>	<p>Esta certificación cuenta con tres variantes: Certificación Living: logro de todos los imperativos asignados a su tipología. Certificación pétalo: considera principalmente los pétalos de agua, energía y materiales. Certificación del Edificio Verde (CORE): tiene en cuenta los 10 imperativos básicos. Certificación energía balance cero (NZEB). Certificación carbono balance cero. La evaluación de esta certificación se basa en 7 pétalos: Lugar: ecología del lugar, agricultura urbana, intercambio de hábitat y vida a escala humana. Agua: uso responsable del agua y balance positiva del agua. Energía: energía+reducción del carbón y balance positivo de energía. Salud y felicidad: entorno interior saludable, rendimiento interior saludable y acceso a la naturaleza. Materiales: materiales responsables, lista roja, industria responsable, economía viva y balance positivo de residuos. Equidad: acceso universal e inclusión. Belleza: belleza+biofilia y educación inspiración.</p>



Todos estos instrumentos de regulación mencionados con anterioridad son en la mayoría de los casos aplicados al ámbito urbano y en ocasiones sirven de base para el contexto rural, sin embargo, al no ser instrumentos de regulación para este contexto las necesidades de construcción y edificación se dificultan, ya que se intenta adaptar sistemas y procesos que al final de cuentas terminan generando un efecto desfavorable en el contexto y en el habitar del ser humano.

Dentro de los asentamientos rurales se menciona específicamente las Reservas de la Biósfera, debido a que son zonas de protección y conservación que buscan mantener un equilibrio entre el ser humano y su contexto. Esta falta de regulación de la construcción del hábitat de los asentamientos humanos debilitan ese equilibrio que debe existir.

La regulación en las Reservas de la Biósfera

En un principio como se menciona en la introducción, para regular las Reservas de la Biósfera como espacios que permitieran el uso racional y conservación de los recursos para mejorar la relación global entre el ser humano y el medio ambiente, la UNESCO lanzó el programa El Hombre y la Biósfera, el cual fue la primera aproximación de un instrumento de regulación que buscaba en ese momento mantener el equilibrio entre el hombre y su medio ambiente al buscar la conservación de importantes ecosistemas en el planeta [3].

Posteriormente, en el marco del segundo congreso mundial sobre Reservas de la Biósfera denominado Conferencia de Sevilla en 1995, se señaló que la protección de la diversidad biológica no debe ser vista de manera aislada de las necesidades humanas, remarcando el rol activo del ser humano al habitar y desarrollar sus actividades económicas como elemento integral dentro de las

Reservas de la Biósfera, y cuyo objetivo es conservar y preservar su ambiente natural. La participación de los grupos de interés locales es importante para planificar nuevas Reservas de la Biósfera, marcando con esto un avance en el Programa el Hombre y la Biósfera. [6]

Así mismo el Plan de Acción de Madrid para el periodo 2008-2013 sugiere a las reservas de la biósfera como lugares de demostración que ofrecen respuestas eficaces a los nuevos retos, tales como la pérdida de los conocimientos tradicionales y la diversidad cultural, la demografía, la pérdida de tierras cultivables, el cambio climático, la biodiversidad y desarrollo sostenible. Es así que se busca que las reservas de la biósfera sean lugares capaces de mitigar y adaptarse al cambio climático, promover el uso de las energías renovables, al aprovechar los servicios y productos de los ecosistemas para mejorar el desarrollo y bienestar humano [26].

También existe la Red Mundial de Reservas de la Biósfera, una red dinámica e interactiva que busca promover en armonía la integración de las comunidades y la naturaleza, con el fin de generar el desarrollo sostenible a través del diálogo participativo, la disminución de la pobreza, el intercambio de conocimientos, la mejora del bienestar, el respeto a los valores culturales y la capacidad de la sociedad de adaptarse a los cambios, contribuyendo de esta manera a cumplir los Objetivos de Desarrollo del Milenio [6].

Es importante mencionar que, en su mayoría, las reservas de la biósfera del continente africano son las que se encuentran más descuidadas, debido a que hace falta un compromiso tanto de los habitantes de las comunidades como de las autoridades locales, ya que existe una explotación irracional de los recursos principalmente de la madera como elemento para la construcción de vivienda. [26] En cambio, las reservas de la biósfera europeas han puesto en práctica las

Estrategias de Sevilla, llegándose a convertir en regiones modelos de desarrollo sustentable [6].

Otro instrumento que se ha empleado en las reservas de la biósfera son los Programas de Manejo que se elaboran con las instituciones internacionales, las comunidades de adentro de las reservas y las autoridades locales, los cuales se componen de elementos que permiten regular el cuidado y la conservación de la biodiversidad, los recursos naturales y la interacción de los habitantes de las comunidades con su entorno natural. Es importante mencionar también que este programa de manejo no contempla algún tipo de regulación que permita la construcción de las viviendas para los habitantes dentro de la reserva, lo que es un elemento importante para ellos [27].

Reserva de la Biósfera en México: Sierra Gorda de Querétaro

Uno de los retos más grandes de conservación en México y en el resto del mundo es lograr la aplicación de mejores prácticas y principios sustentables de desarrollo en las urbes y poblados, y en las zonas agrícolas, pecuarias, industriales y turísticas, a través de los cuales se sustenten y promuevan prácticas de uso de recursos de bajo impacto. Para lograrlo, es necesario crear condiciones favorables en los entornos político, social y productivo que influyan sobre las áreas protegidas y sobre los ecosistemas que los interconectan. [28]

En México, las estrategias más relevantes para la conservación dentro y fuera de las áreas protegidas que el gobierno federal ha implementado, a través de la SEMARNAT y la CONANP, son los Programas de Desarrollo Regional Sustentable (PRODERS) y los Programas de Conservación para el Desarrollo Sostenible (PROCOCODES). Se busca con ellos promover el desarrollo con criterios de sus-

tentabilidad, frenar el deterioro ambiental y articular políticas de conservación enfocadas a mejorar el nivel de vida de los pobladores [29].

En México, las instituciones que se encargan de la administración, reglamentación y cuidado de las áreas naturales protegidas son las siguientes:

SEMARNAT. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales

CONANP. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas

PROFEPA. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente

CONABIO. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad

Dentro de las reglamentaciones emitidas para la protección de la biodiversidad, el medio ambiente y las áreas naturales protegidas se encuentran:

Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Publicado el 28 de enero de 1988.

Reglamento de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Áreas Naturales Protegidas.

Reglamento de la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes.

Reglamento de la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Ordenamiento Ecológico.

Reglamento de la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Evaluación al Impacto Ambiental.



Reglamento de la Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados con las mismas.

Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales.
Reglamento de la Ley Agraria en Materia de Ordenamiento de la Propiedad Rural.

Reglamento Interior SEMARNAT.

Sólo algunas reservas de la biósfera de Mé-xico poseen un Programa de Manejo, en el cual se describen las características generales de las reservas, así como los cuidados que deben de tenerse, la flora y la fauna, entre otros.

La Reserva de la Biósfera de la Sierra Gorda de Querétaro se ubica al norte del estado de Querétaro, representando el 32.02% del territorio total del estado. Está conformada por los municipios de Arroyo Seco, Jalpan de Serra, Landa de Matamoros (abarcados en su totalidad), Peñamiller (69.7%) y Pinal de Amoles (88.03%), incluye 638 localidades y las cabeceras municipales. [30]



Figura 2. Macro y micro localización de la Reserva de la Biósfera de la Sierra Gorda [31].

En la Sierra Gorda la población rural vive dispersa en cientos de pequeñas comunidades diseminadas a lo largo y ancho de un territorio que está constituido como área natural protegida en razón de que mantiene el carácter de Reserva de la Biosfera [27].

La conservación de los ecosistemas y su biodiversidad puede constituir una fuente inagotable de recursos naturales y beneficios para sus usuarios, en la medida en que sean utilizados de manera racional y se evite el abuso y deterioro de sus elementos. Se trata de utilizar el agua, suelo, aire, flora y la fauna de tal manera que no se alteren los procesos biológicos y evolutivos que determinan su distribución, abundancia y diversidad. También se busca revertir los procesos de deterioro al prevenir y rehabilitar aquellos elementos naturales que han sido alterados de manera significativa mediante la deforestación, pérdida de suelo, cacería furtiva, saqueo de especies silvestres, mal uso y contaminación de fuentes de agua y el deterioro de zonas de recarga [27].

De acuerdo con el Programa de Manejo de la Reserva de la Biosfera de Querétaro [27], las reglas enfocadas en la relación humano-contexto son consideradas en referencia a lo que no puede realizarse dentro de la reserva y se anuncian a continuación:

Regla 53. En las zonas núcleo de la reserva no se permite la construcción de obras e infraestructura, a excepción de las necesarias para el aseguramiento de los ecosistemas y el desarrollo de actividades de protección, educación ambiental e investigación.

Regla 54. En toda la Reserva, no se permitirá el desarrollo de las siguientes actividades:

- 1) La fundación de nuevos centros de población.
- 2) El aprovechamiento de recursos forestales maderables y no maderables, sin la autorización correspondiente.

3) La construcción de obras de infraestructura, sin la autorización correspondiente.

La institución que administra la Reserva de la Biósfera de la Sierra Gorda de Querétaro es la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), a cargo del biólogo Miguel Ángel Cuellar Colín. Las instalaciones se encuentran en la población de Jalpan de Serra [32].

En una entrevista realizada en las oficinas de la CONANP a Cuellar Colín (2018), él comentó que no existe una reglamentación o normativa específica enfocada a la construcción del hábitat dentro de la Reserva de la Biósfera de la Sierra Gorda de Querétaro: "... la construcción de viviendas unifamiliares es muy libre de acuerdo al criterio de sus propietarios", sin embargo, afirma que algunos habitantes de la población de la reserva acuden a las instalaciones de la CONANP para ser asesorados en la construcción de su vivienda.

Existe también el Grupo Ecológico Sierra Gorda, que es un movimiento de índole social que lleva más de 31 años operando, tiene como misión la conservación de la riqueza natural al buscar que se generen oportunidades de desarrollo para los dueños de la tierra y busca permear este aprendizaje en otras áreas de México mediante la unificación de esfuerzos entre los ciudadanos y las instituciones ya sean de carácter nacional o internacional. Se encuentra dirigido por Marta Ruíz Corzo y se observa de acuerdo con su misión que busca reactivar la economía de conservación de los recursos naturales, organizando, capacitando y guiando grupos comunitarios a la adopción de mejores prácticas y el fortalecimiento del emprendimiento social [33].

Algunas Normas Oficiales Mexicanas extraídas del Programa de Manejo de la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán respecto a las actividades reguladas dentro del polígono de la reserva son [34]:

Nom-015-Semarnat/Sagarpa-2007. Métodos de uso del fuego en los terrenos forestales y

en los terrenos de uso agropecuario.

Nom-062-Semarnat-1994. Mitigar los efectos adversos sobre la biodiversidad, ocasionados por el cambio de uso del suelo de terrenos forestales a agropecuarios.

Nom-08-Tur-2002. Establece los elementos a que deben sujetarse los guías generales y especializados en temas o localidades específicas de carácter cultural.

Nom-083-Semarnat-2003. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

Nom-060-Semarnat-1994. Especificaciones para mitigar los efectos adversos ocasionados en los suelos y cuerpos de agua por el aprovechamiento forestal.

En lo expuesto como instrumentos de regulación sobre las reservas de la biósfera se observa que todos se enfocan principalmente en la conservación y preservación de la biodiversidad, manejo racional de los recursos naturales y la forma del desarrollo sostenible de actividades por parte de los habitantes de las comunidades de la reserva de la biósfera, sin embargo, se deja de lado la regulación de la construcción de viviendas como un elemento importante dentro de la Reserva.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El conjunto de normas y reglamentos que rigen la construcción del hábitat dentro del entorno urbano, se centran en la infraestructura, la vivienda, el desarrollo y el diseño de la ciudad. Dentro de estas normativas no se toma en cuenta al medio ambiente y a la biodiversidad, sólo se encontró como instrumento principal la Ley General de Equilibrio



Ecológico y Protección al Medio Ambiente como elemento regulador de este sector (véase Figura 3).



Figura 3. Instrumentos para la regulación de la construcción del hábitat en el ámbito urbano.
Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la normativa para la construcción del hábitat para las Reservas de la Biósfera, se observa que la mayoría de los instrumentos de regulación existentes se encuentran centrados en la conservación de la biodiversidad y el medio ambiente, sin considerar el hábitat para los asentamientos humanos (véase Figura 4).

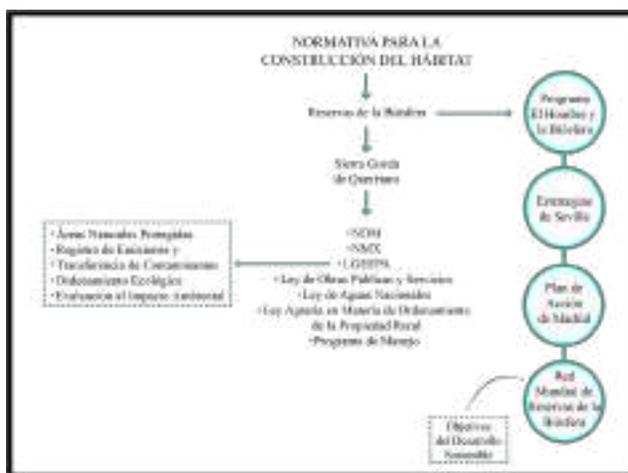


Figura 4. Instrumentos para la regulación de la construcción del hábitat en la reserva de la biósfera.
Fuente: elaboración propia.

La normativa para la construcción en el ámbito urbano se centra en los asentamientos humanos sin tomar en cuenta el aspecto de la biodiversidad y de la conservación del medio ambiente. En los instrumentos de regulación para las Reservas de la Biósfera sólo se toman en cuenta los aspectos del medio ambiente sin considerar la interacción con los humanos. Las normativas para ambos ámbitos se pueden encontrar en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), Normas Mexicanas (NMX) y la Ley General de Equilibrio Ecológico de la Protección al Ambiente, sin embargo, ninguna las conjunta (véase Figura 5).

Al considerar los aspectos anteriores no se observa un equilibrio entre la normativa para la construcción del hábitat en los asentamientos humanos y la biodiversidad y el medio ambiente. Estas separaciones entre las normativas causan el desequilibrio en el ámbito urbano y las Reservas de la Biósfera. La Reserva de la Biósfera de la Sierra Gorda de Querétaro ha presentado un desequilibrio entre la relación de los asentamientos humanos, el medio ambiente y la biodiversidad a causa de la falta de normativa que regule la construcción del hábitat dentro de las reservas, ya que como objetivos principales las reservas de la biósfera buscan conservar y preservar la biodiversidad, el manejo adecuado de los recursos naturales, así como la aplicación de estrategias de sostenibilidad para tener un ecosistema más autosuficiente donde los asentamientos humanos vivan en un estado de tranquilidad y paz para con el medio ambiente. Así mismo, ellos ser como parte de esas áreas quienes con apoyo del gobierno promuevan la conservación y la participación entre la comunidad y de igual manera la difusión hacia las nuevas generaciones de cómo conservar y preservar el hábitat que ellos heredaran.



Figura 5. Esquema comparativo de los instrumentos de regulación de la construcción en el ámbito urbano y las reservas de la biósfera.

Fuente: Elaboración propia

Una primera aproximación que se plantea a la regulación de la construcción del hábitat de los asentamientos humanos es, con base en las ya existentes, detectar los materiales regionales que se encuentran en el contexto donde se ubica la Reserva y determinar las potencialidades de cada uno, así también como las desventajas de los mismo, al promover así el uso racional de esos recursos naturales para la construcción del hábitat. De la misma manera, retomar las características de los sistemas constructivos adaptados a los materiales regionales existentes en el contexto de la Reserva y generar una planeación de la vivienda de acuerdo con las necesidades de los habitantes para así comenzar con el diseño de la misma.

Por ejemplo, las cabañas construidas para el ecoturismo en los diferentes destinos, que se encuentran dentro de la Sierra Gorda, emplean sistemas constructivos con el uso de materiales regionales tales como barro, palma, pacas de paja, madera, piedra. Así mismo utilizan sistemas de captación de agua y baño seco, con lo cual se busca que cada construcción sea autosuficiente [35]. Esto podría servir de base para el planteamiento y búsqueda de los sistemas constructivos que puedan usarse en las diferentes comunidades dentro de la reserva de la biósfera.

Es importante también que en el proceso de planeación de la vivienda se haga

un análisis del sitio donde se planea el emplazamiento para determinar las ventajas y desventajas del mismo y su viabilidad para la construcción, sin alterar o destruir el ecosistema que se encuentra en el momento. El conocer las características climáticas del entorno dará pie a la generación de estrategias que propicien la planeación y construcción de la vivienda adaptada al entorno y que ayuden a reducir los gastos energéticos, a aprovechar agua y a elegir correctamente el sistema constructivo, evitando así la alteración del equilibrio con el entorno.

Por ello, se plantea adaptar algunos artículos o apartados de la Ley de Vivienda y Códigos de Edificación a las características necesarias para la construcción de la vivienda en las Reservas, considerando la autoconstrucción y la autoproducción de la misma. También aprovechar las características, apartados o elementos de evaluación que las certificaciones poseen para de igual manera adaptarlos a las condiciones de las Reservas de la Biósfera para la construcción del hábitat de los asentamientos humanos, tal es el caso de la certificación del Edificio Vivo o Living Building Challenge, la Norma Mexicana NMX-AA-164-SCFI-2013, el Programa de Certificación de Edificaciones Sustentables y los Objetivos del Milenio.

Esta adaptación y recopilación de instrumentos de regulación rescatado de las normativas y certificaciones para la edificación podrían presentarse en un apartado del Programa de Manejo que existe para las Reservas de la Biósfera, específicamente a la construcción de vivienda, donde sería interesante presentar algunas variantes de viviendas contextualizadas a las Reservas, de acuerdo con sus características.

Para el funcionamiento de estas aproximaciones es importante la participación de los habitantes de las comunidades en conjunto con las autoridades gubernamentales y las instituciones que se dedican a cuidar y preservar



las reservas de la biósfera como lo son la CONANP y el Grupo ecológico sierra gorda.

Se realizó un primer acercamiento a la CONANP para plantear la necesidad de regular la construcción del hábitat de los asentamientos humanos en las reservas de la biósfera sobre las que se están desarrollando estrategias como parte de la investigación Modelo regenerativo de vivienda rural. Esta será presentada al director de la CONANP para debatir acerca de la viabilidad de las estrategias propuestas. También se busca trabajar con el Grupo ecológico sierra gorda en un primer acercamiento a las estrategias propuestas para la construcción del hábitat de los asentamientos humanos para generar una retroalimentación y mejora de las mismas.

CONCLUSIONES

Es importante saber que existen reglamentos y normas que nos permitan saber hasta donde uno como hombre y/o parte de un asentamiento humano puede intervenir en la Reserva de la Biosfera, sin llegar a causar un grave daño ecológico. Es desalentador saber cómo los hombres sin conocimiento alguno sobre el ecosistema, los hábitats y las áreas naturales protegidas estén acabando de forma irracional con ellas al talar árboles de manera irracional, explotar los recursos de forma inadecuada y generar la extinción de especies, entre otros.

Las Reservas de la Biósfera aumenta la calidad dentro de una región, lo cual refuerza la identidad y autoconfianza de la comunidad en la cual se encuentra, siendo un lugar atractivo para los turistas que muestran el interés en este tipo de lugares [26].

La vivienda es un elemento relevante dentro del contexto donde se desenvuelve el ser humano, porque es ahí donde el hombre se desarrolla y relaciona con los de su especie, no es solamente un elemento material, sino

que incluye el aspecto cognitivo, afectivo y social, a través de los cuales se busca una interrelación para generar una armonía en la vivienda misma.

El plantear una normatividad, que ayude a regular el equilibrio dentro de la reserva de la biosfera con base inicialmente en los sistemas constructivos y en el aprovechamiento de los recursos naturales existentes en el entorno explotados de manera racional, generará una mayor conciencia y reforzará el equilibrio entre el ser humano y la reserva de la biósfera.

La participación de los habitantes de la comunidad es vital, así como el interés del gobierno, ya que deben sentirse identificados como parte de la reserva para tener la disposición de formar parte del equipo buscando mejorar el equilibrio entre ellos y su medio ambiente.

Resulta interesante que la vivienda insertada en el contexto de las reservas de la biósfera no genere un impacto negativo en ella, como parte de ese equilibrio que se debe mantener entre el hombre y su contexto.

El trabajo en equipo con instituciones que se encarguen de la conservación y preservación de las Reservas de la Biósfera ayuda a que las estrategias que se plantean resulten más enriquecedoras, buscando también el acercamiento a las comunidades mediante talleres participativos en los cuales se pueda escuchar la opinión de ellos y se den ideas para obtener soluciones más acertadas al mejoramiento del equilibrio entre el hombre y su medio ambiente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo durante todo el proyecto de investigación al presentar el presente artículo como resultados de esta investigación. También se agradece

al director de la CONANP de Jalpan Miguel Ángel Cuellar Colín por la entrevista otorgada como parte esta investigación. Y no menos importante agradecer a la Universidad Autónoma de Querétaro por las instalaciones y el espacio prestado para el desarrollo del artículo.

REFERENCIAS

- [1] ACCIONA. (2019) ¿Qué es desarrollo sostenible? en SOSTENIBILIDAD PARA TODOS. [En línea]. Disponible en: <https://www.accionacom.com/es/desarrollo-sostenible/>
- [2] ACCIONA. (2019) ¿Qué es la sostenibilidad? en SOSTENIBILIDAD PARA TODOS. [En línea]. Disponible en: <https://www.sostenibilidad.com/desarrollo-sostenible/que-es-la-sostenibilidad/>
- [3] R. Schliep, S. Stoll-Kleemann. Assessing governance of biosphere reserves in Central Europe, ELSEVIER., vol. 27, pp. 917-927, Jul. 2010.
- [4] A. Enshassi, B. Kochendoerfer y E. Rizq. Evaluación de los impactos medioambientales de los proyectos de construcción, Rev. Ing. Constr., vol. 29, no.3, pp. 234-254. Dic. 2014.
- [5] UNESCO (2017). Reservas de la Biósfera. [En línea]. Disponible en: <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/ecological-sciences/biosphere-reserves/>
- [6] Borsdorf A. y Araya Rosas P. El modelo de Reservas de la Biosfera: conceptos, características e importancia, En: A. Moreira-Munoz y A Borsdorf (eds). Reserva de la Biósfera de Chile: Laboratorios para la Sustentabilidad. Academia de Ciencias Austriaca, Pontificia Universidad Católica de Chile, Instituto de Geografía, Santiago, serie: Geolibros, vol. 17, pp. 4-20, 2014.
- [7] L. Durand y J. Jimenez. Sobre áreas naturales protegidas y la construcción de no-lugares. Notas para México. Revista Lider, vol. 16 (12), pp. 59-72, 2010.
- [8] E. H. Nagasako. "La importancia de la regulación para la competitividad". En Construyendo la edificación sustentable, Ene. 2015. [En línea]. Disponible en: http://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Conferencias/Edificacion_Sustentable/Modulo_1/02_Evangelina_Hirata.pdf
- [9] C. Caballero y T. V. Manual de normatividad y reglamentos para el proyecto ejecutivo. [En línea]. Ago. 2016. Disponible en: <https://sites.google.com/site/arquitectura-normasregla/manual-de-normatividad-y-reglamentos-para-el-proyecto-ejecutivo>
- [10] ONNCCE, S.C. Cumplimiento de las Normas Mexicanas y Normas Oficiales Mexicanas en el sector vivienda. Ley de Vivienda. Vol. 12(170), pp. 1-8, Jul. 2017.
- [11] vLex. (2018). Normas Mexicanas (NMX), materiales de construcción en Información Jurídica Inteligente. [En línea]. Disponible en: <https://vlex.com.mx/source/normas-mexicanas-nmx-6404/c/Materiales-de-Construccion>
- [12] NOM. (2015). Así se presentan las Normas Oficiales Mexicanas. [En línea]. Disponible en: <http://nom-mx.com.mx/article/asi-se-presentan-las-normas-oficiales-mexicanas>
- [13] R. B. Ruíz (2018). Normas técnicas complementarias en INSTITUTO PARA LA SEGURIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES EN EL D.F. [En línea]. Disponible en: http://www11.df.gob.mx/virtual/joomla_segcons/index.php/normas-tecnicas-complementarias
- [14] (2016) Gobierno de México. [En línea]. Disponible en: <http://www.gob.mx/sedatu/prensa/publica-dof-ley-general-de-asentamientos-humanos-ordenamiento-territorial-y-desarrollo-urbano>
- [15] R. H. Jiménez (2017). Análisis preliminar de la Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano en SEDUV. [En línea]. Disponible en: <http://seduv.edomexico.gob.mx/docs/metro/leyasentamientos.pdf>
- [16] (2018) SEDUYM, Secretaría de Desarrollo Urbano y Metropolitano. Plan Nacional



de Desarrollo Urbano. [En línea]. Disponible en: http://seduym.edomex.gob.mx/plan_estatal_de_desarrollo_urbano

[17] CONAVI, Comisión Nacional de Vivienda. (2010). Código de Edificación de Vivienda en Gobierno de México. [En línea]. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/85460/Codigo_de_Edificacion_de_Vivienda.pdf

[18] Barrio D. (2017). Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Observatorio del principio 10 en América Latina y el Caribe. [En línea]. Disponible en: <https://observatoriop10.cepal.org/es/instrumentos/ley-general-equilibrio-ecologico-proteccion-al-ambiente>

[19] (2008) SEDEMA, Secretaría del Medio Ambiente. Programa de Certificación de Edificios Sustentables en Gaceta Oficial del Distrito Federal. [En línea]. Disponible en: <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/tramites-servicios/auditoria-autoregulacion-ambiental/edificaciones-sustentables/programa-certificacion-edificaciones-sustentables.pdf>

[20] (2019) LEED, Leadership in Energy and Environmental Design. [En línea]. Disponible en: <http://leed.usgbc.org/leed.html>

[21] (2019) EDGE, Excellence in Design for Greater Efficiencies. [En línea]. Disponible en: <https://www.edgebuildings.com/?lang=es>

[22] SEGOB, Secretaría de Gobernación. (2013). Norma Mexicana NMX-AA-164-SCFI-2013 en Diario Oficial de la Federación [En línea]. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5312875&fecha=04/09/2013

[23] CIDS, Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible. (2019). Sistema de evaluación de la vivienda verde (SISEVI-VE-ECOCASA) en Infonavit. [En línea]. Disponible en: <http://cii.infonavit.org.mx/IndicadoresdeCalidad/sevv.html>

[24] CONAVI, Comisión Nacional de Vivienda. (2019). NAMA apoyada para la vi-

vienda sustentable en México, acciones de mitigación y paquetes financieros en CONAVI. [En línea]. Disponible en: <https://www.conavi.gob.mx/gobmx/viviendasustentable/>

[25] I. I. L. Future. (2019). Desafío del edificio vivo 4.0. [En línea]. Disponible en: <https://living-future.org/>

[26] UNESCO, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2010). Red Mundial de Reservas de la Biósfera: lugares de desarrollo sostenible, 2010, en UNESDOC, Biblioteca Digital. [En línea]. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000207051>

[27] SEMARNAP, Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (1999). Programa de manejo Reserva de la Biósfera, Sierra Gorda. (Primera). Disponible en: <http://www.paot.org.mx/centro/ine-semarnat/anp/AN15.pdf>

[28] March, I. J., M. A. Carvajal, R. M. Vidal, J. E. San Román, G. Ruiz. Planeación y desarrollo de estrategias para la conservación de la biodiversidad. Capital Natural de México, pp. 545-573, 2009.

[29] Bezaury-Creel, J., D. Gutiérrez Carbonell. Áreas naturales protegidas y desarrollo social en México. Capital Natural de México, pp. 385-431, 2009.

[30] Unidad de Participación Social, Enlace y Comunicación, INE. (2000). Programa de Manejo Reserva de la Biósfera Sierra Gorda (Primera). Disponible en: <http://www.paot.org.mx/centro/ine-semarnat/anp/AN15.pdf>

[31] CONANP, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2019). Mapa Sierra Gorda en CONANP. [En línea]. Disponible en: <http://sierragorda.conanp.gob.mx/docs/mapasgorda>

[32] (2019) Sierra Gorda Reserva de la Biósfera. [En línea]. Disponible en: <https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=108®=7>

[33] (2019) Grupo Ecológico sierra Gorda. [En línea]. Disponible en: <https://sierragorda.net/acerca-de/>

[34] SEMARNAT, CONANP. (Enero 2013). Programa de Manejo de la Reserva de la Biósfera, Tehuacán.Cuicatlán. [En línea]. Disponible en: http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/tehuacan_2013.pdf.

[35] (2019) Sierra Gorda, Ecotours. [En línea]. Disponible en: <https://sierragordaecotours.com/>

VARIABILIDAD DE LA ENERGÍA DE OLA POR MEDIO DEL ESPECTRO DE PIERSON-MOSKOWITZ PARA EL ANÁLISIS DE PLATAFORMAS MARINAS

Wave energy variability based on the Pierson-Moskowitz spectrum for offshore platform analysis

Iván Fermín Arjona Catzim^{1*}, Jaime Moisés Horta Rangel¹,
Guadalupe Moisés Arroyo Contreras¹, Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández¹,
Carlos Alberto Pedro Rivas Nieto¹, Emmanuel Valencia Jiménez¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro

*Autor de correspondencia:
ivan.arjona90@gmail.com

RESUMEN

A diferencia de las estructuras en tierra firme, una plataforma marina se encuentra expuesta a condiciones climáticas extremas, debido principalmente a los vientos intensos y el oleaje que estos generan. El presente trabajo forma parte de un proyecto de investigación que pretende conocer los efectos dinámicos simultáneos causados por las condiciones mencionadas anteriormente sobre una plataforma tipo Jacket. Se analizaron las variaciones de la intensidad del viento a lo largo del tiempo al considerar dos alturas de referencia respecto al nivel medio del mar (msnmm), así como sus efectos sobre la densidad de energía de una ola, obtenidas a través del espectro de Pierson-Moskowitz. Por lo anterior, fueron planteados dos casos de estudio: el primero (Caso A) considera las acciones del viento a una altura de 10.00 msnmm, mientras que el segundo (Caso B) se establece a 19.50 msnmm. La ventana de tiempo se determinó entre 1 y 3600 segundos, conforme a las recomendaciones del American Petroleum Institute (API 2A - WSD), y en concordancia con la ecuación establecida por estos para perfiles de vientos y ráfagas. Las velocidades iniciales del viento son las proporcionadas por Petróleos Mexicanos (PEMEX) para tormentas de invierno y huracanes, en las NRF-003-PEMEX-2007 para una profundidad media de 66.10 m. Los resultados sugieren que existe una diferencia importante en la energía contenida en la ola del Caso A con respecto al Caso B, teniendo diferencias de un 20% aproximadamente. Asimismo, se observó una variación significativa entre las frecuencias pico obtenidas en ambos casos, principalmente en los segundos finales.

Palabras clave: estructura costa afuera, Plataforma Jacket, perfil de viento, espectro de Ola, Pierson-Moskowitz

ABSTRACT

Unlike inland structures, an offshore platform is a structure exposed to extreme weather conditions, mainly due to the strong winds and the waves they generate. This work is part of a research project that aims to know the simultaneous dynamic effects caused by the conditions mentioned above on a jacket platform. In it, the variations in wind intensity over time were analyzed considering two reference heights with respect to mean sea level (MSL), as well as the effects they have on the energy density of a wave, obtained through the Pierson-Moskowitz spectrum. The first case (Case A) considers the effects of wind at a height of 10.00 m MSL, while the second (Case B) is set at 19.50 m MSL. The time window was established between 1s and 3600s according to the recommendations of the American Petroleum Institute (API 2A-WSD) and in accordance with the equation established by them for wind and gust profiles. The initial wind speeds are those provided by Petróleos Mexicanos (PEMEX) for winter storms and hurricanes, in NRF-003-PEMEX-2007 for an average depth of 66.10 m. The results suggest that there is an important difference in the energy contained in the wave in Case A with respect to Case B, with differences of approximately 20%. A significant variation was also observed between the peak frequencies obtained in both cases, mainly in the final seconds.

Keywords: offshore structure, Jacket platform, wind profile, wave spectrum, Pierson-Moskowitz

INTRODUCCIÓN

Una plataforma marina o costa afuera es toda aquella que se encuentra sin conexión permanente a tierra firme y que, por el he-



cho de estar ubicadas en un ambiente oceánico, se expone a condiciones ambientales extremas. Aunque están destinadas principalmente a la exploración y producción de hidrocarburos, su uso no es limitativo, al tener aplicaciones militares, de comunicación y, recientemente, en el campo de la generación de energía. Por otra parte, estas estructuras deben ser concebidas de tal forma que puedan ser construidas en tierra para posteriormente ser transportadas e instaladas en su lugar de operación [1].

De forma general, las cargas a las que está expuesta una plataforma marina se pueden dividir en: cargas muertas, cargas vivas, de construcción e instalación, de operación, térmicas, sísmicas, accidentales (por impacto de embarcaciones) y ambientales. En esta última destacan las cargas por viento, por oleaje y corrientes submarinas. Cabe mencionar que, debido a la naturaleza de su ubicación, es necesario considerar de forma adicional los efectos de empuje vertical y amortiguamiento ejercidos por el mar sobre la estructura sumergida [2].

En lo que refiere al viento, éste juega un papel importante en el estudio de plataformas costa afuera. Por un lado, el considerar u omitir sus acciones en el análisis estructural puede hacer variar los desplazamientos totales en un 10% aproximadamente, por el otro, las fuerzas del oleaje que inciden sobre la subestructura de la plataforma tienen una relación directa con el viento que las genera, por lo que, al aumentar su velocidad se espera un aumento en las cargas por oleaje [3].

El presente artículo de investigación tiene como objetivo determinar la influencia del tiempo en la intensidad de la velocidad del viento al considerar dos alturas convencionales de referencia (10.00 m y 19.50 m) con respecto al nivel medio del mar, así como al conocer la influencia que generan estos cambios en la velocidad sobre la densidad de energía de una ola, calculada por medio

del espectro de Pierson-Moskowitz y relacionada con la transmisión de fuerzas a la estructura. Por tal motivo, tanto los valores de tiempo utilizados como la ecuación para "Perfiles de viento y ráfagas" se tomaron siguiendo las recomendaciones del American Petroleum Institute en [4].

MARCO TEÓRICO

Descripción del problema

Como se mencionó anteriormente, por su ubicación, las plataformas marinas se encuentran expuestas a situaciones extremas causadas principalmente por el ambiente marino. Si bien los métodos de análisis tradicionales se enfocan en resolver el problema en forma estática y desacoplada, es decir, analizando los efectos que actúan en la subestructura de forma independiente a los de la superestructura, en la realidad no es así, ya que el viento y el oleaje tienen una fuerte dependencia.

Por tales motivos, se ha planteado un proyecto de investigación enfocado en analizar de forma dinámica el comportamiento de una plataforma metálica costa afuera tipo Jacket, al tener en cuenta las acciones simultáneas del viento y el mar sobre toda la estructura (véase Figura 1). Se propone su ubicación en una de las zonas de interés de PEMEX denominada Activo de Explotación Litoral de Tabasco y delimitada por las coordenadas N 19°, W 93°30', N 18°26' y W 92°, a una profundidad promedio de 66.10 m con respecto al nivel medio del mar. Con base en esta información, es posible establecer parámetros iniciales indispensables para el estudio de estructuras en ambientes marinos como son: altura de ola, velocidad máxima promedio del viento a 10 msnmm, en una hora, marea de tormentas, velocidad de corriente, marea astronómica y periodo de ola [5].

Cabe mencionar que los efectos del viento y el mar no son constantes a lo largo del tiempo, por lo tanto, sería necesario el uso de mediciones in situ que nos permitan conocer el comportamiento real de dichos fenómenos, no obstante, en muchas ocasiones esta información no se encuentra disponible. Por otra parte, es posible realizar aproximaciones relativamente aceptables a través de ecuaciones basadas en modelos estadísticos, sin embargo, pueden llegar a ser muy sensibles a los datos de entrada [6]. Con base en lo anterior se plantea el presente artículo, con el objetivo de conocer la influencia de dichas variaciones en el tiempo sobre la magnitud de la velocidad del viento y, subsecuentemente, en la frecuencia fundamental de una ola.

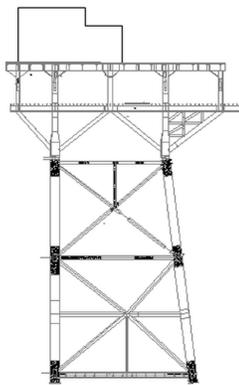


Figura 1. Vista lateral plataforma tipo Jacket propuesta para la investigación.
Fuente: Elaboración propia.

Velocidad y cargas de viento

En principio, las cargas de viento para estructuras costa afuera pueden ser estimadas a partir de los modelos de tierra firme, con la particularidad de que la rugosidad en mar abierto es menor a la presente en tierra, dando como resultado una variación más lenta en el perfil de viento como se puede ver en la Figura 2 [7]. Adicionalmente, se ha

encontrado que, para cualquier localización, la velocidad del viento fluctúa tanto en intensidad como en forma a través del tiempo. Por tal motivo, el periodo de tiempo a elegir para cada estudio debe considerar el tiempo mínimo que tarda en reaccionar la estructura, el cual dependerá a su vez de su forma y tamaño [8].

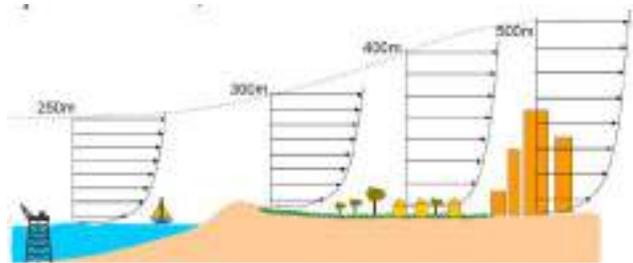


Figura 2. Perfiles de viento para diferentes rugosidades del terreno. En la imagen se puede observar que para una misma velocidad del viento son necesarias diferentes alturas dependiendo de la rugosidad [7].

Para el caso de una plataforma marina, se considera que las fuerzas del viento actúan directamente sobre la porción de la subestructura que se encuentra fuera del mar, así como en la totalidad de la subestructura y sus componentes. La velocidad del viento puede clasificarse en: i) ráfagas con duración promedio menor a un minuto y ii) vientos sostenidos con duración mayor a un minuto. Al tener en cuenta lo anterior, el API nos proporciona una serie de ecuaciones con las cuales podemos ajustar la velocidad del viento para cualquier elevación o duración, que se muestra en las Ecuaciones 1-4 [4].

$$u(z, t) = U(z) \times [1 - 0.41 \times Iu(z) \times \ln(\frac{t}{t_0})] \quad (1)$$

$$U(z) = U_0 \times [1 + C \times \ln(\frac{z}{32.8})] \quad (2)$$

$$C = 5.73 \times 10^{-2} \times (1 + 0.0457 \times U_0)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$Iu(z) = 0.06 \times [1 + 0.0131 \times U_0] \times (\frac{z}{32.8})^{-0.22} \quad (4)$$



Donde $u(z,t)$ es la velocidad de diseño del viento a una altura z (ft) sobre el nivel medio del mar correspondiente a un periodo promedio de tiempo t (s) y que varía de $t=1$ hasta $t_0=3600$ segundos, $U(z)$ (ft/s) es la velocidad promedio del viento a una hora a la altura z (ft) elegida, C es un factor adimensional, $I(z)$ corresponde a la intensidad de la turbulencia a la altura z (ft) seleccionada y U_0 (ft/s) es la velocidad promedio del viento en una hora a 32.8 ft con respecto al nivel del mar. La selección del periodo de tiempo puede basarse en las recomendaciones dadas por API, que se muestran en la Tabla 1 [4].

Tabla 1. Recomendaciones para la selección del periodo de tiempo t (s) [4].

Tiempo (s)	Recomendación
3	Apropiado para determinar las cargas estáticas máximas en elementos pequeños.
5	Adecuado para calcular las cargas totales en elementos cuya máxima dimensión horizontal es menor a 50m.
15	Adecuado para calcular las cargas estáticas totales en elementos cuya máxima dimensión horizontal es mayor a 50m.
60	Apropiado para determinar las cargas estáticas máximas por viento en la superestructura, asociadas a las fuerzas máximas de oleaje en estructuras con respuestas dinámicas a la excitación del viento pero que no requieren un análisis dinámico completo.
3600	Recomendada para obtener las cargas máximas estáticas asociadas a las fuerzas máximas de oleaje en estructuras con respuesta dinámica al viento despreciable.

Descripción espectral de una ola

Al igual que con el viento, en la realidad no existen olas con igual periodo y amplitud a lo largo del tiempo. En un tren de olas se presentan diferentes alturas, frecuencias y perfiles que varían según la dirección que tomen a

partir de la zona de generación, así como por los fenómenos de refracción, debido principalmente al cambio de profundidades en el fondo marino, o de reflexión, definida como el rebote parcial o total de la energía de ola al incidir en un obstáculo [9]. Por lo anterior, se han desarrollado diferentes teorías que tratan de representar de forma cada vez más precisa el comportamiento de las partículas de agua de una ola a partir de suposiciones que facilitan la aproximación a las condiciones antes mencionadas (véase Apéndice) [10].

Por otro lado, es posible obtener una descripción espectral del comportamiento estocástico del mar, ya que se ha encontrado una relación entre éste y la frecuencia de la ola f (Hz) [7]. Un espectro se puede definir como una expresión gráfica de un registro de valores máximos de un fenómeno. De este modo, es posible plantear el Espectro de Energía de Oleaje como la suma de ondas senoidales con diferentes frecuencias. Es importante mencionar que la mayoría de estos modelos contemplan condiciones de mar totalmente desarrolladas, es decir, que abarcan teóricamente la totalidad de los periodos dentro de un intervalo $(0, \infty)$ [11]. Entre los diferentes espectros de oleaje podemos mencionar el Espectro de Pierson-Moskowitz y el de la Joint North Sea Wave Project (JONSWAP, por sus siglas en inglés), sin embargo, este último está calibrado para el Mar del Norte, por lo que el primero es el más adecuado para las condiciones planteadas en este proyecto de investigación. El Espectro de Pierson-Moskowitz tiene la particularidad de estar calibrado para velocidades del viento a 19.50 m, $U_{19.5}$ (m/s), y se describe por medio de la Ecuación 5 [12].

$$S(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp \left[\frac{-5}{4} \left(\frac{f_{PM}}{f} \right)^4 \right] \quad (5)$$

Donde $S(f)$ (m^2s) es el espectro de energía de ola para diferentes frecuencias f (Hz), g (m/s^2) es la aceleración de la gravedad y se considera

como $g=9.81 \text{ m/s}^2$, α es una constante adimensional obtenida a partir de la Ecuación 6 [2], y f_{PM} (Hz) es la frecuencia pico de Pierson-Moskowitz y está definida por Ecuación 7 [13].

$$\alpha = 4\pi^3 \left(\frac{H_s}{gT_0^2} \right)^2 \quad (6)$$

$$f_{PM} = \frac{0.137g}{U_{19.5}} \quad (7)$$

Donde H_s (m) es la altura de ola significativa y T_0 (s) es el periodo promedio de la ola, sin embargo, es aceptado de forma convencional un valor de $\alpha=8.1 \times 10^{-3}$ [7]. Adicionalmente, para determinar las fuerzas que actúan sobre un elemento estructural expuesto a las acciones de una ola, es necesario establecer la varianza total del espectro de oleaje (EPM), la cual es equivalente al área bajo la curva y se expresa por medio de la Ecuación 8 [12].

$$E_{PM} = \frac{\alpha g^2}{5(2\pi f_{PM})^4} \quad (8)$$

Donde g (m/s) y f_{PM} (Hz) representan las mismas variables que en las ecuaciones anteriores. Cabe mencionar que, la importancia de calcular adecuadamente la frecuencia pico del espectro recae en que nos permite conocer en primera instancia si nuestra estructura corre riesgo de entrar en resonancia, al coincidir la frecuencia fundamental de ésta con la de la ola.

MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se describe el procedimiento seguido para cumplir con el objetivo planteado en el presente trabajo, al partir de obtener los perfiles de viento y ráfagas para posteriormente determinar las frecuencias

pico asociadas a dichas velocidades. Finalmente se establece la variación en la densidad de energía de ola para cada uno de los tiempos recomendados por el API [4].

Determinación de perfiles de viento y ráfagas

Inicialmente se plantearon dos casos de estudio denominados Caso A, asociado a una altura de referencia $z=10.00$ msnmm, y Caso B, en el cual se considera un valor de $z=19.50$ msnmm. Dichas elevaciones fueron seleccionadas por ser los valores a los que están calibrados los modelos matemáticos utilizados para el estudio del comportamiento del viento y el mar. Como se mencionó anteriormente, es posible obtener la velocidad del viento a cualquier altura y tiempo a partir de otra velocidad de referencia, por medio de las Ecuaciones 1-4. Con estas consideraciones, se generaron los perfiles de viento correspondientes a los casos de estudio, partiendo de los valores de entrada para tormentas de invierno y huracanes proporcionados en [5] para la zona de interés definida anteriormente, a una profundidad promedio de 66.10 m que fue medida mediante el nivel de aguas tranquilas (véase Tabla 2).

Tabla 2. Parámetros iniciales para el diseño de una plataforma ubicada en el Activo Zona Litoral de Tabasco [5].

Parámetro	Valor recomendado
Velocidad del viento a 10m U_0 (m/s)	32.17
Altura máxima de la ola H_{Max} (m)	17.20
Periodo de la ola T (s)	12.18

A partir de dichos datos se evaluaron los perfiles correspondientes a los dos casos de estudio en un periodo comprendido entre $1 \leq t$ (s) ≤ 3600 . Lo anterior con la intención de tener un panorama completo de lo que ocurre



con la velocidad del viento desde que es generado hasta transcurrir una hora y, de esta forma, establecer un criterio claro para la selección adecuada del periodo de tiempo promedio a utilizar en posteriores trabajos.

Frecuencia pico y espectro de Pierson-Moskowitz

Una vez conocidos los perfiles de viento para los dos casos planteados, se procedió a conocer el comportamiento de las frecuencias pico relacionadas a la velocidad del viento a cada instante de tiempo. Cabe mencionar que el valor de la velocidad del viento en la Ecuación 7 se establece para $z=19.50$ m, sin embargo, se evaluó también para $z=10.00$ m, con la finalidad de establecer las diferencias que se presentan al utilizar una altura de referencia diferente.

Finalmente, se calcularon los espectros de Pierson-Moskowitz al tener en cuenta las frecuencias pico correspondientes a los valores de $t(s)=3, 5, 15, 60$ y 3600 , tanto para el Caso A como para el Caso B. Lo anterior se llevó a cabo con la intención de determinar la variación que puede existir en la densidad de la energía de ola, asociada a la selección de un adecuado periodo de tiempo, así como la altura a la cual se mide. Ya que lo anterior repercutiría directamente sobre la transmisión de cargas de la ola a la estructura, al formar parte de las variables involucradas en las ecuaciones de transferencia de fuerzas del oleaje.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos siguiendo la metodología planteada en los apartados anteriores. En la Figura 3 se pueden encontrar los perfiles de viento para los Casos A y B, con respecto a $t(s)$. En ella se observa que existe una dis-

minución en la velocidad del viento conforme va aumentando el tiempo, lo que es más notorio en el primer minuto, presentándose una diferencia de aproximadamente 15% con respecto a los valores en $t(s) = 1$. Dicho comportamiento se puede explicar gracias al término exponencial en las Ecuaciones 1 y 2. En la primera, implica que si el cociente $t/t_0 \leq 1s$ se generará un factor de amplificación sobre $U(z)$, mientras que, al superar dicho valor, el factor pasará a ser de reducción. Para la segunda, si $z(m)$ se encuentra más cerca al nivel del mar y por debajo de los 10 m, implicaría que la velocidad en ese punto sea menor a aquellas ubicadas a elevaciones $z(m)$ mayores a 10 m. Por otra parte, se observa que la diferencia entre la velocidad, en ambos casos, al considerar un mismo valor de tiempo, aumenta de un 5% para $t(s)=1$ hasta un 8% en $t(s)=3600$.

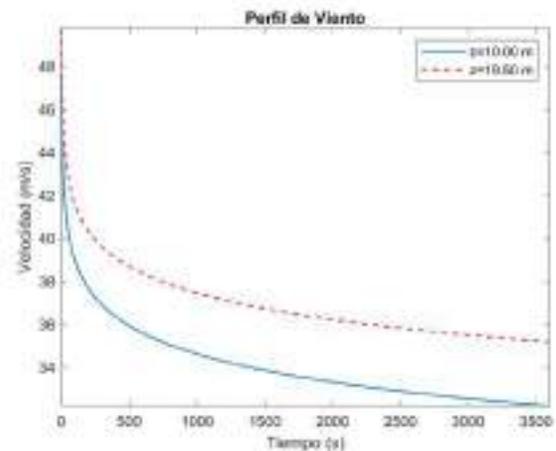


Figura 3. Perfiles de viento para valores de $z(m)$ constantes y valores de $t(s)$ variables, obtenidos por el autor.

Con respecto a la frecuencia pico, podemos observar que, conforme va aumentando el tiempo, también lo hacen los valores (véase Figura 4). Esto corresponde a los resultados obtenidos de los perfiles de viento, ya que las frecuencias son inversamente proporcionales a la velocidad. Dicho comportamiento

corresponde a lo esperado en la realidad, ya que, al aumentar la intensidad de la velocidad del viento, se espera una mayor excitación de las partículas de agua, lo cual se refleja en olas con mayor amplitud y de menor frecuencia. Adicionalmente, se puede mencionar el hecho de que, al igual que en los perfiles de viento, las variaciones entre los valores del Caso A y Caso B tienen un comportamiento exponencial, presentando diferencias de entre un 5% al inicio para llegar a un 8% en los segundos finales.

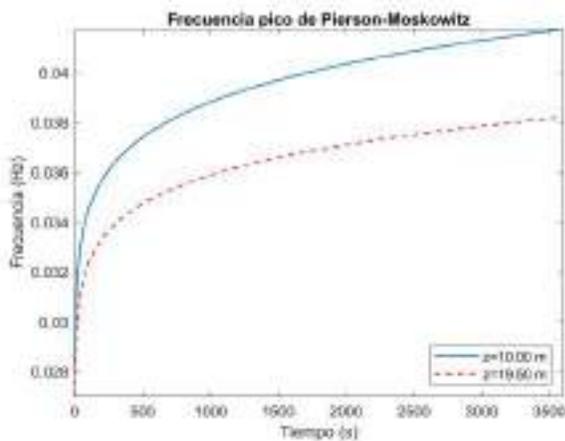
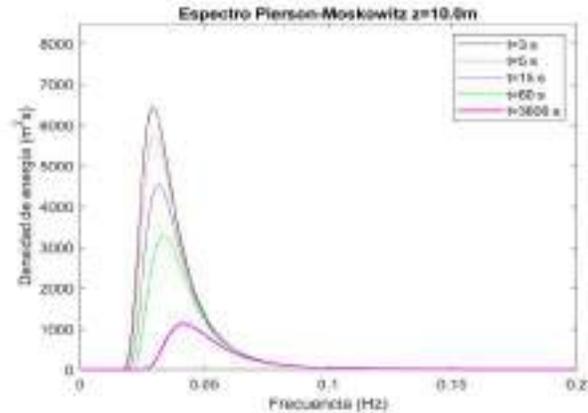


Figura 4. Frecuencia pico de Pierson-Moskowitz para velocidades asociadas a $z=10.00\text{m}$ y $z=19.50\text{m}$ y $t(\text{s})$ variable, obtenidas por el autor.

Por otra parte, los resultados obtenidos en la densidad de energía de la ola, reflejan una importante diferencia al variar tanto la duración del viento como la elevación de referencia (véase Figura 5). Con respecto al tiempo, podemos mencionar que existe una disminución en la densidad de energía máxima alcanzada en el espectro para cada una de las magnitudes de $t(\text{s})$ seleccionadas, llegando a valores máximos en los primeros segundos y disminuyendo su magnitud hasta cinco veces en los segundos finales. En cuanto a la altura de referencia, se puede observar que, para mismos valores de tiempo, las magnitudes del Caso A son sustancialmente ma-

yores, logrando alcanzar valores hasta 20% superiores.

a)



b)

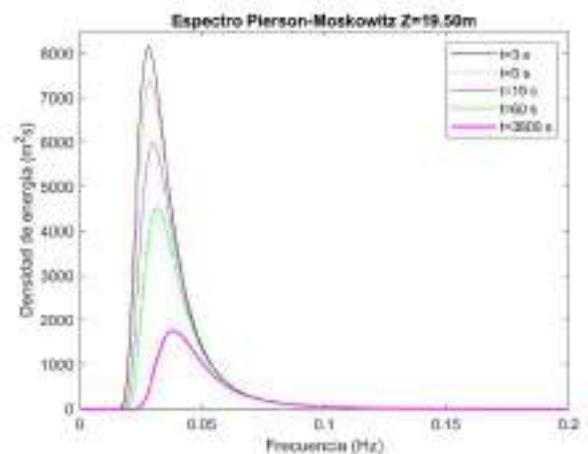


Figura 5. Espectros de Pierson-Moskowitz para velocidades asociadas a a) $z=10.00\text{ m}$ y b) $z=19.50\text{ m}$ a diferentes valores de $t(\text{s})$, obtenidas por el autor.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos es posible establecer una relación entre la densidad de energía de una ola y la velocidad del viento para diferentes periodos promedio tiempo. De forma general se puede decir que, debido a que para valores de $t(\text{s})$ iniciales, es decir, $t(\text{s})=3, 5$ y 15 , la densidad de energía es mayor que las presentes en $t(\text{s})=60$ y



3600. Es de suma importancia elegir un valor promedio de $t(s)$ adecuado para el elemento que estamos analizando, con mayor razón si se trata de estructuras sensibles a los efectos dinámicos del viento, como es el caso de las plataformas flotantes. Cabe mencionar la importancia que tiene la correcta selección de la altura de referencia, ya que como se observó en la Figura 5, aun considerando un mismo valor de tiempo, los valores obtenidos pueden variar significativamente, con una diferencia del 20% aproximadamente.

Con referencia a las frecuencias pico, se concluye que, al depender principalmente de la velocidad de viento, éstas tendrán un comportamiento asociado al que presente el perfil de viento utilizado para su obtención. Se encontró una diferencia de un 5% a un 8% entre los casos estudiados. Por otra parte, los valores máximos de las frecuencias, de 0.028 a 0.041 Hz, quedan fuera de las frecuencias esperadas para una plataforma tipo Jacket.

Finalmente, es necesario recalcar la sensibilidad de los modelos utilizados tanto para conocer los perfiles de viento como los espectros de oleaje, ya que, para variaciones relativamente pequeñas en el tiempo y por consiguiente la velocidad del viento, pueden obtenerse resultados con diferencias significativas.

APÉNDICE

Debido al comportamiento irregular del oleaje, se han desarrollado diversas teorías con el objetivo de conseguir resultados aproximados a la realidad. Éstas se diferencian entre sí por las simplificaciones adoptadas para definir el perfil de una ola, las cuales se basan principalmente en asumir que la superficie libre de la ola mantiene su forma permanentemente, lo que significa que no existen corrientes subyacentes y que no están contaminadas. Adicionalmente se tiene

en cuenta que la dirección de propagación es horizontal, que el fluido es incompresible y no viscoso, y que el flujo es irrotacional [3].

Con base en lo anterior, es posible obtener un potencial de velocidad (ϕ) asociado a las partículas de agua, sujeta a que la superficie satisfaga la forma lineal de la ecuación de onda de Laplace (Ecuación 9), considerando un plano XZ [10].

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (9)$$

La Ecuación 9 puede ser resuelta al tener en cuenta las siguientes condiciones de frontera:

-Interfaz Aire-Agua: esta contempla dos condiciones, la primera, denominada condición cinemática, establece que la velocidad de la partícula de agua debe ser tangencial a la superficie (η) (véase Ecuación 10). La segunda, llamada condición dinámica, plantea que la presión en la superficie libre, expresada en términos de la ecuación de energía de Bernoulli, es constante (véase Ecuación 11) [3].

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{en } z = \eta \quad (10)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] = f(t) \quad \text{en } z = \eta \quad (11)$$

- Al lecho marino: considera que en el fondo marino la velocidad vertical es cero (véase Ecuación 12).

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{en } z = -d \quad (12)$$

Las componentes verticales y horizontales de la velocidad y la aceleración de las partículas de agua en función del potencial de velocidad se pueden expresar por medio de las Ecuaciones 13-16 [3].

$$V_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (13)$$

$$V_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (14)$$

$$a_x = \frac{\partial v_x}{\partial t} \quad (15)$$

$$a_z = \frac{\partial v_z}{\partial t} \quad (16)$$

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por proveer los fondos para llevar a cabo esta investigación. Asimismo, agradecen a la Universidad Autónoma de Querétaro, en especial a la Dirección de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería por hacer posible realizar este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] T. H. Dawson, *Offshore Structural Engineering*, 1st ed. USA: Prentice-Hall, Inc., 1983.
- [2] C. A. Brebbia and S. Walker, *Dynamic Analysis of Offshore Structures*, 1st ed. London, UK, 1979.
- [3] A. Mohamad, A. Al-Kadhimi, and M. Shaker, "Dynamic Behavior of Jacket type Offshore Structure," *Jordan J. Civ. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 412–419, 2012.
- [4] API, *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms -Working Stresss Design*, 21st ed. Washington, D.C., US: API Publishing Services, 2007, p. 274.
- [5] PEMEX, *Diseño y Evaluación de Plataformas Marinas Fijas en el Golfo de México*. Mexico, 2008, p. 82.

[6] T. Sarpkaya, *Wave Forces on Offshore Structures*, 1st ed. New York,US: Cambridge University Press, 2010.

[7] N. Haritos, "Introduction to the Analysis and Design of Offshore Structures-An Overview," *Electron. J. Struct. Eng.*, vol. 7, pp. 55–65, 2007.

[8] B. J. Muga and J. F. Wilson, *Dynamic Analysis of Ocean Structures*, 1st ed. New York,US: Plenum Press, 1970.

[9] K. G. Ocaña Espinosa de los Montero, "Modelación Física de Rompeolas Sumergidos con Oleaje Irregular," Instituto Politécnico Nacional, México, D.F., 2010.

[10] T. Sarpkaya and M. Isaacson, *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*, 1st ed. Van Nostrand Reinhold Company, 1981.

[11] A. Frias and G. Moreno, *Ingeniería de Costas*. México: Limusa México, 1988.

[12] S. Group, *Ocean Wave Modeling*, 1st ed. Boston, MA: Springer Science & Business Media, 1985.

[13] N. Haritos, "Modelling ocean waves and their effects on offshore structures," in *Australian Earthquake Engineering Society 2010 Conference*, 2010, pp. 1–7.

EPIGENÉTICA Y METILACIÓN: MEDIADORES DE ADAPTACIÓN EN PLANTAS

Epigenetics and methylation: adaptation mediators in plants

Mariela Martínez Reséndiz¹ *

¹Universidad Autónoma de Querétaro

*Autor de correspondencia:
mariela.mtz.rdz@gmail.com

RESUMEN

Los organismos vivos generan continuamente nuevos fenotipos en respuesta al ambiente y a su vez nuevas expresiones que se manifiestan tanto a nivel molecular como morfológico, lo que puede proporcionar un segundo sistema de herencia, muy similar a la herencia genética, que permite la evolución por selección natural. La epigenética se ha presentado como una nueva dimensión que ayuda a explicar cómo las poblaciones biológicas pueden alcanzar una alta diversidad y cómo pueden adaptarse a cambios inesperados, profundos y variables en su hábitat natural.

Palabras clave: epigenética, metilación, histonas, ADN, RNAs.

ABSTRACT

Living organisms continuously generate new phenotypes in response to the environment and, in turn, new expressions that manifest both at the molecular and morphological levels, which can provide a second inheritance system, very similar to genetic inheritance, which allows evolution by natural selection. Epigenetics has been presented as a new dimension that helps explain how biological populations can achieve high diversity and how they can adapt to unexpected, profound and variable changes in their natural habitat.

Keywords: epigenetics, methylation, histone, DNA, RNAs.

INTRODUCCIÓN

La integridad biológica de un organismo está determinada no sólo por la herencia genética recibida, sino también por los cambios que se producen posteriores a la fecundación como consecuencia de la interacción con el medio ambiente, es decir, la regula-

ción de la expresión de genes está mediada por la adaptación al medio ambiente a partir de la adaptación del genoma y genera así distintos fenotipos ante las diferentes condiciones a las que se enfrenta el organismo [1]. En 1942 Waddington utiliza el término "epigenética" (por encima de los genes), que definió como cambios en el fenotipo, sin cambios en el genotipo [2]. Este término se usó para explicar los aspectos del desarrollo y la influencia entre el medio ambiente y el genotipo llevando a la constitución de un "epigenotipo" [3]. Ahora se conoce más acerca del tema, de cómo estos mecanismos epigenéticos transducen la herencia de los patrones de expresión génica sin alterar la secuencia de ADN, pero al adaptar la cromatina y el ADN, que es la forma fisiológica de la información genética.

Una respuesta rápida de los organismos para lograr la adaptación a su entorno no se puede dar por mutaciones en la secuencia de ADN de los genes, pues este proceso evolutivo puede tardar muchas generaciones [4]. En cambio, existen otra forma en que se activan los genes al cambiar la manera en que se empaqueta el ADN en las células, lo que puede permitir que los organismos se adapten dentro y entre generaciones de manera más rápida y eficiente [5]. En plantas, las modificaciones epigenéticas son de suma importancia, ya que, al llevar una vida sésil, no pueden moverse en busca de nutrientes o mejores condiciones ambientales. Las plantas tienen que ajustar continuamente su fisiología y crecimiento a condiciones medioambientales cambiantes, lo que implica redes de señalización cuyo efecto final es la activación o represión de genes necesarios para adaptarse a los cambios en el ambiente [6].

La cromatina altamente condensada llamada heterocromatina impide el acceso de los factores de transcripción (FT) y determina el silenciamiento génico de esta zona,



mientras que las regiones más escasas de cromatina llamada eucromatina permiten el acceso de activadores que se acoplan con las regiones promotoras de los genes, dando lugar al proceso de transcripción [7]. De esta manera las marcas epigenéticas regulan el estado “abierto” o “cerrado” de las regiones del genoma, indicando qué genes se expresarán o no y por lo tanto controlan el estado activado o inactivado de los genes [8]. Los mecanismos tradicionales de regulación epigenética incluyen metilación del ADN, modificaciones de histonas, al entender a estas proteínas como las encargadas de empaquetar el ADN [9] y más recientemente se han encontrado pequeños ARN no codificantes [10].

Se considera que estos tres tipos de mecanismos epigenéticos participan en la regulación de los complejos remodeladores de la cromatina, son de gran importancia ya que establecen los patrones de expresión génica y conllevan modificaciones covalentes en el ADN o en la cromatina asociada al ADN, que no implican alteraciones en la secuencia del ADN, sin embargo, tienen gran influencia sobre la regulación de la expresión génica [11]. Las modificaciones epigenéticas en las plantas pueden ser transmisibles a la progenie y ser heredadas transgeneracionalmente [12].

METILACIÓN DEL ADN

La cadena ADN está compuesto por cuatro bases nitrogenadas (nucleótidos): adenina, citosina, guanina y timina, los cuales proporcionan la información genética, ya que se organizan de diferentes formas para generar una gran variedad de secuencias de ADN [13]. En ocasiones un grupo metilo se añade a una base, lo que agrega un nivel extra de información [14]. En organismos superiores se ha observado que la metilación está principalmente restringida a la base citosina. La

citosina metilada se asocia a la formación de cromatina “cerrada” y por tanto con la desactivación de genes [15]. La metilación puede estar sujeta a la acción de agentes ambientales, es decir, la planta al encontrarse frente a ambientes adversos o diversos puede encontrarse hiper o hipometilación [16]. La metilación de citosinas, en las secuencias de “islas” CpG, dentro de la región promotora de un gen, puede silenciar su expresión [14].

Entre las modificaciones epigenéticas descritas en plantas está la metilación de citosinas del ADN, que en plantas se puede presentar en tres contextos diferentes: el clásico contexto CG o CpG y también en contextos CNG y CNN (asimétrica, siendo N cualquier nucleótido, C el nucleótido citosina y G guanidina), que son exclusivos de plantas [17]. Las enzimas involucradas en la metilación de la cadena son las ADN metiltransferasas (DNMT, por sus siglas en inglés), que catalizan la formación de 5 metilcitosina (5-mC) y realizan la transferencia del grupo metilo de la adenosil metionina a los nucleótidos citosinas de la cadena de ADN (véase Figura 1) [18]. Se conoce que aproximadamente el 30% de los residuos de citosinas en el genoma vegetal se encuentra metilado [19]. En muchos casos los dinucleótidos CpG que se metilan o desmetilan se encuentran regularmente concentrados cerca de las regiones promotoras de algún gen, que son sitios de inicio y de regulación de la transcripción de genes [20].

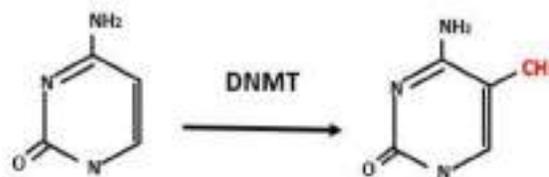


Figura 1. Metilación de citosina.
Adición del grupo metilo

Se ha observado proteínas de unión a ADN metilado y las proteínas MeCP2 (proteína de

unión a metil-CpG 2, por sus siglas en inglés). Éstas pueden distinguir el ADN metilado y no metilado, formando complejos con distintas secuencias de ADN no relacionadas entre sí, cuando están metiladas en CpG, de esta manera se relaciona con el silenciamiento de genes [21]. Existen dos DNMT encargadas de la metilación del ADN en los sitios Cp. Durante el desarrollo temprano la metiltransferasa de novo DNMT3 cataliza la metilación del ADN, la metilación en los sitios CpG hemimetilados se mantiene específicamente por la metiltransferasa de mantenimiento DNMT1. La metilación del ADN en cada sitio está determinada por la actividad local de DNMT, las desmetilasas del ADN y la tasa de replicación del ADN [22].

En las plantas se ha observado diferentes factores que provocan cambios en los patrones de metilación del ADN. Uno de ellos es la edad del cultivo [23]. En las semillas jóvenes se presentan menores niveles de ADN metilado que en los tejidos ya maduros como las hojas o yemas [24]. Se ha observado que el ADN está metilado a un nivel más alto en tejidos de plantas adultas que en tejidos juvenil [25]. Por otro lado, también hay datos que informan un menor nivel de metilación del ADN en tejidos vegetales adultos que en los juveniles [26]. Recientes evidencias sugieren que la metilación del ADN está implicada en la regulación expresión génica a través del desarrollo de la planta y en respuesta al estrés ambiental [27], es decir, la metilación puede variar dependiendo de las condiciones ambientales y del organismo en cuestión. En conjunto, los datos sugieren que el estado de metilación del ADN genómico puede variar durante el envejecimiento y la senescencia de las plantas, lo que resulta en cambios en la transcripción de genes responsables del deterioro de las plantas relacionado con la edad. El nivel y el patrón de metilación de la citosina están determinados por la maquinaria de metilación del ADN y la

maquinaria de desmetilación del ADN. Estos mecanismos epigenéticos permiten que los estados cambiados persistan a través de las divisiones celulares, incluso en ausencia del estímulo inductor, y proporcionan una memoria molecular, dando lugar a una marca epigenética (véase Figura 2) que sustenta la fase de mantenimiento de estas respuestas [28]. Aún no se conoce a profundidad cómo es que operan estos procesos epigenéticos, sin embargo, a diferencia de los procesos genéticos los epigenéticos pueden en algunos casos ser inducidos por el ambiente (véase Figura 2) [29].

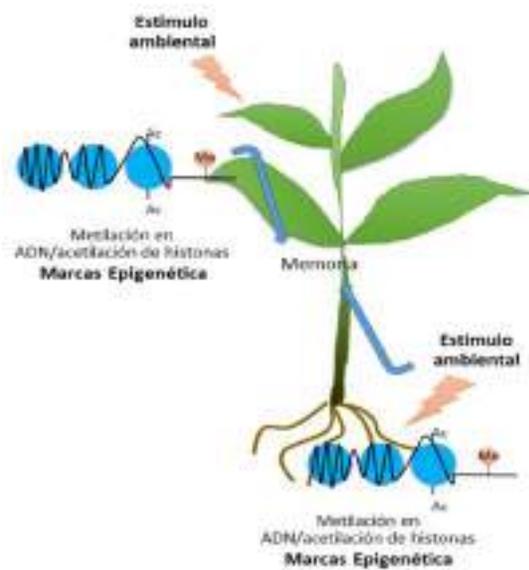


Figura 2. Inducción de memoria epigenética en plantas mediante reacciones a estímulos del ambiente.

MODIFICACIÓN DE HISTONAS

La información genética en forma de ADN en una célula se encuentra en el núcleo y algunos organelos, los que se encuentran asociados a proteínas llamadas histonas, formando la cromatina. Compactando y protegiendo al ADN, se regula la expresión de genes. El nucleosoma es la unidad básica de repetición de



la cromatina, consiste en 147 pares de bases de ADN enrolladas en un octámero de histonas, conformado por dos copias de las histonas H2A, H2B, H3 y H4 ligadas por la histona H1 en asociación con proteínas no histónicas [30]. Existen modificaciones postraduccionales que pueden cambiar la conformación de la cromatina e incluyen principalmente: acetilación, fosforilación, metilación, deaminación, ubiquitinación, ADP-ribosilación e isomerización de prolinas histónicas [31]. De esta manera es como se puede encontrar una gran diversidad en la estructura de histonas y nucleosoma generada por estos cambios. Estudios señalan que combinaciones específicas de modificaciones de las histonas pueden ser como un código [32], que determina si el gen asociado debería estar activado o inactivado, creando así una nueva vía de señalización para la activación o represión génica [34]. Uno de los primeros estudios sobre las modificaciones postraduccionales de las histonas [33] en particular la acetilación condujo a la hipótesis de que la acetilación está estrechamente relacionada con la actividad de los genes [35].

La organización de la cromatina es diferente en cada célula, si se encuentra muy compactada impide que el ADN interactúe con los FT y la ARN Polimerasa, y por lo tanto no se expresa el gen. La descompactación de la cromatina y del ADN es generada por la acetilación de histonas llevada a cabo por las histonas acetiltransferasas (HAT), dando lugar a la descompactación local. De esta manera existe una mayor transcripción mientras que las histonas desacetilasas (HDAC) tienen un efecto contrario, al quitar la acetilación de las histonas y promover la compactación de la cromatina [36]. Por otra parte, la metilación de las histonas provoca una mayor afinidad a la molécula del ADN, obstruyendo el acceso de la maquinaria transcripcional e inhibiendo la transcripción de los genes situados en la región [37].

PEQUEÑOS ARN NO CODIFICANTES

Dentro de los mecanismos epigenéticos se encuentran secuencias de ADN de un gen que no se traduce en proteína, si no que llegan a ser un ARN funcional. En plantas, diversas clases de ARN como el ARN pequeño de interferencia (ARNip), microARN (miARN) y ARN largo no codificante (ARN lnc) son descritos como reguladores clave de la expresión génica junto con varias proteínas accesorias [38]. Estas secuencias de ARN interfieren por complementariedad con secuencias de ADN o ARN codificantes. Los miRNAs son ácidos nucleicos de aproximadamente 22 nucleótidos, al interactuar por apareamiento por complementariedad con los ARN mensajeros (mRNA) que se traducirán en proteínas. Como consecuencia el mRNA es degradado o se impide la traducción y el resultado es una menor síntesis proteica (véase Figura 3) [40].

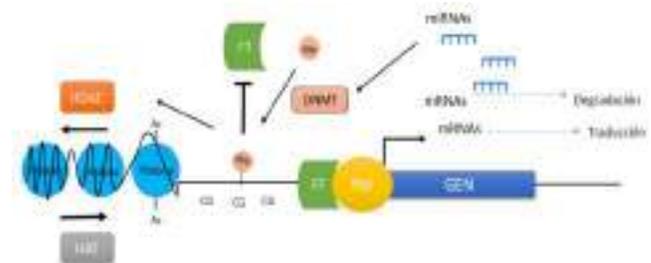


Figura 3. Los cambios epigenéticos implican una serie de mecanismos tales como la metilación de citosinas que es llevada a cabo por ADN metiltransferasas (DNMT), la metilación del ADN impide que se unan factores de transcripción (FT). El empaquetamiento del ADN a través de las modificaciones postraduccionales de las histonas como la acetilación por histonas acetiltransferasas (HAT) y desacetilación por histonas desacetilasas (HDAC) y los microRNAs (miRNAs) que se aparean con el RNA mensajero (mRNA) impiden su traducción.

CONCLUSIONES

Los organismos continuamente generan nuevos fenotipos con sus respectivas expresio-

nes que se presentan tanto a nivel molecular como morfológico [41], lo que da lugar a un segundo sistema de herencia, similar a la herencia genética, que permite la evolución por selección natural. La epigenética ha dilucidado un campo emergente que explica cómo es que las poblaciones pueden alcanzar una alta diversidad sin verse afectada la información genética y en algunos casos cómo pueden adaptarse a inesperados y vastos cambios en su hábitat natural. En el caso de las plantas pocas especies han sido estudiadas por su variabilidad epigenética, sin embargo, existen especies de plantas, cuyos estudios epigenéticos podrían contribuir a la comprensión del papel del ambiente en la generación de nuevos atributos que contribuyen en la direccionalidad de los procesos evolutivos. Por ejemplo, estudios recientes indican que factores como la elicitación induce cambios diferenciales de metilación en algunas plantas y, por ende, cambios en la forma de responder al ambiente al que se enfrenta [42, 43]. La comprensión de estos fenómenos epigenéticos puede dar lugar una nueva herramienta para el manejo de la agricultura convencional, ya que la agricultura requiere una segunda revolución verde para la reproducción de nuevas variedades resistentes al clima que satisfagan la creciente demanda de alimentos de calidad.

REFERENCIAS

[1] Juvenal GJ. (2014). Epigenética: vieja palabra, nuevos conceptos. *Rev Argent Endocrinol Metab.* 51 (2):66-74.

[2] Waddington, C. H. (1939). *An introduction to modern genetics.* George Allen And Unwin Ltd Museum Street; London.

[3] Waddington, CH. (1942). The epigenotype, *Endeavor* 1, 18-20.

[4] Domínguez, A. (2018). Herencia, adaptación y evolución: nuevas propuestas teóri-

cas y su aporte a la Teoría de los Sistemas de Desarrollo. *Acta Zoológica Lilloana*, 57-69.

[5] Dubin, M. J., Zhang, P., Meng, D., Remigereau, M. S., Osborne, E. J., Casale, F. P., & Jagoda, J. (2015). DNA methylation in *Arabidopsis* has a genetic basis and shows evidence of local adaptation. *Elife*, 4, e05255.

[6] Richards, C. L., Alonso, C., Becker, C., Bossdorf, O., Bucher, E., Colomé-Tatché, M. & Grosse, I. (2017). Ecological plant epigenetics: Evidence from model and non-model species, and the way forward. *Ecology Letters.* 20(12), 1576-1590.

[7] Cavagnari, B. M. (2012). Regulación de la expresión génica: cómo operan los mecanismos epigenéticos. *Archivos argentinos de pediatría*, 110(2), 132-136.

[8] Allis, C. D., & Jenuwein, T. (2016). The molecular hallmarks of epigenetic control. *Nature Reviews Genetics.* 17(8), 487.

[9] Hernández, B., Salím, J., & Suárez Formigo, G. M. (2018). Mecanismos epigenéticos en la plasticidad y flexibilidad de los linfocitos T CD4. *Revista Cubana de Hematología, Inmunología y Hemoterapia.* 34(1), 42-50.

[10] Holoch, D., & Moazed, D. (2015). RNA-mediated epigenetic regulation of gene expression. *Nature Reviews Genetics.* 16(2), 71.

[11] Morgan, D. K., Whitelaw E. (2008). The case for transgenerational epigenetic inheritance in humans. *Mammalian Genome.* 19: 394-7.

[12] Takeda, S., Paszkowski, J. (2006). DNA methylation and epigenetic inheritance during plant gametogenesis. *Chromosoma.* 115: 27-35.

[13] Travers, A., & Muskhelishvili, G. (2015). DNA structure and function. *The FEBS journal.* 282(12), 2279-2295.

[14] Razin, A., & Riggs, A. D. (1980). DNA methylation and gene function. *Science.* 210(4470), 604-610.

[15] Dubin, M. J., Zhang, P., Meng, D., Remigereau, M. S., Osborne, E. J., Casale, F. P.,



- & Jagoda, J. (2015). DNA methylation in *Arabidopsis* has a genetic basis and shows evidence of local adaptation. *elife*, 4, e05255.
- [16] Feil, R. (2006). Environmental and nutritional effects on the epigenetic regulation of genes. *Mutat Res.* 600(1-2):46-57.
- [17] Gouil, Q., & Baulcombe, D. C. (2016). DNA methylation signatures of the plant chromomethyltransferases. *PLoS genetics.* 12(12), e1006526.
- [18] Li, E., & Zhang, Y. (2014). DNA methylation in mammals. *Cold Spring Harbor perspectives in biology*, 6(5), a019133.
- [19] Ashapkin, V. V., Kutueva, L. I., & Van-yushin, B. F. (2016). Plant DNA methyltransferase genes: multiplicity, expression, methylation patterns. *Biochemistry (Moscow)*. 81(2), 141-151.
- [20] Lyko, F. (2018). The DNA methyltransferase family: a versatile toolkit for epigenetic regulation. *Nature Reviews Genetics.* 19(2), 81.
- [21] Meehan, R. R., Lewis, J. D., McKay, S., Kleiner, E. L., & Bird, A. P. (1989). Identification of a mammalian protein that binds specifically to DNA containing methylated CpGs. *Cell.* 58(3), 499-507.
- [22] Jeltsch, A., & Jurkowska, R. Z. (2014). New concepts in DNA methylation. *Trends in biochemical sciences.* 39(7), 310-318.
- [23] Idro, S. Á. B. (2012). Determinación del grado de metilación del ADN como marcador de la edad fisiológica de setos de *Pinus radiata*.
- [24] Holliday, R. & Pugh, J. E. (1975). DNA modification mechanisms and gene activity during development. *Science.* 187, 226–232.
- [25] Dubrovina, A. S., & Kiselev, K. V. (2016). Age-associated alterations in the somatic mutation and DNA methylation levels in plants. *Plant Biology*, 18(2), 185-196.
- [26] Monteuis, O., Doulebeau, S., Verdeil J.L. (2008) DNA methylation in different origin clonal offspring from a mature *Sequoia-dendron giganteum* genotype. *Trees – Structure and Function*, 22, 779–784..
- [27] Jirtle RL, Skinner MK. (2007). Environmental epigenomics and disease susceptibility. *Nat Rev Genet.* 8(4):253-62
- [28] Lira-Medeiros, C. F., Parisod, C., Fernandes, R. A., Mata, C. S., Cardoso, M. A., & Ferreira, P. C. G. (2010). Epigenetic variation in mangrove plants occurring in contrasting natural environment. *PloS one.* 5(4), e10326.
- [29] Jaenisch R, & Bird A. (2003). Epigenetic regulation of gene expression: how the genome integrates intrinsic and environmental signals. *Nat Genet.*33.
- [30] Cutter, A. R., & Hayes, J. J. (2015). A brief review of nucleosome structure. *FEBS letters.* 589(20), 2914-2922.
- [31] Fan, J., Krautkramer, K. A., Feldman, J. L., & Denu, J. M. (2015). Metabolic regulation of histone post-translational modifications. *ACS chemical biology.* 10(1), 95-108.
- [32] Nightingale, K. P., O'Neill, L. P., & Turner, B. M. (2006). Histone modifications: signalling receptors and potential elements of a heritable epigenetic code. *Current opinion in genetics & development*, 16(2), 125-136.
- [33] Jirtle RL, Skinner MK. (2007). Environmental epigenomics and disease susceptibility. *Nat Rev Genet.* 8(4):253-62.
- [34] Allfrey, V. G., Faulkner, R. & Mirsky, A. E. (1964). Acetylation and methylation of histones and their possible role in the regulation of RNA synthesis. *Proc. Natl Acad. Sci. USA.* 51, 786–794.
- [35] Verdin, E. & Ott, M. (2015). 50 years of protein acetylation: from gene regulation to epigenetics, metabolism and beyond. *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.* 16, 258–264.
- [36] Bannister AJ, Kouzarides T. (2011). Regulation of chromatin by histone modifications. *Cell Res.* 21:381-95.
- [37] Du, J., Johnson, L. M., Jacobsen, S. E., & Patel, D. J. (2015). DNA methylation pathways and their crosstalk with histone methylation. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 16(9), 519–532. doi:10.1038/nrm4043

[38] Rajeev Kumar S., Safia, Sathishkumar R. (2017) Small RNAs: Master Regulators of Epigenetic Silencing in Plants. In: Rajewsky N., Jurga S., Barciszewski J. (eds) Plant Epigenetics. RNA Technologies. Springer. (4):253-62 .

[39] Ameres SL, Zamore P. D. (2013). Diversifying microRNA sequence and function. *Nat Rev Mol Cell Biol.* 14:475-88.

[40] O'Driscoll L. (2006). The emerging world of microRNAs. *Anticancer Res.* 26(6B):4271-8.

[41] Großkinsky, D. K., Svensgaard, J., Christensen, S., & Roitsch, T. (2015). Plant phenomics and the need for physiological phenotyping across scales to narrow the genotype-to-phenotype knowledge gap. *Journal of experimental botany*, 66(18), 5429-5440.

[42] Vega-Muñoz, I., Feregrino-Pérez, A. A., Torres-Pacheco, I., & Guevara-González, R. G. (2018). Exogenous fragmented DNA acts as a damage-associated molecular pattern (DAMP) inducing changes in CpG DNA methylation and defence-related responses in *Lactuca sativa*. *Functional Plant Biology*.

[43] González-Chavira, M. M., Estefanía-Ojeda, S., Pons-Hernández, J. L., Guevara-González, R. G., Maldonado, S. H. G. (2018). Cambios en el contenido de compuestos fenólicos , esteviosidos y nivel de metilación en *Stevia rebaudiana* elicitada. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas.* 9(7), 1435-1446.

RECICLAMIENTO DE ASFALTO PARA FABRICAR CARPETAS DE CONCRETO

Recycling Asphalt to Make Concrete Pavements

Dulce Valeria Guzmán Ortiz^{1*}, Juan Bosco Hernández Zaragoza

¹Universidad Autónoma de Querétaro

*Autor de correspondencia:
dv.ortiz4@gmail.com

RESUMEN

La constante explotación y consumo de recursos naturales para la construcción o rehabilitación de carreteras ha influido en el calentamiento global, es por ello que el Reciclado de Pavimento Asfáltico, también conocido como Reclaimed Asphalt Pavement (RAP, por sus siglas en inglés), se ha presentado como una técnica para reducir costos y consumo de los recursos naturales que consiste en fresar el material de un pavimento flexible durante la construcción y rehabilitación. El objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño de las mezclas en resistencia a compresión y tensión diagonal de morteros de concreto hidráulico a los 3, 7 y 14 y 28 días de edad. Se trabajó con material RAP para separar la impregnación del material asfáltico mediante la máquina de Desgaste de Los Ángeles y se cribó el agregado para usarlo en dos diferentes mezclas RAP en Condición Recuperado Lavado (LAV) y RAP en Condición Recuperado Sin Lavar (SL), así mismo se evaluó una Mezcla de Control (CO) y el RAP en Condición Original (CO). Todas las muestras fueron cribadas por el tamiz No. 8 y compactadas en dos capas al darles 20 golpes a cada una en cilindros de 5*10 cm. Para cada material se hizo corrección por humedad por las absorciones de los agregados. Por un lado, los resultados obtenidos en laboratorio indican que la aportación de resistencias a compresión a los 28 días fue de 47.7 kg/cm², 62.2 kg/cm² y 74.8 kg/cm², de las mezclas CO, SL y LAV, observándose que la mezcla LAV obtuvo un incremento del 4.3% respecto a la Mezcla de Control (MC) que tuvo una resistencia de 71.8 kg/cm². Por otro lado, los resultados obtenidos de resistencia a la tensión diametral a los 28 días fueron de 10.2 kg/cm², 15.4 kg/cm² y 16.7 kg/cm², de los agregados de reciclado de pavimento asfáltico CO, SL y LAV son menores que la Mezcla Control (MC) de 21.0 kg/cm², donde se des-

taca que el material LAV es el que obtuvo una resistencia de 16.7 kg/cm², al ser el de mejor comportamiento, mejorando en un 38.9% y 7.3% respecto al CO y SL, lo que indica que es una posible aplicación de agregado como remplazo para un concreto hidráulico.

Palabras clave: reciclado de pavimento asfáltico, concreto hidráulico, resistencia, compresión, tensión diagonal.

ABSTRACT

The constant exploitation and consumption of natural resources for the construction or rehabilitation of roads has influenced on global warming. Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) has been presented as a technique to reduce costs and consumption of natural resources. The objective of this study was to evaluate the performance of the mixtures, in resistance to compression and diagonal tension presented in hydraulic concrete mortars, at 3, 7, 14 and 28 days of age. RAP material was used to separate the impregnation from the asphalt material using the Los Angeles Wear machine and the aggregate was screened to be used in two different RAP mixtures in Recovered Washed Condition (LAV) and RAP in Recovered Unwashed Condition (SL). A Control Mix (CO) and RAP in Original Condition (CO) were also evaluated. All samples were screened by sieve No. 8 and compacted in two layers giving 20 hits to each one in cylinders of 5*10 cm. For each material, moisture correction was made due to the absorption of the aggregates. On the one hand, the results obtained in the laboratory indicate that the contribution in resistance to compression at 28 days was 47.7 kg/cm², 62.2 kg/cm² and 74.8 kg/cm², of the mixtures CO, SL and LAV. Results showed that the mixture LAV obtained an increase of 4.3% with respect to the Control Mix (MC) that obtained a resistance of 71.8 kg/cm². On



the other hand, the results of resistance to diametral tension obtained at 28 days were 10.2 kg/cm², 15.4 kg/cm² and 16.7 kg/cm². Out of the asphalt pavement CO recycling aggregates, SL and LAV are smaller than the Control Mix (MC) of 21.0 kg/cm². It is emphasized that the material LAV is the one that obtained a resistance of 16.7 kg/cm², being the best behavior, improving in 38.9% and 7.3% with respect to CO and SL, which indicates that it is a possible application of aggregate as a replacement for a hydraulic concrete.

Keywords: asphalt pavement recycling, hydraulic concrete, strength, compression, diagonal tension.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento del parque vehicular en los últimos años (véase Figura 1) de acuerdo con la base de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía [1] ha sido una de las causas del deterioro de los pavimentos, lo cual ha ocasionado la construcción y rehabilitación de nuevas carreteras [2], así como el consumo de numerosos recursos naturales.

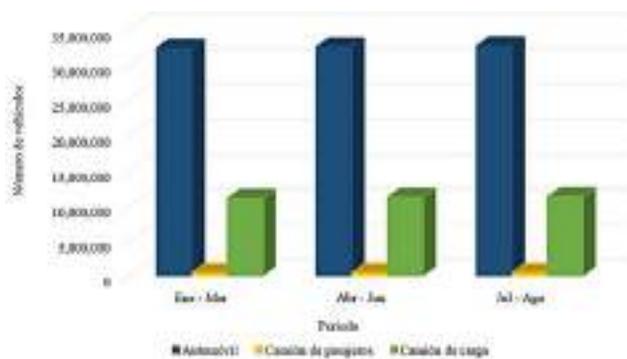


Figura 1. Vehículos de motor registrados en circulación.
Fuente: Elaboración propia a partir de [1].

En México se cuentan con 169,078 km de carreteras pavimentadas según datos recabados por la Secretaría de Comunicaciones

y Transporte (SCT), el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Por un lado, desde la década de 1960, la Ley de Vías Generales de Comunicación (LVGC) regula el peso y dimensiones de los vehículos de carga en México. Por otro lado, en 1992 el IMT publicó el primer estudio de pesos y dimensiones de los vehículos de carga. Con el fin de conocerlos para analizar el porcentaje de vehículos sobrecargados instalaron estaciones a nivel nacional [3]. De los datos expuestos se concluye que por el aumento de la sobrecarga de los vehículos incrementan los esfuerzos que se distribuyen en los pavimentos, lo que ocasiona uno de los tantos temas de deformaciones y deterioros de pavimentos (véase Figura 2).

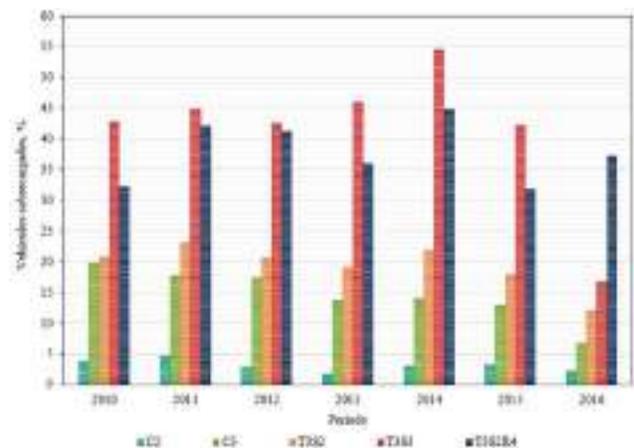


Figura 2. Porcentaje de vehículos sobrecargados a nivel nacional.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos [3].

Las causas principales del deterioro de los firmes de un pavimento son las sobrecargas repetitivas del tránsito de acuerdo con Baamonde, Pérez y Herrador [4]. Los pavimentos están constituidos por un conjunto de capas superpuestas relativamente horizontales de distintos materiales. De manera general existen dos principales tipos: los pavimentos rígidos y los flexibles [5]. Por un lado, los pa-

vimientos rígidos están constituidos por una losa de concreto hidráulico, que distribuyen las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores por medio de toda la superficie de la losa y las contiguas [6]. Por otro lado, Montejo [7] en su libro define a los pavimentos flexibles como una carpeta asfáltica de agregados pétreos y ligante asfáltico que se apoya generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la subbase.

El pavimento flexible como bien ya se mencionó está formado de agregados pétreos y ligante asfáltico. El ligante asfáltico fue conocido cerca del año 2500 a.C. en Egipto y México fue uno de los primeros países en trabajarlas hacia los años 70 [8]. Se han realizado investigaciones sobre los métodos de remoción en pavimentos flexibles, entre los que destacan el fresado y la escarificación [9]. Dentro de la historia del pavimento, es importante mencionar que reciclar el pavimento no es algo novedoso, debido a que existen indicios de reciclaje de pavimento asfáltico cerca de 1900 [10] y mundialmente la reducción de los recursos de un pavimento flexible se hace mediante el RAP. En Hong-Kong se importa asfalto del extranjero, y cada año se fresan cerca de 200,000 toneladas de RAP [11], los cuales se aprovechan en la construcción y/o rehabilitación de los mismos. Hacia la década de los 70, se menciona que por el aumento del costo del petróleo se dio la necesidad de reciclar los pavimentos asfálticos, sin embargo, para esa década no existía experiencia del uso del RAP y, debido a esto, prácticamente los pavimentos procesados con RAP eran desconocidos [12]. El RAP tiene ciertas ventajas y se estima una baja del 25% en costos, y 7000 toneladas por kilómetro recuperando de los pavimentos flexibles con métodos de reciclado [13].

Se ha indicado que el concreto rígido a base de cemento Portland (CPP) es el material más utilizado para construcciones en el mundo [14]. Uno de los primeros estudios sobre el uso del RAP en los pavimentos rígi-

dos se enfocó en la factibilidad de usar RAP como agregado en un concreto rígido [15]. Algunos estudios hechos en el concreto hidráulico con agregados de RAP han coincidido que la película de asfalto, que cubre a los agregados de RAP, reduce la resistencia del concreto hidráulico [15], [16], [17], [18].

A pesar de estos indicadores, Hossiney [18] revisó dos proporciones de cemento, arena y agregado RAP con relaciones de agua/cemento de 0.50, 0.60 y 0.70. Estas mezclas fueron analizadas a compresión y flexión, lo que dio como resultado que a medida que aumentan el contenido de agua/cemento la resistencia a la compresión disminuía en un 4.2 MPa y 1.5 MPa para la relación agua/cemento de 0.50 y 0.70. Con lo anterior se concluyó que la resistencia a la compresión que encontraron con agregado RAP fue de 25 MPa, por lo que evidencian que el RAP es factible para usar en el concreto y puede convertirse en un elemento viable para generar agregados de media y baja resistencia.

Por el contrario, Bida, Danraka y Ma'ali [19] trabajaron con muestras de RAP como remplazo parcial, con agregados finos de 0 a 100% a intervalos de 20% y con lo que tuvieron resultados a la compresión a los 28 días de 28.4, 26.3, 26.0, 22.5, 21.3 y 18.4 MPa, respectivamente. Hossiney, Tia y Bergin [18] evaluaron el concreto a 0, 10, 20 y 40% de RAP, indicando que a los 28 días se obtuvo una resistencia de 34.54, 30.91, 21.98 y 16.85, respectivamente. Por medio de estas dos investigaciones se concluye que, aunque disminuyan las resistencias, se podría generar una mejora en el desempeño del concreto que contenga RAP.

A pesar de la diversidad de estudios realizados y de considerar que la película de asfalto es la que reduce la resistencia del concreto hidráulico. Sing, Ransinchung y Kumar [20] presentaron una técnica de mejora para el comportamiento del agregado RAP con concreto hidráulico mediante abrasión y desgaste. Sus mezclas consistieron de RAP grueso



recuperada después de la abrasión y dieron incrementos de la resistencia a la compresión del concreto en un 9.74%, a la tensión en un 20.66% y a la flexión en un 6.05% en comparación con el empleo de concreto inclusivo lavado (WRAP) y sucio (DRAP). En consecuencia, la presente investigación reutilizó el agregado RAP como arena (< No. 8) en concreto hidráulico, al implementar la técnica de abrasión y desgaste [21] en distintas condiciones. Con el fin de disminuir la explotación de recursos naturales y de aportar a la sostenibilidad, se realizó una revisión de la bibliografía y se evaluó el desempeño de las mezclas en resistencia a la compresión y tensión diametral.

METODOLOGÍA

Sing, Ransinchung y Kumar [20] evaluaron la técnica “abrasión y desgaste” para eliminar las capas contaminantes (película de asfalto, película de polvo rígido y película de polvo suelto), ya que facilita el desprendimiento fuerte de la película del asfalto lo que aseguraría una adecuada unión entre las partículas de agregado y cemento.

Mediante la consulta presentada por Sing, Ransinchung y Kumar [21] y la norma ASTM C131 [22], se modificaron algunos criterios de proceso para la recuperación de arena RAP después de haber evaluado diferentes condiciones en la Máquina de Desgaste de Los Ángeles y de modificar con ello los tiempos, contenido de RAP y carga abrasiva a incorporar en la Máquina. Dichas condiciones se presentan más adelante. Una vez establecidos estos criterios y la separación de la arena RAP, se procedió a determinar las características de los materiales para elaborar las mezclas y así evaluar su desempeño a resistencia a la compresión y tensión diametral de morteros. En la Tabla 1 se pueden

observar los materiales empleados, su identificación y la característica del material.

Tabla 1. Arena empleada para elaborar las mezclas

Nombre Arena	Identificación	Característica
Arena de Control	MC	Arena obtenida del banco de materiales Saldarriaga, Santiago de Querétaro, Qro.
RAP Condición Original	CO	RAP obtenido de la Infraestructura del Estado de Querétaro, Qro.
RAP Recuperado Sin Lavar	SL	RAP Recuperado obtenido de la incorporación de CO en la Máquina de Desgaste de Los Ángeles Sin Lavar
RAP Recuperado Lavado	LAV	RAP Recuperado obtenido de la incorporación de CO en la Máquina de Desgaste de Los Ángeles Lavado

Proceso de selección del material

Reducción

El proceso de selección del material para los agregados de arena LAV, SL, MC y CO se hizo mediante el cuarteo de los materiales, donde se divide la muestra en cuatro partes (Figura 3a), posteriormente, con una brocha se apartan los cuarteos (Figura 3b) y se toman dos cuarteos de forma diagonal (Figura 3c), de acuerdo con la norma ASTM C702 [23] que permite reducir las muestras grandes de agregado al tamaño adecuado para el ensayo a ser evaluado.

(a)



(b)



(c)



Figura 3. Cuarteo de material RAP en Condición Original. Fuente: Elaboración propia

Cribado

Después de reducir el material adecuado LAV, SL, MC y CO se procedió a tamizarlos, conforme a la norma ASTM C136 [24]. Por

un lado, los materiales MC y CO se cribaron por el tamiz No. 8 (véase Figura 4a). Por otro lado, el material RAP a ser procesado se fraccionó en 2 partes (véase Figura 4b): RAP grueso ($> 4,75$ mm) y RAP fino ($< 4,75$ mm).

(a)



(b)



Figura 4. Cribado de material.
Fuente: Elaboración propia

Recuperación de arena RAP

Los pasos del proceso de recuperación de arena RAP se llevó a cabo al implementar la máquina de Desgaste de Los Ángeles, la cual fue elegida para obtener arena LAV y SL (véase Figura 5), conforme a la norma ASTM C131 [22]. Se modificaron algunos criterios del proceso con el fin de obtener la mayor cantidad de arena separada



del ligante asfáltico del agregado grueso. En la Tabla 2 se desglosa el procedimiento con base en la norma y los criterios modificados.

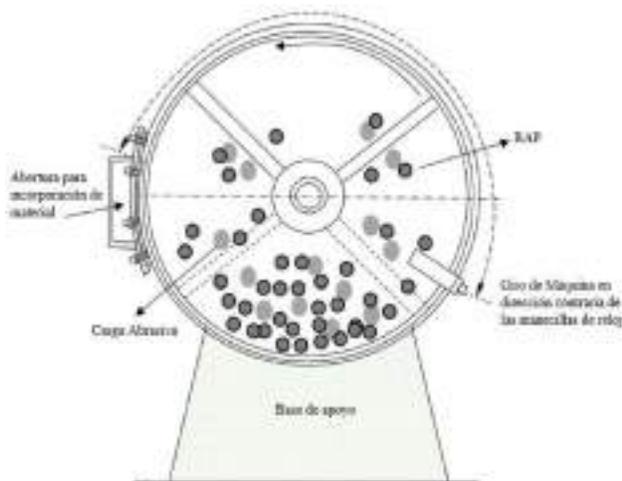


Figura 5. Vista de Máquina de Desgaste de Los Ángeles con incorporación de RAP y carga abrasiva.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Proceso de recuperación conforme a la norma y modificación.
Fuente: Elaboración propia

Procedimiento	Norma	Criterio Modificado
a) Preparación Máquina (Figura 6a)	Limpiar y verificar que no se encuentre ningún otro material dentro de esta.	NO
b) Incorporación de material (Figura 6b)	Vaciar 5 kg de acuerdo con el tamaño nominal del agregado	Sí Se introdujeron de 10 a 12 kg de agregado RAP en Condición Original sin importar su tamaño nominal.
c) Incorporación de carga abrasiva (Figura 6c)	De acuerdo con el tamaño nominal del agregado se introduce la cantidad de carga abrasiva con un diámetro de 46 a 48 mm de diámetro y cada una con una masa de 390 a 445 gr.	Sí Se incorporaron 14 esferas de carga abrasiva, con un diámetro y peso conforme a la norma.

Procedimiento	Norma	Criterio Modificado
d) Proceso de desgaste (Figura 6d)	Hacer girar la máquina a una velocidad de 30 a 33 rpm durante 15 minutos.	Sí Se giró la máquina durante 20 minutos con la misma velocidad especificada en la norma. Al contar con más material se dejó mayor tiempo en la máquina.
e) Recuperación (Figura 6e)	Retira la carga abrasiva y el material de la máquina.	NO
f) Lavado (Figura 6f)	Lavar el material por el tamiz No. 12	Sí Se lavó el material LAV por el tamiz 3/4" y No. 200 para quitar la película de polvo.
g) Cribado (Figura 6g)	Cribar por el tamiz No. 12 y descartar todo lo que pasa por este tamiz.	Se cribó el material LAV por el tamiz No. 8, descartando lo que pasa por el tamiz No. 200. Para el material SL se cribó por el tamiz No. 8 dejando el polvo que pasa el tamiz No. 200.
h) Secado (Figura 6h)	Secar el material en el horno a una temperatura de 100 °C durante 24 ± 4 horas.	NO



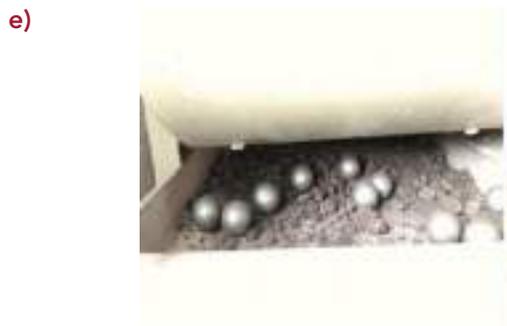


Figura 6. Proceso de recuperación de arena LAV y SL. Fuente: Elaboración propia.

Característica de los materiales

Se evaluaron las propiedades de los materiales, tales como se muestran en la Tabla 3 con sus respectivas normas empleadas.

Tabla 3. Características de los materiales.
Fuente: Elaboración propia.

Materiales	Norma	Característica
MC, CO, SL, LAV	ASTM C128 [25]	Gravedad específica
		Absorción [%]

Elaboración de especímenes

Se trabajó para todas las mezclas una relación cemento:arena de 1:6 y relación agua:cemento de 0.90 para el volumen calculado. Mediante la norma NMX-C-159-ONNCE [26] se desarrollaron los especímenes para evaluar su desempeño a compresión y tensión diagonal. Una vez con los datos de las mezclas, se procedió a elaborar 96 especímenes en cilindros de 5*10 cm (Figura 7a), compactados en dos capas dando 20 golpes a cada una para sacar el aire atrapado (Figura 7b). Finalmente se curaron los especímenes en agua a 25 ± 3 °C para ser evaluados a sus distintas edades (Figura 7c).



a)



b)



c)



Figura 7. Elaboración de especímenes.

Fuente: Elaboración propia

Resistencia a la compresión

De acuerdo con la norma NMX-C-061-ONNCE [27] se evaluaron 48 especímenes de concreto para su ensaye de resistencia a la compresión (Figura 8) a edades de 3, 7, 14 y 28 días. El cálculo para su resistencia se evaluó conforme la Ecuación 1 de la norma, de la siguiente manera.

$$f'c = (P \text{ máx}) / S \quad (1)$$

Donde:

$f'c$ = Resistencia a la compresión, kg/cm²

P = Carga máxima aplicada, kg

S = área de la sección transversal del espécimen, cm²



Figura 8. Evaluación de resistencia a la compresión.

Fuente: Elaboración propia.

Resistencia a la tensión diagonal

La evaluación de la resistencia a la tensión diametral se hizo conforme a la norma M-MMP-2-02-059 [28], es decir, se evaluaron 48 especímenes de concreto para su ensaye de resistencia a la tensión a edades de 3, 7, 14 y 28 días (véase Figura 9). Esta norma permite determinar la resistencia del concreto hidráulico mediante la compresión diametral en especímenes cilíndricos moldeados, con una relación altura/diámetro 2 a 1. El cálculo para su resistencia se evaluó con base en la Ecuación 2 de la norma, de la siguiente manera.

$$f'c = \frac{P \text{ máx}}{s} \quad (2)$$

Donde:

T = Resistencia a la tensión por compresión diametral, kg/cm²

P = Carga máxima aplicada, kg

l=Longitud promedio del espécimen, cm
d=Diámetro promedio del espécimen, cm



Figura 9. Evaluación de resistencia a la tensión.
Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Característica de los agregados

Las propiedades de los agregados se muestran en la Tabla 7.

Gravedad específica y absorción de los agregados

Como se observa en la Tabla 4, por un lado, la gravedad específica bruta de LAV (2.90) tuvo una mejor condición que el CO (2.02) y SL (2.20), lo que se atribuye al proceso de recuperación por medio del desgaste que desprendió el polvo y la película de asfalto de los agregados de RAP en Condición Original. Por otro lado, la absorción que obtuvo el CO de 2.40 % se adjudica a la presencia del polvo adherido en las partículas.

Tabla 4. Propiedades de los agregados.
Fuente: Elaboración propia.

Caract.	MC	CO	SL	LAV
Gravedad específica	2.80	2.02	2.20	2.90

Caract.	MC	CO	SL	LAV
Absorción promedio [%]	1.50	2.40	1.90	1.70

Distribución granulométrica

Los porcentajes acumulados de la distribución granulométrica (véase Figura 10) del agregado CO muestran una distribución muy variable por el fresado que se dispone de los pavimentos, así mismo, los agregados SL y LAV presentan una mejor distribución. Los agregados cumplen con los criterios para los tamaños de 16 mm o menor de acuerdo con la norma IS:383 [29].

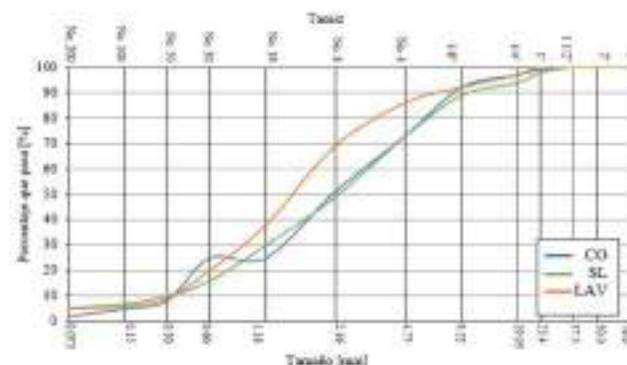


Figura 10. Distribución granulométrica de agregados. Fuente: Elaboración propia.

Desempeño de la mezcla

Resistencia a la compresión

En cuanto a la evaluación del desempeño de los especímenes a los 28 días, en la Tabla 5 se puede observar que disminuyó la resistencia de la mezcla CO y SL, un 33.95% y 13.39% respecto a la mezcla, y que se incrementó en un 4.30% la resistencia a compresión de la mezcla LAV. Este resultado probablemente se puede atribuir al lavado, secado y a la mejora de unión entre las partículas.



Finalmente se observó que a los 28 días la mezcla LAV obtuvo una resistencia de 74.88 kg/cm², lo que indica que podría utilizarse como un Mortero Tipo II de acuerdo con la norma NMX-C-486-ONNCE [30].

Tabla 5. Resultados de resistencia a la compresión a los 28 días.
Fuente: Elaboración propia.

Mezcla	Resistencia a la compresión kg/cm ²
MC	71.79
CO	47.42
SL	62.18
LAV	74.88

Resistencia a la tensión diametral

En la Tabla 6 se presentan los resultados de resistencia a la tensión evaluada a los 3, 7 y 14 días de las diferentes mezclas. Se observó que se redujo su resistencia en 51.61%, 26.69% y 20.83% para CO, SL y LAV, respectivamente, en referencia a la mezcla MC. Con estos resultados se puede determinar que el beneficiar el RAP con la Recuperación del Agregado Arena Lavado (LAV) podría ser una manera de incrementar el desempeño del concreto con agregados de RAP.

Tabla 6. Resultados de resistencia a la tensión a los 28 días

Mezcla	Resistencia a la tensión kg/cm ²
MC	17.89
CO	9.98
SL	13.35
LAV	13.73

CONCLUSIONES

Se realizaron 3 mezclas diferentes de mortero con el objetivo de evaluar el desempeño de

cada una de ellas en resistencia a la compresión y tensión diametral, comparadas con una mezcla patrón MC. Por un lado, la gravedad específica de CO (2.02) y SL (2.20) fue menor respecto al agregado MC (2.80), mientras que para el LAV se mantuvo con un valor muy similar, con 2.90. Por otro lado, la absorción de los agregados CO (2.70) y SL (1.94) incrementó respecto al MC (1.50), mientras que el agregado LAV obtuvo un valor de 1.67, por lo que se concluye que tiene propiedades similares el agregado LAV respecto al agregado MC. Al eliminar los contaminantes y el polvo provocado por el fresado y desgaste se reduce la gravedad específica.

La incorporación del agregado CO y SL en el concreto redujo las resistencias a compresión, al dar como resultado a los 28 días una resistencia de 47.42 kg/cm² y 62.18 kg/cm², respectivamente, en comparación con la resistencia de MC que fue de 71.79 kg/cm². Asimismo, el agregado LAV obtuvo una resistencia a la compresión de 74.88 kg/cm² al incrementar en un 4.30%, en comparación con la resistencia de la mezcla MC. De lo anterior se puede concluir que el uso de los materiales CO y SL, debido a la resistencia obtenida a compresión y por la norma NMX-C-486-ONNCE-2014, se puede clasificar como un mortero Tipo III con una resistencia promedio superior a los 60 kg/cm² y como Tipo II para las mezclas MC y LAV, con una resistencia promedio superior a 110 kg/cm².

En lo que respecta al desempeño de la mezcla en resistencia a la tensión, las mezclas CO, SL y LAV obtuvieron resistencias de 10.18 kg/cm², 15.43 kg/cm² y 16.63 kg/cm², al reducirse en un 51.61%, 26.69% y 20.83%, respectivamente, en referencia a la mezcla MC con una resistencia de 21.05 kg/cm².

En lo que respecta al desempeño de la mezcla en resistencia a la tensión diametral de la mezcla LAV, en comparación con la mezcla CO, presentó un aumento de un 38.90%. La resistencia a la tensión incrementó en un 36.67%, en comparación con las mezclas CO, de lo cual se puede concluir nuevamente

que los contaminantes en la mezcla fresada de RAP en Condición Original, la película de asfalto y los polvos ocasionan una reducción considerable en el concreto.

El uso de agregados RAP en el concreto hidráulico dio resultados favorables en lo que respecta al agregado LAV, puesto que se adquirió un comportamiento similar al agregado MC en propiedades de gravedad específica y absorción al beneficiar el desempeño de la mezcla en resistencia a la compresión y tensión. Los estudios actuales podrían ser aplicados para reducir la explotación de recursos naturales y ser utilizados como arena incorporada al concreto hidráulico.

El reutilizar, reducir y reciclar materiales puestos en obra contribuye a reducir la contaminación. En el proceso de reciclado, por lo general, se utilizan menos recursos para fabricar los materiales que cuando se parte de materiales de recursos naturales. De la misma manera, disminuirían los escombros de pavimentos por rehabilitaciones o reconstrucción de carreteras. Por la alta demanda, suelen llenarse rápidamente los lugares apropiados para estos materiales, simplemente se desechan en lugares no apropiados.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología por su apoyo durante toda esta investigación.

REFERENCIAS

[1] Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía. "Vehículos de motor registrados en circulación" [Online]. Available: <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/vehiculos/> Consultado el 25 de septiembre 2018.

[2] D. Campos, *Diseño y Evaluación del Desempeño Mecánico de una Base Hidráulica Reciclada Mediante la Tecnología de*

Asfalto Espumado: Santiago de Querétaro, C.U. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro, 2017.

[3] J. Gutiérrez, V. Soria y M. Dorado. "Estudio estadístico de campo del autotransporte nacional", Documento Técnico No.71 IMT, pp. XVIII – 134, 2017.

[4] A. Baamonde, I. Pérez y M. Herrador. "Geosintéticos en carreteras: Planteamientos para su Aplicación en las capas de firme", Universidad de Coruña, pp. 1 – 9, 2011.

[5] H. Rondón and F. Reyes, *Pavimentos: materiales, construcción y diseño*, ed., ECOE, Ed. Colombia, 2015.

[6] A. Montejó, "Ingeniería de Pavimentos para Carretera," Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2002.

[7] A. Montejó, "Ingeniería de Pavimentos: Fundamentos, estudios básicos y diseño," Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2010.

[8] R. Rodríguez, V. Castaño and M. Martínez, "Emulsiones Asfálticas," Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, 2001.

[9] M. Fabela, J. Jaworski and A. Lozano, "Proceso de Remoción de Carpetas Asfálticas," Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, 1999.

[10] R. Izaks, V. Haritonovs and M. Zaumanis, "Bituminous Mixtures and Pavements VI. First trial to design up to 50% recycled hot mix asphalt in Latvia," London, United Kingdom: A.F. Nikolaidis, 2015.

[11] H. Gui-Ping and W. Wing-Gun, "Effects of moisture on strength and permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating RAP materials," *Construction and Building Materials*, vol. 22. 2006.

[12] D. Newcomb, E. Brown, and J. Epps, *Designing HMA Mixtures with High RAP Content. A Practical Guide*, National Asphalt Pavement Association, 2007.

[13] S. Marini, "Reciclado de Pavimentos Asfálticos en Frío," Centro de Investigaciones Viales, Universidad Tecnológica Nacional, 2006.



[14] G. Martínez, M. Martínez and E. Martínez, "Concreto Polimérico Reforzado con Fibras de Luffa," *Información Tecnológica*, vol. 24. 2013.

[15] M. Delwar, M. Fahmy and R. Taha, "Use of Reclaimed Asphalt Pavement as an Aggregate in Portland Cement Concrete," *ACI Mater. J.*, pp. 251–256, 1997

[16] S. Al-Oraimi, H.F. Hassan and A. Hago. "Recycling of reclaimed asphalt pavement in Portland cement concrete". *J. Eng. Res.* 6, 37–45, 2009

[17] F.O. Okafor "Performance of Recycled Asphalt Pavement as Coarse Aggregate in Concrete," *Leonardo Electronic J. Prac. Techno.*, 17, 47–58, 2010.

[18] N. Hossiney, M. Tia, "Concrete Containing RAP for Use in Concrete Pavement," *Int. J. Pavement Res. Technol.* 3, 251–258, 2010.

[19] S.M. Bida, M. Danraka and J.M. Ma'ali, "Performance of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) as a Replacement of Fine Aggregate in Concrete," *International Journal of Science and Research*, 2013.

[20] K. Kim, M. Tia and J. Greence, "Analysis of Jointed Plain Concrete Pavement Containing RAP," *International Journal of Latest Engineering Research and Applications (IJERIA)*, vol 1, pp 38 – 47, 2016.

[21] S. Singh, G.D. Ransinchung and P. Kumar, "An economical processing technique to improve RAP inclusive concrete properties," *Construction and Building Material*, vol. 148, 2017.

[22] American Society of Testing Material (ASTM) C131. "Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine" ASTM International, 2014.

[23] American Society of Testing Material (ASTM) C702. "Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size" ASTM International, 2018.

[24] American Society of Testing Material (ASTM) C136. "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates" ASTM International, 2014.

[25] American Society of Testing Material (ASTM) C128. "Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate" ASTM International, 2015.

[26] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. NMX-C-159-ONNCE. "Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo". [Online]. Available: [https://www.onnccce.org.mx/index.php/es/venta-normas/fichas-tecnicas/](https://www.onnccce.org.mx/index.php/es/venta-normas/fichas-tecnicas/Recuperado el 08 de julio de 2019) Recuperado el 08 de julio de 2019.

[27] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. NMX-C-061-ONNCE. "Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos". [Online]. Available: <https://www.onnccce.org.mx/index.php/es/venta-normas/fichas-tecnicas/> Recuperado el 08 de julio de 2019.

[28] Normativa para la Infraestructura del Transporte M-MMP-2-02-059. "Resistencia a la Tensión en Cilindros de Concreto", SCT-IMT, México, 2004.

[29] IS 383, Specification for Coarse and Fine Aggregates from Natural Sources for Concrete, Bureau of Indian Standard, New Delhi, 1970.

[30] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. NMX-C-159-ONNCE. "Mampostería – Mortero para uso Estructural – Especificaciones y Métodos de Ensayo". [Online]. Available: <https://www.onnccce.org.mx/index.php/es/venta-normas/fichas-tecnicas/> Recuperado el 08 de julio de 2019.

DISEÑO DE UNA ARQUITECTURA EN HARDWARE PARA OBTENER EL CANAL OSCURO EN IMÁGENES CON HAZE

Design of a Hardware Architecture to Obtain the Dark Channel on Hazy Images

Miguel Ángel Moncada Malagón^{1*}, José Eduardo Gaspar Badillo¹,
Juan Manuel Ramos Arreguín¹, Jesús Carlos Pedraza Ortega¹,
Marco Antonio Aceves Fernández¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro

*Autor de correspondencia:
moncada.mma1@gmail.com

RESUMEN

La presencia de grandes cantidades de partículas acumuladas en la atmósfera produce baja visibilidad en las imágenes. A este efecto se le conoce como hazing. Uno de los métodos más eficientes encontrados en la literatura que utiliza una imagen única como entrada, es decir, que no requiere información adicional de la imagen, es el algoritmo del Dark Channel Prior (DCP), el cual está basado en obtener el canal oscuro o dark channel para remover este efecto. En este trabajo se presenta la metodología y arquitectura en VHDL para obtener solamente del canal oscuro en una tarjeta Nexys 4 de Xilinx que posteriormente puede ser usado para implementar el algoritmo de dehazing DCP. El sistema embebido resultante de la metodología permite almacenar las imágenes tanto en memoria Flash como en bloques de memoria RAM. Las imágenes resultantes se muestran mediante el puerto VGA del FPGA hacia un monitor con una resolución de 640x480 pixeles con 12 bits de color.

Palabras clave: dehazing, canal oscuro, FPGA, VHDL, visión por computadora, procesamiento de imágenes

ABSTRACT

The presence of large amounts of particles accumulated in the atmosphere results in low visibility in images. This effect is known as hazing. One of the most efficient methods found in the literature, which uses a single image as an input, that is, that does not require additional image information, is the Dark Channel Prior (DCP) algorithm, which is based on obtaining the dark channel to remove this effect. This paper presents the methodology and architecture in VHDL for obtaining only the dark channel on a Nexys 4 FPGA by Xilinx which can later be used to implement the DCP dehazing algorithm. The embedded system resulting from the methodology allows the images to be stored

both in Flash memory and in blocks of RAM, the resulting images are displayed through the FPGA VGA port to a monitor with a resolution of 640 x 480 pixels with 12 color bits.

Keywords: dehazing, dark channel prior, FPGA, VHDL, computer vision, image processing

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el procesamiento digital de imágenes es un área de interés para los investigadores debido a su inmenso campo de acción, el cual va desde la mejora de la calidad de una imagen hasta el procesamiento del más alto nivel como lo es la clasificación de objetos, y a las situaciones a las que se enfrentan. En ocasiones la presencia de grandes cantidades de partículas acumuladas en la atmósfera produce baja visibilidad en las imágenes. A este efecto se le conoce como hazing. Esta baja visibilidad en las imágenes afecta la precisión de las técnicas de visión por computadora como la detección de objetos, el seguimiento de rostros, el reconocimiento de matrículas, entre otras, así como en tareas relacionadas con sistemas de vigilancia y sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS, por sus siglas en inglés). Es por esto que surge la necesidad de métodos para resolver este problema, que se desarrollan en años recientes y son nombrados como algoritmos de dehazing.

En la literatura, diversos métodos han sido propuestos para tratar este problema. En 2008 Tan observa que una imagen libre de hazing debería tener un contraste más alto por lo que remueve el haze maximizando el contraste local de la imagen. Los resultados son visualmente buenos, pero pueden llegar a ser no válidos físicamente y el algoritmo generalmente produce imágenes sobresaturadas [1]. En 2011 He propone un algoritmo de dehazing basado en el Dark Channel Prior (DCP) para estimar el mapa de transmisión de la imagen y obtiene resultados satisfactorios (véase Figura 1). Su principal desventaja



es que el proceso es lento y no puede ser usado en sistemas de tiempo real, además sus resultados sufren de halos alrededor de bordes [2]. Más adelante, para corregir estos halos en 2012, He lleva a cabo una variación del DCP donde toma en cuenta que los dispositivos de captura realizan ajustes automáticos como el balance de blancos por lo que propuso solucionar estos problemas al aplicar una corrección de balance de blancos y al descomponer la imagen en dos componentes: la luz reflejada en la imagen y la luz ambiental [3].

Recientemente se han reportado ampliamente trabajos relacionados con el uso del Dark Channel Prior. En 2016 Zhang & Zao proponen un método de dehazing en tiempo real, basado en el canal oscuro. Se emplea un método aproximado para estimar la luz atmosférica y el mapa de transmisión. Para aplicaciones de sistemas embebidos, propusieron una arquitectura de hardware en una FPGA Stratix con una velocidad de pro-

cesamiento de 116 MHz. Los resultados de la simulación indicaron que el hardware es altamente eficiente, ya que se obtienen buenos resultados de recuperación de imágenes y se satisfacen los requisitos en tiempo real inclusive para imágenes de gran tamaño [4]. En 2018 Salazar propone un algoritmo de dehazing basado en el DCP, donde su principal contribución se relaciona con el bajo tiempo de procesamiento obtenido mediante la combinación de morfología matemática, filtrado gaussiano y el DCP que son algoritmos de baja complejidad informática [5].

Como se puede observar el algoritmo de DCP es de interés para la comunidad científica, habiéndose desarrollado variantes del mismo, sin embargo, se habla poco de su implementación en sistemas embebidos para procesamiento en tiempo real. Este trabajo muestra una arquitectura en un FPGA para calcular el canal oscuro que es esencial para el algoritmo de DCP.

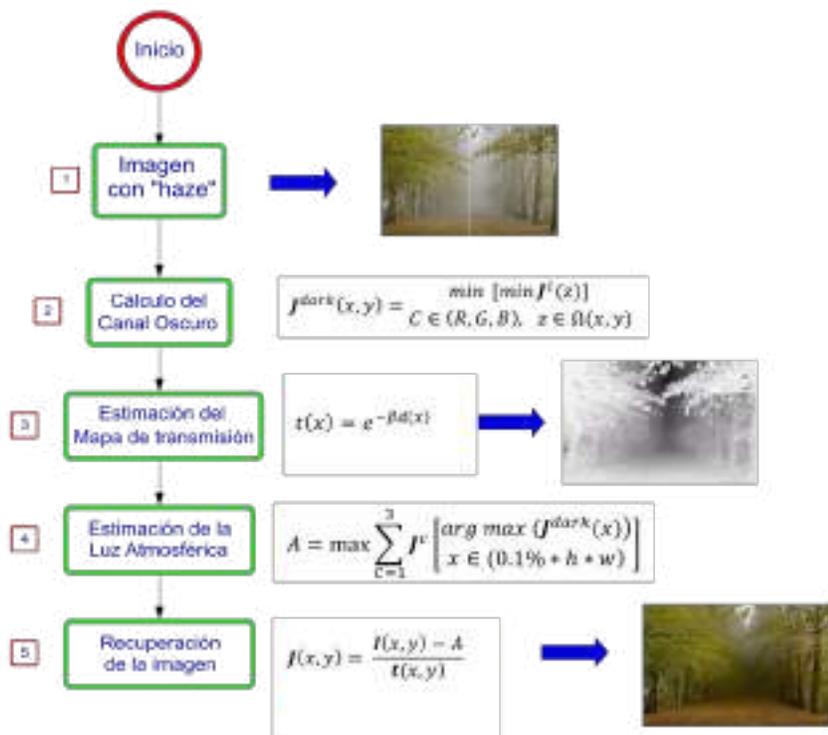


Figura 1. Algoritmo de dehazing con el DCP [2].

METODOLOGÍA

La metodología consiste en realizar una arquitectura estructural en VHDL. Los principales componentes de esta arquitectura son la adquisición de las imágenes entre el PC y el FPGA vía serial, el almacenamiento de las imágenes en memoria RAM y memoria FLASH, y el controlador de video VGA para mostrar las imágenes directamente del FPGA.

Arquitectura en el FPGA

El procesar imágenes en un FPGA requiere de un modelo generalizado que interactúe entre la PC, el FPGA y un monitor VGA para visualizar las imágenes, por lo cual se diseña el modelo de la Figura 2.

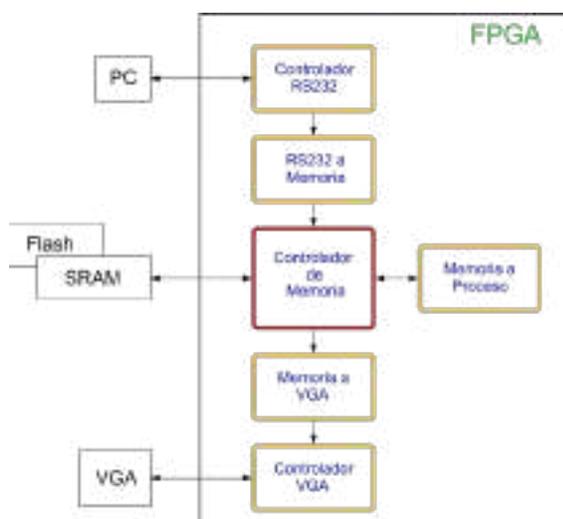


Figura 2. Diagrama a bloques del modelo generalizado para procesamiento de las imágenes en FPGA.

Este modelo se implementa en la Nexys 4 y se describe de la siguiente manera: sistema modular que adquiere las imágenes RGB mediante el puerto RS232, donde un controlador de memoria se encarga del almacenamiento de las imágenes en memoria Flash que, a su vez, se comunica con la memoria RAM para almacenar valores

temporales generados durante los procesos y, finalmente, un controlador de VGA permite mostrar las imágenes en un monitor.

Almacenamiento en el FPGA

El almacenamiento de las imágenes se lleva a cabo tanto en la memoria Flash como en bloques de memoria RAM, debido a que se almacenan las imágenes recibidas del PC en la memoria Flash. De esta forma no es necesario transmitir las imágenes en cada nuevo experimento. Mientras que los bloques de memoria RAM se utilizan para almacenar los cálculos y operaciones que se realizaron durante los procesos que se aplican a las imágenes. La arquitectura para el almacenamiento se muestra a continuación en la Figura 3.

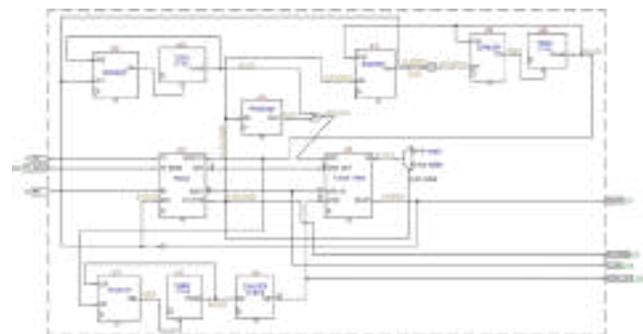


Figura 3. Diagrama de bloques de la arquitectura en hardware para el almacenamiento en memoria RAM y Flash.

Los datos se transmiten vía serial mediante una interfaz creada en Visual Studio 2017, que permite transferir los datos de los canales RGB de cada uno de los píxeles a una velocidad de 115,200 baudios. El puerto VGA de la Nexys 4 DDR es de 12 bit de color por lo que cada píxel de la imagen se envía como dos arreglos de la forma: [RRRRGGGG] y [BB-BBXXXX], donde en un arreglo se envían los canales rojo y verde y en el otro arreglo el canal azul.



Conexión VGA entre monitor y FPGA

La tarjeta Nexys 4 tiene un conector VGA de 12 bits de color, sin embargo, se desea tener una mayor gama de colores para mostrar las imágenes con una mayor fidelidad, para lo cual se diseña una tarjeta con un conector VGA de 24 bits. El diagrama electrónico se muestra en la Figura 4. Los diagramas de conexión entre el puerto VGA y el FPGA se pueden consultar en el documento Nexys4 DDR™ FPGA Board Reference Manual en la sección VGA Port [7].

La cantidad de colores que se puede tener con n cantidad de bits se describe en la Ecuación 1.

$$n^{\circ} \text{ de colores} = 2^n \text{ bits} \quad (1)$$

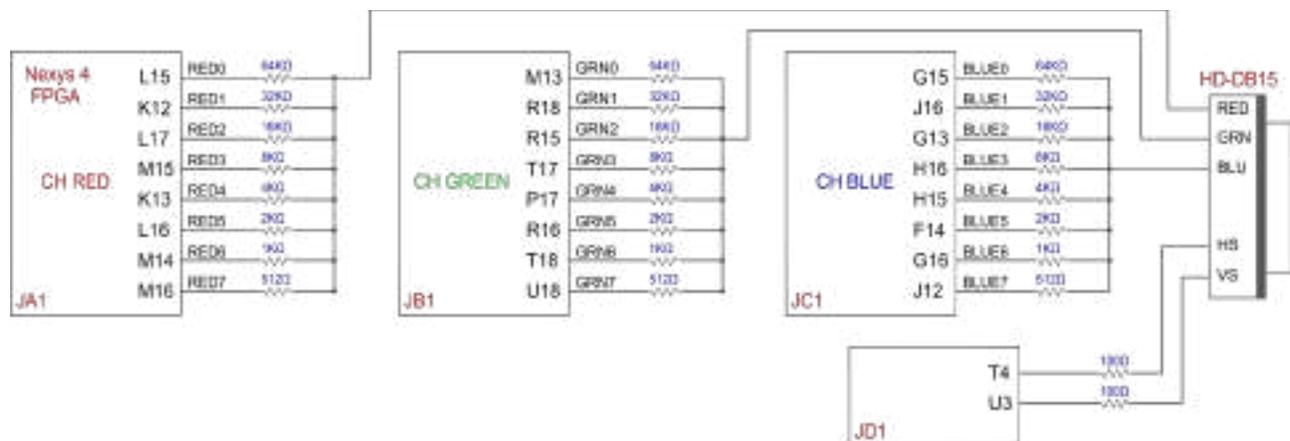


Figura 4. Diagrama de conexiones del puerto VGA externo para conexión con el FPGA.

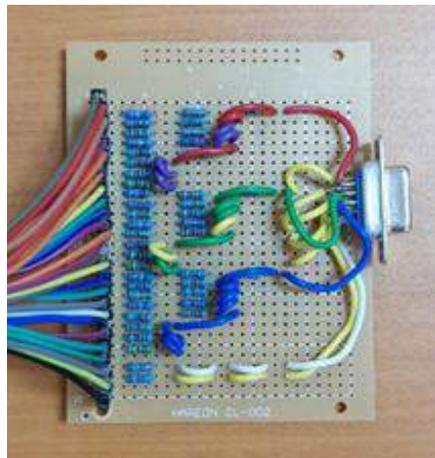


Figura 5. Tarjeta VGA 24 bits de color para conexión entre FPGA y monitor.

Modelo de una imagen con haze

En visión por computadora el modelo que describe a una imagen con haze es el siguiente:

$$I(x) = J(x)t(x) + A(1 - t(x)) \quad (2)$$

Donde:

I = la intensidad observada (imagen con haze).

x = la posición del píxel (x, y).

$J(x)$ = la intensidad real de la escena (imagen sin haze).

A = la luz atmosférica global del aire.

$t(x)$ = llamado mapa de transmisión y describe la porción de luz que llega al sensor de la cámara sin dispersarse o ser absorbida.

Idealmente, es decir, si la atmósfera es homogénea el mapa de transmisión se describe como sigue:

$$t(x) = e^{-\beta d(x)} \quad (3)$$

Donde:

β = el coeficiente de dispersión atmosférica
 $d(x)$ = el mapa de profundidad.

A partir de este modelo se crean las imágenes con haze al tomar como imágenes de entrada la base de datos Kitti. En la Figura 6 se ilustra el proceso para generar las imágenes con haze artificialmente a partir de una imagen y su mapa de profundidad (lidar).

Canal Oscuro Prioritario (DCP)

El canal oscuro prioritario, propuesto por He en 2011, es una característica de imágenes adquiridas en escenas exteriores libres del efecto de hazing. Lo que se observa en estas imágenes es que, en la mayoría de los píxeles, al menos uno de sus canales RGB tiene una intensidad muy baja, cercana al 0. Al considerar lo anterior, para obtener el DCP, se aplica un parche de tamaño n con centro en un píxel, se evalúan los vecinos cercanos a este píxel que se encuentran en un parche de tamaño n con centro en el píxel en cuestión y presentan la misma propiedad, por lo cual,

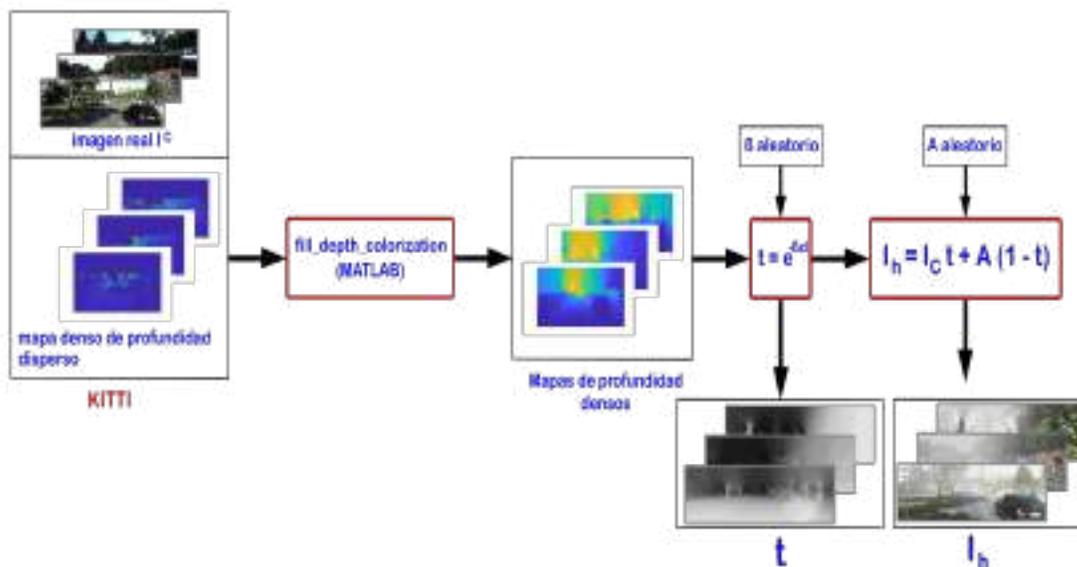


Figura 6. Diagrama para la generación de imágenes con haze usando la base de datos Kitt.



el canal oscuro prioritario se define como: el conjunto más pequeño de valores RGB dentro de un parche de tamaño n , lo que se expresa formalmente en la Ecuación 4 [2].

$$J^{dark}(x, y) = \min_{C \in (R, G, B)} [\min_{z \in \Omega(x, y)} J^c(z)] \quad (4)$$

Donde:

- J^c = un canal de color de J (R, G o B)
- $\Omega(x, y)$ = un parche local de tamaño n centrado en (x, y)
- z = el índice del pixel dentro del parche

Canal Oscuro (DC)

Si se aplica un parche de tamaño $n=1$, la Ecuación 4 se reduce a encontrar solamente el valor mínimo sobre los 3 canales RGB, con lo cual se obtiene el canal oscuro. El canal oscuro es la representación más básica del DCP. En este trabajo se obtiene el canal oscuro de

una imagen con haz y se pretende aplicar parches de diferentes tamaños como $n=3, 5, 7, 9$ en futuros trabajos.

Implementación del DC en el FPGA

La arquitectura de hardware para obtener el canal oscuro es una arquitectura estructural con un controlador de VGA, un bloque de RAM que se creó con el catalogo IP de vivado, un módulo que separa los 3 canales RGB y el módulo que se encarga de procesar los 3 canales RGB para obtener el canal oscuro (véase Figura 5), mientras que un generador de direcciones se encarga de sincronizar el controlador de VGA y el acceso al bloque de RAM.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por la arquitectura que está diseñada en general para procesar las imágenes, primeramente, se realizaron 2 pruebas a las imágenes de entrada: un filtro de binarización y un filtrado de escala de grises. En la Figura 8 se

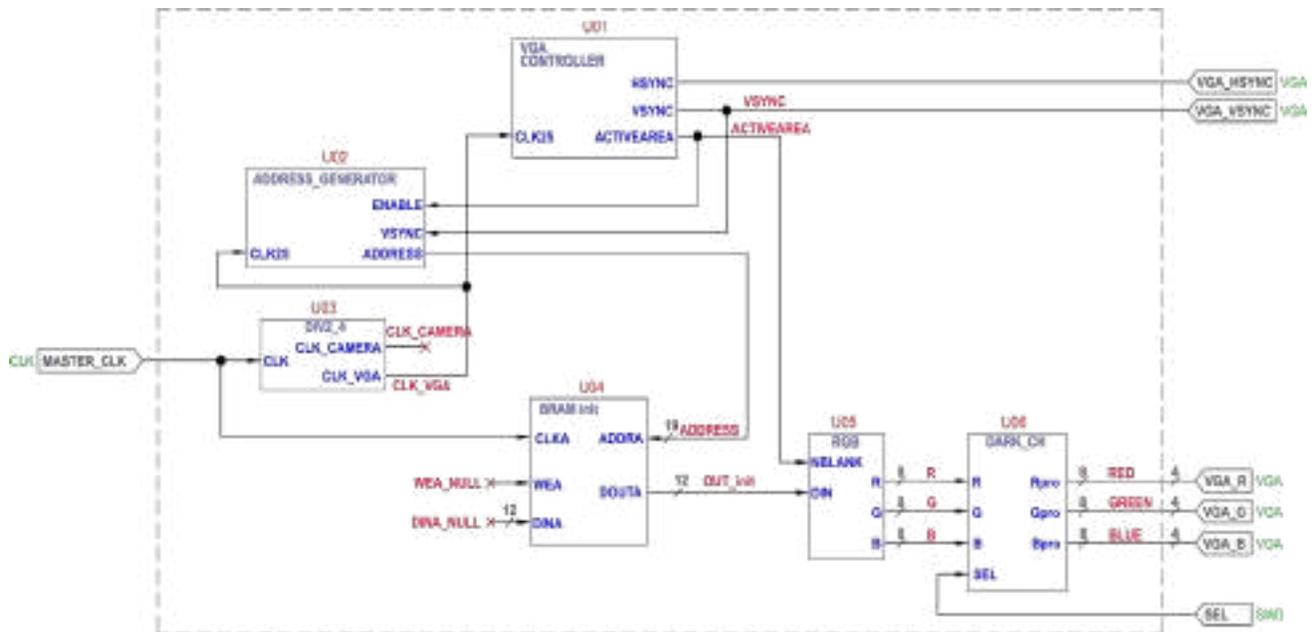


Figura 7. Diagrama de bloques de la arquitectura en hardware para obtener el canal oscuro.

observa en el monitor VGA la imagen de entrada almacenada en el FPGA. En la Figura 9 se observa la imagen de entrada binarizada, mientras que en la Figura 10 se puede observar la misma imagen en escala de grises. Finalmente, en la Figura 11 se presenta el resultado de la obtención del canal oscuro.



Figura 8. Imagen original con haze.

Binarización

La binarización se realizó mediante segmentación por umbral, en la cual los píxeles toman solo uno de dos valores posibles: 0 si el valor del píxel es menor al umbral y 1 si el valor del píxel es mayor o igual al umbral.



Figura 9. Binarización en Nexys 4.

Escala de grises



Figura 10. Escala de grises en Nexys 4.

Canal oscuro

Finalmente se obtuvo el canal oscuro con una sola imagen.



Figura 11. Obtención del DC en Nexys 4.

CONCLUSIONES

Previamente a realizar la arquitectura en el FPGA, se implementó la metodología descrita en el presente trabajo para llevar a cabo dehazing mediante el algoritmo DCP en Matlab, lo cual nos ha servido para analizar las ecuaciones que están implicadas en el algo-



ritmo, y hemos podido analizar cómo interactúan el mapa de transmisión, el Airlight y el Canal Oscuro.

Con los experimentos realizados en Matlab se ha observado que la clave para recuperar una escena sin haze en una imagen es estimar un mapa de transmisión preciso. La implementación del algoritmo en el FPGA ha requerido una arquitectura bien estructurada para interactuar entre la PC, el FPGA y el almacenamiento en las memorias, y se logró diseñar una estructura robusta para realizar el procesamiento de dehazing en futuros trabajos.

Este trabajo pretende crear una base para implementar algoritmos de DCP y sus variantes en sistemas embebidos FPGA, puesto que su aplicación en TR es de gran interés en el área de la visión por computadora en aplicaciones de vehículos autónomos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y a la Universidad Autónoma de Querétaro por su apoyo durante toda esta investigación.

REFERENCIAS

[1] Tan, R. T. (2008, June). Visibility in bad weather from a single image. In 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 1-8). IEEE.

[2] He, K., Sun, J., & Tang, X. (2010). Single image haze removal using dark channel prior. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 33(12), 2341-2353.

[3] He, R., Wang, Z., Xiong, H., & Feng, D. D. (2012, December). Single image dehazing with white balance correction and image decomposition. In 2012 International Conference on Digital Image Computing

[4] Zhang, B., & Zhao, J. (2016). Hardware implementation for real-time haze removal.

IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 25(3), 1188-1192.

[5] Salazar-Colores, S., Ramos-Arreguin, J. M., Echeverri, C. J. O., Cabal-Yepez, E., Pedraza-Ortega, J. C., & Rodriguez-Resendiz, J. (2018). Image dehazing using morphological opening, dilation and Gaussian filtering. *Signal, Image and Video Processing*, 12(7), 1329-1335.

[6] Karlsruhe Institute of Technology (2019). The Kitti Vision Benchmark Suite. <http://www.cvlibs.net/datasets/kitti/>

[7] Digilent, A National Instruments Company (2019). Nexys 4. Digilent Documentation. <https://reference.digilentinc.com/reference/programmable-logic/nexys-4/start>.

La presente edición de
Perspectivas de la Ciencia y la Ingeniería
fue maquetada por Areli Arias Panchenko
en la Coordinación de Diseño e Imagen de la Facultad de Ingeniería
de la Universidad Autónoma de Querétaro.
El cuidado estuvo a cargo de
Soid Lazlo Ruiz, Daniela Pérez y Maria Fernanda Hernández Ortiz.
Se publicó en junio de 2020.
en Santiago de Querétaro, México.

