

REVISTA

# INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA - FACULTAD DE INGENIERÍA CULIACÁN  
MÉXICO 2018

**Estimación de la respuesta probabilística de edificios de acero utilizando redes neuronales artificiales**

Juan Bojórquez Mora, Alfredo Reyes Salazar, Francisco López Almansa

**Análisis de peligro sísmico probabilístico para el Estado de Sinaloa**

Robespierre Chavez Lopez, Edén Bojórquez Mora

**Comportamiento mecánico de adoquines prefabricados con agregados reciclados provenientes de los residuos de la construcción**

Carolina Arredondo Armenta, Olimpia Alvarado Fierro, Carlos Hernán Lora Urias

**Simulación de registros de viento usando modelos de densidad espectral**

Omar Payán-Serrano, Eden Bojórquez Mora



<http://revistaingenieria.uas.edu.mx>

Núm. 1

Marzo 2018 - Agosto 2018



# Índice de Contenido

## **6 Estimación de la respuesta probabilística de edificios de acero utilizando redes neuronales artificiales**

**Estimation of the probabilistic response of steel buildings using artificial neural networks**

Juan Bojórquez Mora, Alfredo Reyes Salazar, Francisco López Almansa

## **16 Análisis de peligro sísmico probabilístico para el Estado de Sinaloa**

**Probabilistic seismic hazard analysis for State of Sinaloa**

Robespierre Chavez Lopez, Edén Bojórquez Mora

## **29 Comportamiento mecánico de adoquines prefabricados con agregados reciclados provenientes de los residuos de la construcción**

**Mechanical behavior of prefabricated pavers with recycled aggregates from construction waste**

Carolina Arredondo Armenta, Olimpia Alvarado Fierro, Carlos Hernán Lora Urías

## **37 Simulación de registros de viento usando modelos de densidad espectral**

**Wind records simulation using spectral density models**

Omar Payán-Serrano, Eden Bojórquez Mora

# REVISTA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UAS

Órgano de difusión de la Facultad de Ingeniería, UAS

**Dr. Juan Eulogio Guerra Liera**  
Rector

**Dr. Jesús Madueña Molina**  
Secretario General

**LAE Y MA. Manuel de Jesús Lara**  
**Salazar**  
Secretario de Administración y Finanzas

**Dr. Mario Nieves Soto**

Director General de Investigación y Posgrado

**Dr. Fernando García Páez**  
Presidente del Colegio de Ingeniería y Tecnología

**Dra. Ilda Elizabeth Moreno Rojas**  
Directora de Editorial UAS

## EDITOR

**Dr. Edén Bojórquez Mora**, Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, Facultad de Ingeniería Culiacán, Calzada de las Américas y Universitarios, s/n, Ciudad Universitaria, 80040 Culiacán Rosales, Sinaloa Culiacán Rosales, Sin., E-mail: [eden@uas.edu.mx](mailto:eden@uas.edu.mx)

## Equipo Editorial

**Lic. Karla Verónica López Ley**, Coordinadora y Responsable de Maquetación.

**Ing. Simón René Ávila López**, Gestor del sitio web.

## Comité Editorial

**Dr. Alfredo Reyes Salazar**

Universidad Autónoma de Sinaloa,  
México

**Dr. Edén Bojórquez Mora**

Universidad Autónoma de Sinaloa,  
México

**Dr. Eduardo René Fernández**  
**González**

Universidad Autónoma de Sinaloa,  
México

**Dr. Fernando García Páez**

Universidad Autónoma de Sinaloa,  
México

**Dr. Jorge Luis Almaral Sánchez**  
Universidad Autónoma de Sinaloa,  
México

**Dr. Amador Terán Gilmore**

Universidad Autónoma Metropolitana,  
México

**Dr. Mauro Pompeyo Niño Lázaro**

Universidad Nacional Autónoma de  
México, México

**Dr. Francisco L. Silva González**

Universidad Nacional Autónoma de  
México, México

**Dr. Julián Carrillo**

Universidad Militar de Nueva Granada,  
Colombia

**Dra. Sonia Elda Ruiz Gómez**

Universidad Nacional Autónoma de  
México, México

**Dr. Gustavo Palazzo**

Universidad Tecnológica Nacional  
de Argentina, Argentina

**Dr. Antonio Formisano**

University of Naples Federico II,  
Napoli, Campania, Italia

**Dr. Francisco López Almansa**

Universidad Politécnica de Cataluña,  
Barcelona, España

**Dr. Ivano Iovinella**

University of Naples Federico II,  
Napoli, Campania, Italia

**Dra. Yu Jiao**

Tokyo Institute of Technology, Japón

**Dr. Julián Londono**

University of Exeter, Reino Unido

# Notas del Presidente del Colegio de Ingeniería y Tecnología

## Estimados lectores:

Para la Universidad Autónoma de Sinaloa es muy satisfactorio presentar este primer número de la Revista Ingeniería y Tecnología UAS con el apoyo de la Dirección de Editorial y de investigadores de la Facultad de Ingeniería de la propia Institución. Esta propuesta está basada en las políticas institucionales del Plan de Consolidación global 2021 en lo relacionado al eje 6 denominado Extensión con Compromiso Social y en forma específica la acción 6.1 que hace referencia a otorgar apoyo a la difusión y extensión de la ciencia como parte fundamental del quehacer universitario.

Es una revista científica que difunde las investigaciones en el área de las ingenierías tanto de esta universidad como de otras instituciones de educación superior nacionales y del extranjero, pretende ser un instrumento de comunicación



abierta a toda la comunidad de investigadores interesados en esta área de la ciencia. El principal objetivo es contribuir a la difusión del trabajo científico y de calidad, para ello el consejo editorial de la misma cuenta con la colaboración de expertos reconocidos en la materia y cuidadosos de establecer criterios de calidad. Por ello, en cada ejemplar publicado se hará una revisión exhaustiva y anónima por parte de

investigadores con reconocida solvencia académica.

La revista tendrá una periodicidad semestral con acceso abierto y gratuito permitiendo la transferencia de conocimiento al mundo académico y a la sociedad en general, nace la revista con resultados de investigaciones llevadas a cabo por investigadores de la Facultad de Ingeniería.

Confiamos en que los contenidos de este número sean de su interés y que les resulten de utilidad para estudios y publicaciones futuras. Así mismo, los invito a participar en próximos números y a registrarse como usuarios de la misma, la convocatoria está abierta. Bienvenidos sean todos.

**Muchas gracias.**

**Dr. Fernando García Páez**  
**Presidente del Colegio de**  
**Ingeniería y Tecnología.**

## Agradecimientos

Los miembros de la Revista RIT-UAS queremos agradecer a las personas e instituciones que han hecho posible esta nueva revista electrónica.

Debemos nuestra gratitud ante todo al **Dr. Juan Eulogio Guerra Liera**, Rector de la Universidad Autónoma de Sinaloa, a la **Dra. Ilda Elizabeth Moreno Rojas**, Directora de Editorial UAS y al **Dr. Mario Nieves Soto**, Director General de Investigación y Posgrado, por su apoyo al inicio del proceso de la preparación y creación de esta revista.

Agradecemos al **Centro de Computo Universitario** por el espacio que nos han brindado en sus servidores. Además, apreciamos las horas de trabajo y la ayuda técnica de **Jazmín Jacobo Cota**, **Yamel Adriana Cárdenas Aragón** en diseño y fotografía y el apoyo técnico del alumno **Brandon Raúl Espinoza Payan**.

A todos ellos, **¡gracias!** por hacer posible la publicación de la revista RIT-UAS.

## Perfil del Editor

### Dr. Eden Bojórquez Mora

Profesor Investigador de Tiempo Completo Titular C de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Obtuvo el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Sinaloa con mención honorífica. Posteriormente cursó estudios de Maestría y Doctorado en Ingeniería en el Instituto de Ingeniería de la UNAM donde obtuvo el grado con mención honorífica.

**PREMIO** a la mejor tesis Doctoral en el sexto Concurso Nacional de Tesis de Doctorado (2009) otorgado por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. **PREMIO** por el artículo más sobresaliente de la Revista de Ingeniería Sísmica (Revista Científica de Excelencia por CONACYT) durante el periodo 2009-2010 como autor único, otorgado por el Presidente de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica Dr. Jorge Aguirre González. **PREMIO** por dirigir la mejor tesis de Posgrado a nivel Estado otorgado por INAPI 2013-2014 y las mejores tesis de Licenciatura a nivel nacional relacionadas a la Ingeniería Estructural por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. Realizó una estancia Posdoctoral en el Departamento de Ingeniería Estructural de la Universidad de Nápoles Federico II en Italia. Profesor-Investigador repatriado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Sinaloa (2008-2009). **Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores**, y miembro honorífico del Sistema Sinaloense de Científicos y Tecnólogos, así como del **Cuerpo Académico Consolidado de Estructuras y Mecánica Básica**. Autor de más de 200 artículos en Revistas Científicas y Congresos Nacionales e Internacionales. Ha sido director de más de 50 tesis de Licenciatura, Maestría y Doctorado, actualmente dirige varias tesis de Maestría y de Doctorado incluyendo estudiantes de distintas



universidades, y ha supervisado a más de 20 estudiantes durante veranos de la investigación científica. Es revisor de las revistas Earthquakes and Structures, Earthquake Spectra, Bulletin of Earthquake Engineering, Engineering Structures, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Wind and Structures, Journal of Civil Engineering de Korean Society of Civil Engineering KSCE, Ingeniería, Investigación y Tecnología editada por la Facultad de Ingeniería de la UNAM e Ingeniería Civil Sostenible, DYNA Colombia entre otras, así como Revisor de artículos para el 15th World Conference on Earthquake Engineering y Moderador en eventos académicos. Miembro del Comité Científico del 16th World Conference on Earthquake Engineering, ha dado varias conferencias incluyendo magistrales en países como Emiratos Árabes Unidos (en Dubai). Es miembro del Registro CONACYT de Evaluadores Acreditados RCEA y de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. Ha participado en la evaluación de proyectos de investigación de ciencia básica del CONACYT, así como en la evaluación de proyectos de investigación del Programa de Fomento y Apoyo a Proyectos de Investigación PROFAPI de la Dirección General de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Es revisor de proyectos para asignar fondos a grupos de investigación por parte del **Ministerio Italiano de**

**Educación.** Coordinador de la apertura de la Maestría y Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en la Facultad de Ingeniería Culiacán de la Universidad Autónoma de Sinaloa 2009. Participó en la elaboración de los Proyectos de Maestría y Doctorado en Ciencias de la Ingeniería para su incorporación al Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT (ambos pertenecen al Padrón de excelencia del CONACYT). **Actualmente, es el Coordinador de la Maestría y Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en la unidad Culiacán y es miembro del Comité Académico y Núcleo Académico Básico de dichos Programas.** Es el **Editor de la Revista de Ingeniería Sísmica** de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica la más prestigiosa en el mundo en su área escrita en español. En 2016 fue Galardonado con el Premio **Ingeniero Civil del Año** otorgado por el Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Sinaloa 2016-2017. Actualmente se desempeña como **VICEPRESIDENTE** de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.

Entre sus aportaciones científicas destaca la *creación de una nueva medida de intensidad sísmica (Intensidad IB) representativa del potencial destructivo de un terremoto*, la cual está siendo reconocida por investigadores de las instituciones más prestigiadas a nivel mundial tales como las Universidades de Stanford en Estados Unidos, Imperial College de Londres, Bolonia, Pavia y Nápoles en Italia, Grenoble Francia, entre otras. Actualmente, el Dr. Bojórquez está trabajando en la generación de registros sísmicos, de viento, mapas de peligros naturales, fragilidad de estructuras, edificios con disipadores de energía, diseño sismo-resistente sustentable y otros temas encaminados al futuro desarrollo de un Reglamento de Construcción específico para los Municipios del Estado de Sinaloa.

# Estimación de la respuesta probabilística de edificios de acero utilizando redes neuronales artificiales

## Estimation of the probabilistic response of steel buildings using artificial neural networks

Juan Bojórquez Mora<sup>1\*</sup>, Alfredo Reyes Salazar<sup>1</sup>, Francisco López Almansa<sup>2</sup>

### RESUMEN

Se presenta un enfoque para obtener con una precisión aceptable factores de transformación probabilísticos mediante el entrenamiento de un modelo de red neuronal artificial (RNA). Los factores de transformación probabilísticos se definen como la relación entre la respuesta sísmica de estructuras de múltiples grados de libertad (SMGL) y sus sistemas equivalentes de un grado de libertad (S1GL), asociadas a una tasa de excedencia anual prescrita. El enfoque se utiliza para predecir la respuesta sísmica de edificios de acero. Se proponen ecuaciones útiles para obtener factores de transformación probabilísticos en términos de la ductilidad y la distorsión máxima de entrepiso, se establecen como función de la tasa media anual de excedencia y del período fundamental de vibración. Se muestra que las redes neuronales artificiales son una herramienta útil para los procedimientos de diseño sísmico basados en la confiabilidad estructural y para mejorar la próxima generación de metodologías de diseño sísmico.

Recibido: septiembre 2017  
Aceptado: octubre 2017  
Publicado: marzo 2018

### ABSTRACT

An approach to obtain with acceptable accuracy probabilistic response transformation factors by training an artificial neural network (ANN) model is presented. The transformation factors are defined as the ratio of the seismic response of multi-degree-of-freedom structures and their equivalent single-degree-of-freedom systems, associated with a given annual exceedance rate. The approach is used for predicting the seismic response of steel framed buildings. Closed-form expressions to obtain probabilistic response transformation factors for maximum ductility and inter-story drift, as functions of their mean annual rate of exceedance, and of the fundamental vibration period of the structure, are proposed. It is shown that artificial neural networks are a useful tool for reliability-based seismic design procedures of framed buildings and for the improvement toward the next generation of earthquake design methodologies based on structural reliability.

### Palabras Clave:

redes neuronales artificiales, confiabilidad estructural, edificios de acero, factores de transformación probabilísticos de respuesta sísmica.

### Keywords:

artificial neural network, structural reliability, steel buildings, probabilistic seismic response transformation factors

## 1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los códigos de diseño sísmico se basan en parámetros que se centran en satisfacer restricciones deterministas para lograr un diseño satisfactorio; sin embargo, debido a la naturaleza incierta de los terremotos y sus efectos sobre las estructuras, estos criterios de diseño no pueden ser considerados como la mejor alternativa para resolver el problema del diseño sísmico. Un diseño más realista debe tener en cuenta todos los parámetros aleatorios, incluyendo la probabilidad de falla de la estructura durante un intervalo de tiempo dado; es decir, su confiabilidad estructural. En las últimas décadas varios investiga-

\*Autor para correspondencia.

Dirección de correo electrónico: Juan Bojórquez Mora, [juanbm@uas.edu.mx](mailto:juanbm@uas.edu.mx)

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Sinaloa, FIC, Culiacán Rosales, Sinaloa, México. C.P. 80040

<sup>2</sup>Universidad Politécnica de Cataluña, España

dores han desarrollado procedimientos para resolver problemas de confiabilidad estructural utilizando diferentes métodos [1, 2]. Hoy en día, a pesar de que las metodologías de confiabilidad estructural son muy comunes, hay serios obstáculos en las implementaciones prácticas, especialmente porque uno de los principales requisitos de los códigos de diseño sísmico es su fácil aplicación por los ingenieros estructurales. Por lo tanto, el uso de modelos prácticos o modelos simplificados como S1GL que representan con suficiente precisión el comportamiento estructural de SMGL, es una buena alternativa para la implementación práctica de la confiabilidad estructural. La relación entre la respuesta sísmica de SMGL y la de su sistema equivalente, de un grado de libertad asociado a una tasa de excedencia similar de un parámetro de respuesta se define como el factor de transformación probabilística ( $T_p$ ). Bojórquez et al.[3] encontró factores de transformación probabilística entre la respuesta sísmica de SMGL y su equivalente S1GL; sin embargo, los resultados se limitaron a algunos modelos. En el presente trabajo se presenta un nuevo enfoque para reducir el trabajo computacional necesario en el análisis, de tal manera que es posible analizar cientos de edificios de acero. La metodología utilizada se basa en el uso de modelos redes neuronales artificiales.

En los últimos años los métodos de RNA han sido utilizados ampliamente para tratar problemas de confiabilidad estructural. Papadrakakis et al.[4] aplicaban las RNA para estimar la confiabilidad de estructuras con un modelo elástico-plástico; Papadrakakis y Lagaros[5] utilizaron un modelo de red neural de retro-propagación orientado a la optimización sistemas estructurales complejos. Un dispositivo numérico para la evaluación de la confiabilidad de sistemas estructurales se desarrolló utilizando el modelo “feed-forward” [6]. Cardoso et al.[7] utilizó una metodología para calcular la probabilidad de falla estructural mediante la combinación de RNA y la simulación Montecarlo. Möller et al.[8] utilizó un modelo de RNA para optimizar el costo total de una estructura bajo restricciones relacionadas con confiabilidades mínimas especificadas para diferentes estados límite. La predicción del daño estructural inducida por sismo se estimó mediante un modelo de RNA utilizando el entrenamiento “backpropagation” [9]. Serkan et al.[10] propuso un modelo eficiente para predecir la capacidad de vigas de concreto reforzado. Chin-Sheng y I-Cheng desarrollaron un programa de cómputo para la optimización estructural que se basa en la teoría de RNA [11].

Por lo tanto, las redes neuronales artificiales se pueden utilizar para dar una respuesta razonable a los problemas que tienen soluciones no lineales y complejas. Información adicional sobre RNA se puede encontrar en [12, 13]. El objetivo del presente estudio es desarrollar un conjunto de ecuaciones aplicables a la evaluación de los factores de transformación probabilísticos de la respuesta sísmica mediante un modelo basado en la teoría de las RNA.

## 2. REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Las Redes Neuronales Artificiales surgen de la necesidad de dar solución a problemas complejos, no como una secuencia de pasos, sino como la evolución de unos sistemas computacionales inspirados en el cerebro humano, y dotados por tanto de cierta “inteligencia”. Una RNA es un modelo matemático o un modelo computacional que se inspira en la estructura y aspectos funcionales de redes neuronales biológicas. La estructura de una RNA es la siguiente: las neuronas son el elemento principal de procesamiento estas se conectan con otras neuronas por medio de una señal de peso (sinapsis), las entradas son las dendritas y el resultado es el axón (ver Figura 1). Al igual que los seres vivos las RNA parten de un proceso de aprendizaje para establecer relaciones entre las variables que definen un fenómeno específico. La potencia de procesamiento de una RNA se debe a su estructura paralela distribuida, y su capacidad de aprender de algunos ejemplos, obteniendo resultados aceptables

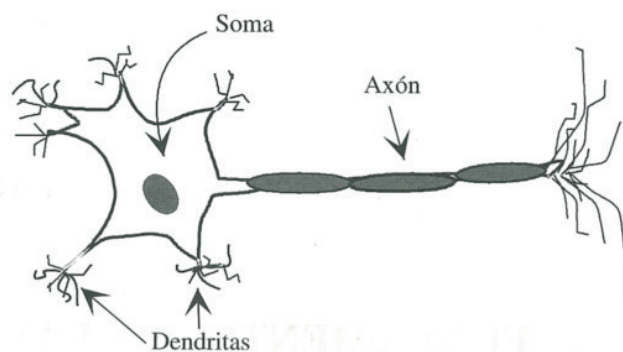


Figura 1. Estructura de una neurona

para patrones nunca antes presentados a la misma.

Existen diferentes topologías establecidas por diferentes autores para definir la estructura de las RNA; sin embargo, en este trabajo se seleccionó el Perceptrón Multicapa con conexión hacia adelante [14]. En

la Figura 2 se muestra la arquitectura correspondiente al Perceptrón Multicapa. La arquitectura comienza con una capa de entrada la cual se conecta a una capa oculta, a su vez esta puede estar conectada a otra capa oculta o directamente a la capa de salida. Debido a que el flujo de información es siempre de la capa de entrada hacia la capa de salida, la información de las neuronas es únicamente con los elementos de la capa siguiente.

El entrenamiento de la RNA utilizada en este estu-

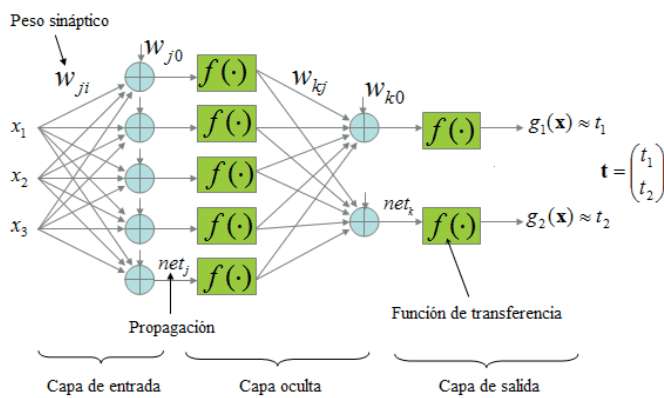


Figura 2. Perceptrón Multicapa

dio se llevó a cabo mediante el algoritmo “Backpropagation” propuesto por Rumelhart et al. [15]. El procedimiento es el siguiente:

1) Se proporciona a la red para su aprendizaje un conjunto de patrones constituidos por pares de entradas y salidas.

2) La información de los datos de entrada se introduce a través de la primera capa. Esta información se propaga por la red mediante una regla de propagación, las entradas se multiplican por los pesos de la conexión entre capas, la salida es transformada por una función no lineal y transferida a la siguiente capa (existen varias funciones de transferencia entre las que se pueden señalar: escalón, lineal, mixta, Gaussiana, tangente hiperbólica, secante hiperbólica y sigmoidea). Es importante mencionar que muchas de las investigaciones han utilizado una función de transferencia sigmoidea en las capas ocultas y una función lineal en la capa de salida obteniendo resultados satisfactorios. Por este motivo aquí se seleccionan estas

funciones de transferencia. El mismo procedimiento se aplica para las siguientes capas hasta obtener la salida de la red.

3) El resultado obtenido se compara con los valores objetivo y se estima el error.

4) El error en la capa de salida se propaga hacia atrás partiendo de la capa de salida, pasando por las capas ocultas hasta alcanzar la entrada, de tal manera que todas las neuronas reciben un cierto porcentaje de error.

5) Considerando la cantidad recibida, cada neurona realiza un ajuste a los pesos de sus conexiones con otras.

6) El procedimiento se repite con otros pares de entradas hasta que el error es menor que una tolerancia establecida.

### 3. CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL

La confiabilidad estructural puede ser estimada mediante diferentes enfoques, en este artículo se utiliza la curva de peligro sísmico que representa el número medio anual de eventos sísmicos cuya intensidad excede a cierto valor dado. A partir de esta curva se puede calcular la probabilidad condicional de que un evento sísmico aleatorio presente una intensidad mayor o igual a un valor dado en cierto intervalo de tiempo. Esta probabilidad se puede obtener como la relación entre el número medio anual de sismos cuya intensidad excede el valor de interés, y el número medio anual del total de los eventos.

Si se supone que la ocurrencia de los eventos sísmicos (que provocan daño estructural) puede representarse por un proceso homogéneo de Poisson, es posible plantear una ecuación que permita evaluar el número medio de sismos por unidad de tiempo, que causan en la estructura daños superiores a cierto valor  $d$ , como sigue [16], (ver Ecuación 1):

$$\lambda_D(d) = \int_0^{\infty} -\frac{d}{dy} \lambda(y) P[D > d | Y = y] dy \quad (1)$$

donde:

$\lambda_y(y)/dy$  es la derivada de la curva de peligro sísmico,  $y$  es la intensidad.

$P[D > d | Y = y]$  es la probabilidad condicional de que la demanda exceda cierto valor, dado que se presentó una intensidad  $Y=y$ .

$\lambda(d)$  es el número de veces por año que se excede el parámetro  $d$ , probabilidad anual de excedencia.

#### 4. FACTORES DE TRANSFORMACIÓN PROBABILÍSTICOS

La probabilidad anual de excedencia de un SMGL puede estimarse si se conoce la probabilidad anual de excedencia de su S1GL equivalente. Para ello, es necesario conocer la relación entre las respuestas de ambos sistemas estructurales para una misma tasa de excedencia  $\lambda_0$ , que en este trabajo se denominan factores de transformación. Estos toman en cuenta la diferencia entre ambos sistemas estructurales (ver Figura 3), dada la misma probabilidad de excedencia.

En estudios previos se han calculado funciones de transformación que relacionan las respuestas máximas entre marcos estructurales de SMGL y S1GL en tér-

minos de distintos parámetros [17-19] para una misma tasa anual de excedencia; sin embargo, hasta ahora no se ha obtenido ninguna función de transformación que relacione las respuestas en términos de ductilidad máxima y distorsiones máximas de entrepiso y que sean aplicables a edificios de mediana altura ubicados en la zona blanda del valle de México. Además, tampoco se han utilizado RNA para este tipo de estudios.

En el presente estudio, el  $T_p$  para la ductilidad máxima y para la distorsión máxima de entrepiso se obtienen a través de las ecuaciones (2) y (3). En estas ecuaciones,  $T_{p\mu}$  y  $T_{p\gamma}$  son el factor de transformación probabilístico para la ductilidad máxima y para la distorsión máxima de entrepiso, respectivamente;  $\mu_{SMGL}(\lambda_\mu)$  y  $\mu_{S1GL}(\lambda_\mu)$  son los valores de la demanda de ductilidad máxima para los SMGL y S1GL asociados con alguna tasa anual específica de excedencia de la ductilidad máxima;  $\mu_{MGDL}(\lambda_\gamma)$  y  $\mu_{S1GL}(\lambda_\gamma)$  son los valores de la máxima demanda de distorsión máxima de entrepiso para los SMGL y S1GL asociados con alguna tasa anual específica de excedencia de la distorsión máxima de entrepiso, respectivamente.

$$T_{p\mu} = \frac{\mu_{SMGL}(\lambda_\mu)}{\mu_{S1GL}(\lambda_\mu)} \quad (2)$$

$$T_{p\gamma} = \frac{\mu_{MGDL}(\lambda_\gamma)}{\mu_{S1GL}(\lambda_\gamma)} \quad (3)$$

#### 5. MODELOS ESTRUCTURALES Y REGISTROS SÍSMICOS

En este trabajo se analizan cinco marcos de acero de 4, 6, 8, 10 y 14 niveles diseñados con el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal. Para todos los marcos se utilizó un factor de comportamiento sísmico de  $Q=3$ . Como se muestra en la Figura 4, los marcos tienen tres crujeías de 8m cada una, y una altura de entrepiso de 3.5m. Se usó acero A-36 en las vigas y columnas de los marcos. Las características geométricas globales de los marcos se muestran en la Figura 4.

Para cada marco estructural se obtuvo un S1GL equivalente que representa sus características dinámicas. La manera en que se obtuvieron los S1GL equivalentes fue igualando tanto el periodo de vibración, como el cortante basal a la fluencia y el porcentaje de amortiguamiento crítico de los marcos estructurales

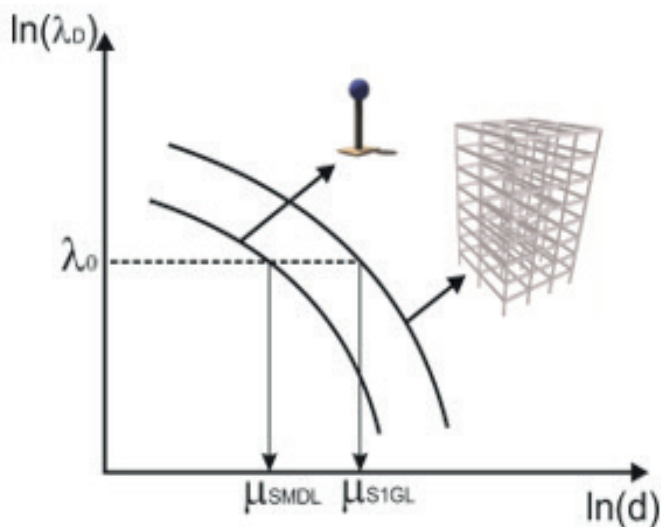


Figura 3. Ejemplo de curvas de peligro de demanda estructural para un SMGL y su correspondiente S1GL equivalente

de acero y los S1GL (5% del amortiguamiento crítico). Tanto el cortante basal resistente como el des-

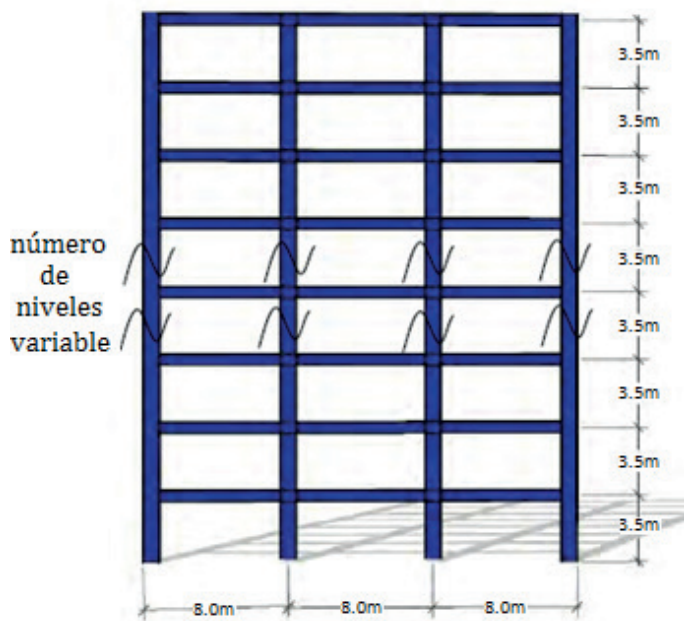


Figura 4. Geometría de los marcos utilizados

plazamiento de fluencia de cada marco se obtuvieron mediante un análisis de empuje lateral estático no-lineal ("push-over", en inglés) utilizando el programa RUAUMOKO [20] (ver Figura 5). Para el análisis, se consideró un modelo histerético bilineal con 3% de rigidez de post-fluencia.

Tabla 1. Periodo fundamental de vibración ( $T_0$ ), coeficiente sísmico resistente ( $C_y$ ) y desplazamiento de fluencia ( $\delta_y$ ), correspondientes a los marcos analizados

| Marco | $T_1$ (seg) | $C_y$ | $\delta_y$ (m) |
|-------|-------------|-------|----------------|
| F4    | 0.9         | 0.48  | 0.13           |
| F6    | 1.07        | 0.42  | 0.17           |
| F8    | 1.2         | 0.38  | 0.19           |
| F10   | 1.37        | 0.36  | 0.23           |
| F14   | 1.91        | 0.25  | 0.3            |

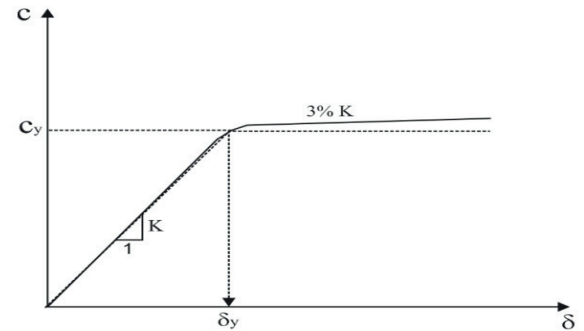


Figura 5. Gráfica coeficiente basal vs desplazamiento de azotea. Modelo de comportamiento bilineal

### 5.1 Registros sísmicos

Los dos enfoques descritos anteriormente para obtener los factores de transformación probabilísticos se aplican a cinco estructuras de acero regulares que fueron diseñadas de acuerdo con el Código de Diseño de la Ciudad de México, 2004 [21] y sometidas a 30 movimientos de suelo blando registrados en la Zona del Lago de la Ciudad de México. El suelo tiene un período dominante ( $T_s$ ) de dos segundos. En particular, todos los movimientos se registraron en la Ciudad de México durante eventos sísmicos con magnitudes cercanas a 7 o mayores. La Tabla 2 resume las características principales de los registros sísmicos. En esta tabla,  $A_{ms}$  y  $V_{ms}$  representa la aceleración y velocidad máxima del terreno.

## 6. MODELO DE RED NEURAL ARTIFICIAL

La selección de una arquitectura de modelo ANN adecuada es una tarea compleja. La selección del número de capas ocultas y neuronas es importante para desarrollar o entrenar una RNA. Esta selección depende de la naturaleza del problema a investigar y, a menudo, se sigue un proceso de ensayo y error para determinar la estructura adoptada del modelo de RNA. En este trabajo se probaron varios modelos de RNA preliminares considerando de 1 a 30 capas y 10 a 30 neuronas en la capa oculta. Se propusieron dos modelos de RNA para la máxima ductilidad y el otro para la máxima distorsión de entrepiso.

Tabla 2. Registros sísmicos utilizados

| Registro | Fecha      | Magnitud | $A_{ms}$ (cm/s <sup>2</sup> ) | $V_{ms}$ (cm/s) |
|----------|------------|----------|-------------------------------|-----------------|
| 1        | 19/09/1985 | 8.1      | 178.0                         | 59.5            |
| 2        | 21/09/1985 | 7.6      | 48.7                          | 14.6            |
| 3        | 25/04/1989 | 6.9      | 45.0                          | 15.6            |
| 4        | 25/04/1989 | 6.9      | 68.0                          | 21.5            |
| 5        | 25/04/1989 | 6.9      | 44.9                          | 12.8            |
| 6        | 25/04/1989 | 6.9      | 45.1                          | 15.3            |
| 7        | 25/04/1989 | 6.9      | 52.9                          | 17.3            |
| 8        | 25/04/1989 | 6.9      | 49.5                          | 17.3            |
| 9        | 14/09/1995 | 7.3      | 39.3                          | 12.2            |
| 10       | 14/09/1995 | 7.3      | 39.1                          | 10.6            |
| 11       | 14/09/1995 | 7.3      | 30.1                          | 9.62            |
| 12       | 14/09/1995 | 7.3      | 33.5                          | 9.37            |
| 13       | 14/09/1995 | 7.3      | 34.3                          | 12.5            |
| 14       | 14/09/1995 | 7.3      | 27.5                          | 7.8             |
| 15       | 14/09/1995 | 7.3      | 27.2                          | 7.4             |
| 16       | 09/10/1995 | 7.5      | 14.4                          | 4.6             |
| 17       | 09/10/1995 | 7.5      | 15.8                          | 5.1             |
| 18       | 09/10/1995 | 7.5      | 15.7                          | 4.8             |
| 19       | 09/10/1995 | 7.5      | 24.9                          | 8.6             |
| 20       | 09/10/1995 | 7.5      | 17.6                          | 6.3             |
| 21       | 09/10/1995 | 7.5      | 19.2                          | 7.9             |
| 22       | 09/10/1995 | 7.5      | 13.7                          | 5.3             |
| 23       | 09/10/1995 | 7.5      | 17.9                          | 7.18            |
| 24       | 11/01/1997 | 6.9      | 16.2                          | 5.9             |
| 25       | 11/01/1997 | 6.9      | 16.3                          | 5.5             |
| 26       | 11/01/1997 | 6.9      | 18.7                          | 6.9             |
| 27       | 11/01/1997 | 6.9      | 22.2                          | 8.6             |
| 28       | 11/01/1997 | 6.9      | 21.0                          | 7.76            |
| 29       | 11/01/1997 | 6.9      | 20.4                          | 7.1             |
| 30       | 11/01/1997 | 6.9      | 16.0                          | 7.2             |

La arquitectura seleccionada se basa en una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida. En la fase de entrenamiento del modelo neural propuesto la capa de entrada se compone de dos neuronas que representan  $T_0$  y la tasa media anual para superar el parámetro de respuesta seleccionado, las capas ocultas están compuesta por 25 neuronas en ambos modelos, la capa de salida tiene una sola neurona que representa los factores de transformación de la respuesta probabilística.

## 6.1. Fase de entrenamiento del modelo de RNA

El algoritmo “backpropagation” se utilizó para el entrenamiento, la función de transferencia en la capa oculta fue sigmoidea y la capa de salida fue la función lineal. El marco F8 no fue incluido en la fase de entrenamiento porque se utiliza para evaluar el rendimiento del modelo de RNA. Es importante remarcar que las entradas y salidas de la red no fueron normalizadas. Se formaron dos modelos, uno para las distorsiones máximas de entrepisos y el otro para la ductilidad máxima. Los resultados de la etapa de entrenamiento muestran una excelente relación con los valores reales, el error medio cuadrático no es mayor que 4% para todos los modelos. Las Figuras 6 y 7 muestran la fase de entrenamiento de la red, se comparan los resultados obtenidos de los análisis reales contra el enfoque del modelo de RNA, para la máxima ductilidad y para la distorsión máxima de entrepiso, respectivamente.

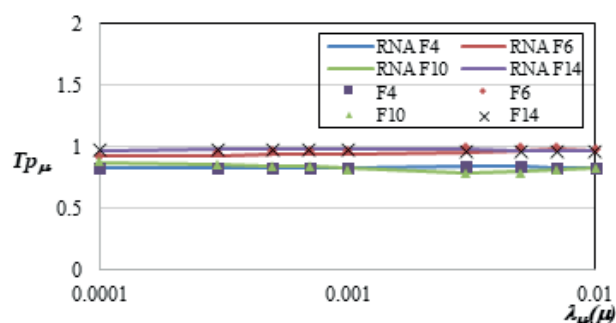


Figura 6. Comparación del Tp real para la ductilidad máxima y los obtenidos a través de RNA

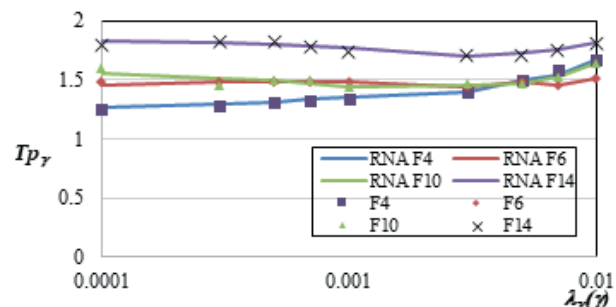


Figura 7. Comparación del Tp real para la distorsión máxima de entrepiso y los obtenidos a través de RNA

## 6.2 Fase de prueba del modelo de RNA

Una vez finalizado el entrenamiento, se llevó a cabo la fase de prueba. Los resultados obtenidos en la fase de prueba no alcanzaron el mismo nivel de precisión encontrado durante el entrenamiento; sin embargo, se puede observar un grado aceptable de similitud entre los  $T_p$  obtenidos mediante las RNA y los obtenidos con el enfoque tradicional en términos de ambos parámetros de respuesta. Es importante recordar que el modelo presentado en la fase de prueba nunca fue mostrado al modelo de RNA, por lo que se puede concluir que la precisión obtenida con el modelo de RNA es satisfactoria. La comparación entre los modelos de RNA y los valores reales para el marco F8, en términos de ductilidad máxima y de distorsión máxima de entrepiso se muestran en las Figuras 8 y 9.

Los resultados indican que la estimación con el

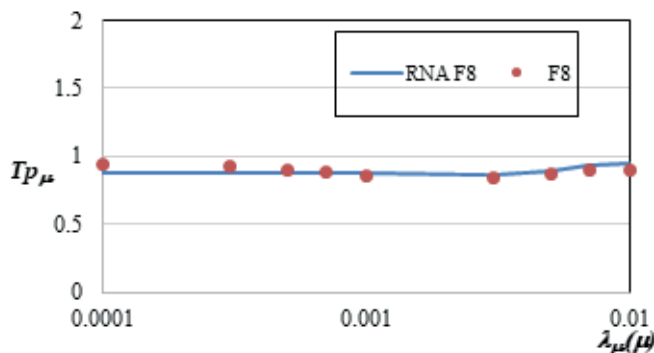


Figura 8. Error en la prueba del marco F8 para la ductilidad máxima

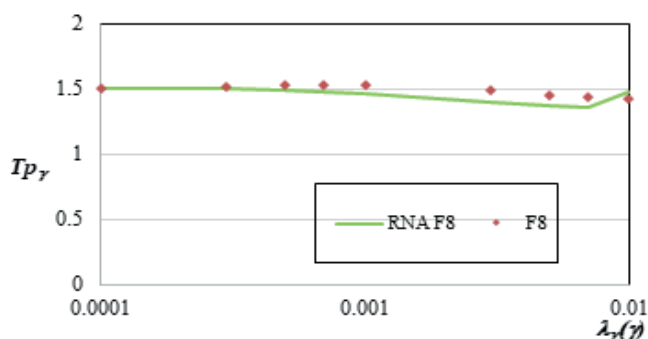


Figura 9. Error en la prueba del marco F8 para la distorsión máxima de entrepiso

modelo de RNA tiene un error máximo del 7% para todos los casos de prueba. Por lo tanto, el modelo de

RNA puede reemplazar el modelo matemático de los marcos de acero para estimar  $T_p$ .

## 7. EXPRESIONES PARA ESTIMAR $T_p$

El tiempo requerido para estimar los factores probabilísticos es considerablemente grande, por este motivo es en este estudio se utilizan los modelos de RNA para reducir el tiempo a solo unos pocos segundos, obteniendo resultados de un gran número de edificios en un tiempo relativamente pequeño con el fin de proponer expresiones que relacionen el periodo fundamental de vibración y la tasa anual de excedencia con su respectivo factor de transformación probabilístico. Para encontrar la relación entre estructuras de acero modeladas como SMGL y su respectivo S1GL se analizó una gran base de datos de edificios. Se analizó un conjunto de 40 estructuras de acero utilizando los modelos de RNA. El periodo de vibración fundamental  $T_1$  de los edificios se consideró en un intervalo de 0.5 a 2.0s, y la tasa media anual de excedencia entre 0.001 y 0.01. Se realizó un análisis de regresión para encontrar expresiones cercanas que puedan ser utilizadas con fines prácticos en la ingeniería sísmica. Los resultados correspondientes a la ductilidad y a las distorsiones máximas de entrepiso se muestran en las Figuras 10 y 11, respectivamente.

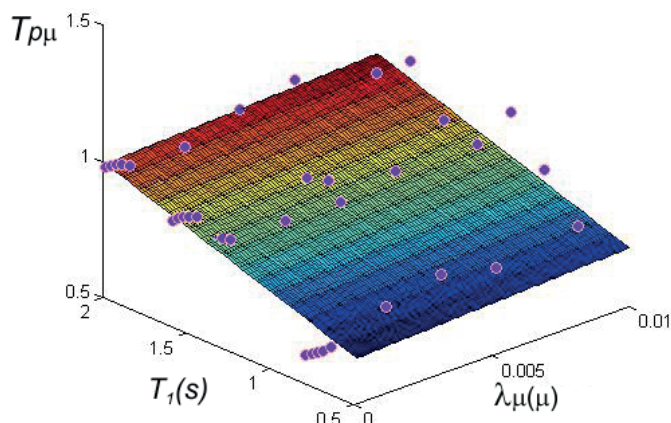
El análisis de regresiones se resume en las ecuaciones (4) y (5). El error máximo obtenido fue aproximadamente del 10% del valor real. Obsérvese que estas ecuaciones están muy bien relacionadas con el  $T_p$  en términos de ductilidad máxima y distorsión máxima de entrepiso.

$$T_{p\mu} = 0.2T_1 + 0.038\lambda + 0.69 \quad (4)$$

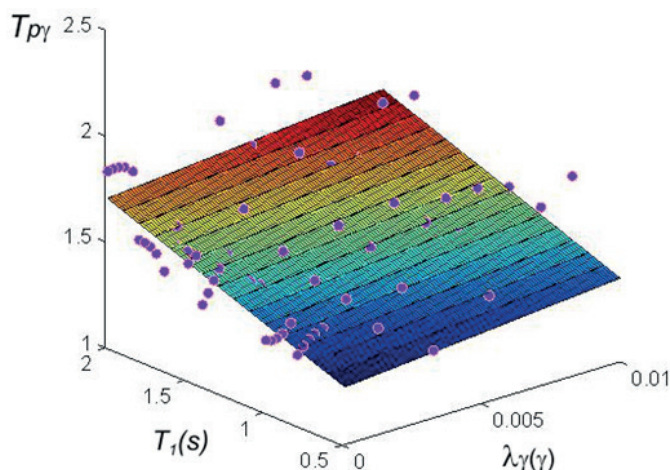
$$T_{p\gamma} = 0.287T_1 + 0.056\lambda + 1.325 \quad (5)$$

## 8. CONCLUSIONES

Este artículo presenta el uso de Redes Neuronales Artificiales con el objetivo de proporcionar una herramienta para el análisis basado en la confiabilidad de sistemas estructurales de acero. El enfoque se aplicó para obtener factores de transformación de respuesta probabilística para evaluar la respuesta en términos de la máxima ductilidad y la distorsión máxima de



**Fig. 10. Regresión para estimar el  $T_p$  en términos de la ductilidad máxima**



**Fig. 11. Regresión para estimar el  $T_p$  en términos de la distorsión máxima de entrepiso**

entrepiso de los marcos de acero, SMGL, basándose en la respuesta del S1GL equivalente. La estimación de los factores requiere varios análisis no lineales, por lo que el esfuerzo computacional involucrado en la tarea es considerablemente alto; sin embargo, aquí se muestra que el uso de Redes Neuronales Artificiales es una buena alternativa para el análisis práctico de estructuras, obteniendo resultados dentro de una tolerancia aceptable. El esfuerzo computacional se reduce considerablemente con el uso de RNA. Además, se proponen ecuaciones aplicables para obtener factores de transformación de respuesta probabilística para la ductilidad máxima y la distorsión máxima de entrepiso, como funciones de la tasa media de excedencia de

un parámetro de respuesta y del período de vibración fundamental de la estructura. Es importante mencionar que los nuevos factores propuestos podrían ser usados para estimar la respuesta sísmica de edificios de acero a través de la respuesta sísmica de modelos S1GL simplificados que tienen probabilidad de falla similar. Finalmente, las expresiones cerradas propuestas pueden ser muy útiles en la implementación de nuevos procedimientos de diseño sísmico basados en confiabilidad estructural, o en la mejora hacia la próxima generación de metodologías de diseño sísmico.

## REFERENCIAS

- [1] Fragiadakis M., Vamvatsikos D., Karlaftis M.G., Lagaros N.D., Papadrakakis M. Seismic assessment of structures and lifelines. *Journal of Sound and Vibrations*, Vol. 334, 2015, p. 29-56.
- [2] Chojaczyk A.A., Teixeira A.P., Neves L.C., Cardoso J.B., Guedes-Soares C. Review and application of Artificial Neural Networks models in reliability analysis of steel structures. *Structural Safety*, Vol. 52, 2015, p. 78-89.
- [3] Bojórquez E., Ruiz S.E., Terán-Gilmore A. Reliability-based evaluation of steel structures using energy concepts. *Engineering Structures*, Vol. 30, Issue 6, 2008, p. 745-759.
- [4] Papadrakakis M., Papadopoulos V., Lagaros D.L. Structural reliability analysis of elastic-plastic structures using neural networks and Monte Carlo simulation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 136, 1996, p. 145-163.
- [5] Papadrakakis M., Lagaros D.L. Reliability-based structural optimization using neural networks and Monte Carlo simulation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 191, 2002, p. 3451-3507.
- [6] Hurtado J.E., Alvarez D.A. Neural network-based reliability analysis: a comparative study. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 191, 2002, p. 113-132.
- [7] Cardoso J.B., Almeida J.R., Dias J.M., Coelho P.G. Structural reliability analysis using Monte Carlo simulation and neural networks. *Advances in Engineering Software*, Vol. 39, Issue, 6, 2007, p. 505-513.

[8] Möller O., Foschi R.O., Quiroz L.M., Rubinstein M. Structural optimization for performance-based design in earthquake engineering: applications of neural networks. *Structural Safety*, Vol. 31, Issue 6, 2009, p. 490-499.

[9] Lautour O.R., Omenzetter P. Prediction of seismic-induced structural damage using artificial neural networks. *Engineering Structures*, Vol. 31, Issue 2, 2009, p. 600-606.

[10] Serkan E., Onur O., Fuad O. Estimation of ultimate torque capacity of the SFRC beams using ANN. *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 53, Issue 5, 2015, p. 939-956.

[11] Chin-Sheng K., I-Cheng Y. Optimal design of plane frame structures using artificial neural networks and ratio variables. *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 52, Issue 4, 2014, p.739-753.

[12] Haykin S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1999.

[13] Martín del Brio M., Molina SM. *Redes Neuronales y Sistemas Difusos*. Alfaomega, Madrid, Spain, 2002.

[14] Shepherd G. M. *The synaptic organization of the brain*. 4a edición, 1997, Oxford University Press.

[15] Rumelhart DE., Hinton GE., Williams RJ. Learning internal representation by error backpropagation. *Parallel distributed processing: explorations microstructure*

of cognition 1, MIT Press Cambridge, MA, 1986, pp. 318-362.

[16] Cornell CA. Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 58, Issue 5, 1968, p. 1583-1606.

[17] Inoue T., Cornell CA. Seismic hazard analysis of multi-degree-of-freedom structures. *Reliability of marine structures RMS-8 Technical Report*, Stanford, California, 1990.

[18] Esteva L., Ruiz S.E., Rivera J. Reliability and performance-based seismic design of structures with energy-dissipating devices. *9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, 2005, Kobe, Japón.

[19] Bojórquez E., Ruiz S.E., Esteva L. Funciones de transformación de respuestas máximas entre marcos estructurales y sus correspondientes S1GL con probabilidades de falla similares. *XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, 2005, Ciudad de México.

[20] Carr A. *RUAUMOKO, inelastic dynamic analysis software*. University of Cantenbury, 2000, Department of Civil Engineering.

[21] Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. *Gaceta Oficial del Gobierno del Distrito Federal*. 29 de enero de 2004.

## Semblanzas

### Juan Bojórquez Mora

Profesor Investigador Titular B de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Obtuvo el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Sinaloa con mención honorífica. Es maestro en Ingeniería Civil por la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, grado obtenido con Mención Honorífica. Posteriormente cursó estudios de Doctorado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Realizó una estancia doctoral en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Estatal de Colorado en Estados Unidos. PREMIO a la mejor tesis Doctoral en el décimo Concurso Nacional de Tesis de Doctorado (2017) otorgado durante el Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica Guadalajara 2017. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Autor de casi 30 artículos en Revistas Científicas y Congresos Nacionales e Internacionales. Ha sido director de 5 tesis de Licenciatura, actualmente dirige algunas tesis de Licenciatura y de Maestría. Entre sus aportaciones científicas, destaca su propuesta para la optimización y calibración de códigos para el diseño sísmico de edificios utilizando inteligencia artificial, la cual será adoptada en la nueva versión del Reglamento de Construcción de la Ciudad de México.



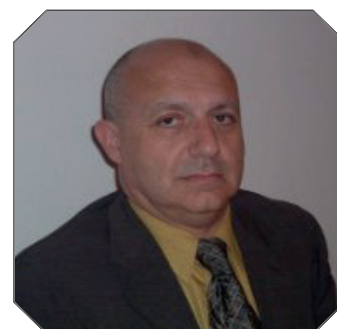
### Alfredo Reyes Salazar

**Licenciatura** en Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, 1978-1983. **Maestría** en Ingeniería Estructural, Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, 1985-1987. **Doctorado** en Ingeniería Estructural, Departamento de Ingeniería Civil e Ingeniería Mecánica, Universidad de Arizona, Tucson, Arizona, U.S.A., 1993-1996. Profesor e Investigador de Tiempo completo Titular C, de la Universidad Autónoma de Sinaloa con una antigüedad de 36 años. **64 artículos** en revistas indexadas-arbitradas, la mayoría de ellas indexadas en el Journal Citation Reports (JCR) y más de **130 artículos en Congresos** Nacionales e Internacionales. Sus trabajos han sido **citados cerca de 800 veces** (Google scholar). Ha impartido más de 20 materias distintas a nivel Licenciatura y Posgrado y es Profesor de la Maestría y el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, calificados por el CONACYT como posgrados de Excelencia. Ha participado como responsable o co-responsable en **más de 28 proyectos de investigación**, varios de ellos con financiamiento externo y en **más de 10 proyectos de desarrollo institucionales** (FOMES y PIFIs). Ha sido director de más de **40 tesis**, entre Licenciatura, Maestría y Doctorado. Entre sus principales distinciones se tienen: (a) Miembro del Sistema Nacional de Investigadores por más de 22 años; (b) “Profesor Emérito” por la Universidad Autónoma de Sinaloa en 2012. (c) “Ingeniero Civil del Año” otorgado por el Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Sinaloa A.C. en junio de 2012; (d) Líder del Cuerpo Académico consolidado Estructuras y Mecánica Básica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Sinaloa.



### Francisco López Almansa

Ingeniero civil desde 1974, Maestría y doctorado en 1987 y 1988, respectivamente. Docente en la Universidad Politécnica de Cataluña desde 1976; catedrático desde 2007. Ingeniero consultor profesional de 1976 a 1987; desde 1987 sólo consultoría avanzada de transferencia de tecnología. Enseñanza en matemáticas y en los campos relacionados con análisis estructural. Promotor y director de varios programas de Maestría y Doctorado. Actualmente docente en varias instituciones extranjeras. Sus principales áreas de investigación son: dinámica de estructuras, ingeniería sísmica, control activo y pasivo de estructuras (aislamiento de base, disipadores de energía), análisis numérico y experimental de estructuras de hormigón y mampostería. Publicaciones principales: 42 trabajos en revistas indexadas por la Web of Science, 15 artículos en otras revistas, 11 monografías, 136 presentaciones en conferencias científicas, y 7 libros. Tesis doctorales supervisadas 15 y alrededor de 65 de maestría. Participación en 23 proyectos de investigación nacionales y 14 internacionales; entre ellos, promoción y coordinación (investigador principal) de 6 proyectos de investigación nacionales y 6 internacionales.



# Análisis de peligro sísmico probabilístico para el Estado de Sinaloa

## Probabilistic seismic hazard analysis for the State of Sinaloa

Robespierre Chavez Lopez<sup>1\*</sup>, Edén Bojórquez Mora<sup>1</sup>

### RESUMEN

La evidencia existente muestra que los terremotos han afectado a la humanidad por siglos, por lo tanto, es necesario efectuar estudios que permitan conocer el comportamiento de este fenómeno para poder planificar y mitigar los grandes efectos producidos en todas las zonas con actividad sísmica presente. Una forma de conocer el comportamiento sísmico en un sitio es mediante el análisis de peligro sísmico probabilístico (APSP). En este estudio se evalúa el peligro sísmico para el Estado de Sinaloa, que es considerado como una región de sismicidad de moderada a alta; a pesar de ello, han sido pocos los esfuerzos en realizar estudios de este tipo para esta región. Finalmente, los resultados del análisis de peligro sísmico para Sinaloa se expresan en curvas de peligro sísmico para algunas de las ciudades más importantes del Estado para un periodo estructural de un segundo y diferentes tipos de suelo, adicionalmente se trazan mapas de peligro sísmico para Ams (aceleración máxima del suelo) y periodos estructurales de 0.5s y 1s, considerando diferentes tipos de suelo, y para los dos periodos de retorno más utilizados por los códigos de diseño sísmico que son 475 y 2475 años; es decir, 10% y 2% de probabilidad de excedencia en 50 años respectivamente. Este estudio se llevó a cabo con la finalidad de conocer las intensidades sísmicas y la distribución geográfica del peligro sísmico en la Región de Sinaloa.

### ABSTRACT

The existing evidence shows that earthquakes have affected to the humanity for centuries, therefore, it is necessary to carry out studies that allow to know the behavior of this phenomenon in order to plan and mitigate the great effects produced in all the zones with present seismic activity. One way to know the seismic behavior in a site is through the probabilistic seismic hazard analysis (PSHA). In this study, the seismic hazard for the State of Sinaloa is evaluated, which is considered as a region of moderate to high seismicity; in spite of this, there have been few efforts to carry out studies of this type for this Region. Finally, the results of the seismic hazard analysis for Sinaloa are expressed in seismic hazard curves for some of the most important cities in the State for a structural period of a second and different types of soil, furthermore, seismic hazard maps for PGA (peak ground acceleration) and structural periods of 0.5s and 1s are also drawn, considering different types of soil and for the two return periods most used by seismic design codes that are 475 and 2475 years, that is, 10% and 2% probability of exceedance in 50 years respectively. This study was carried out with the purpose to know the seismic intensities and the geographical distribution of the seismic hazard in the Sinaloa Region.

Recibido: agosto 2017  
Aceptado: octubre 2017  
Publicado: marzo 2018

### Palabras Clave:

Análisis de peligro sísmico probabilístico; mapas de peligro sísmico; aceleración espectral.

### Keywords:

probabilistic seismic hazard analysis; seismic hazard maps, spectral acceleration.

## 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal del análisis de peligro sísmico probabilístico es cuantificar la frecuencia media anual de exceder una medida de intensidad sísmica [1-2]. Debido a la importancia del análisis de peligro sísmico probabilístico, se han desarrollado varios estudios para evaluar las curvas de peligro sísmico, mapas de

\*Autor para correspondencia.

Dirección de correo electrónico: Robespierre Chavez Lopez, [robespierre\\_chavez@hotmail.com](mailto:robespierre_chavez@hotmail.com)

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Sinaloa, FIC, Culiacán Rosales, Sinaloa, México, C.P. 80040

peligro sísmico, espectros de peligro uniforme, etc. En otras palabras, para estimar la probabilidad de exceder un parámetro de movimiento de suelo específico para diferentes sitios alrededor del mundo [3-7]. El uso de conceptos probabilísticos ha permitido considerar explícitamente las incertidumbres en el tamaño, localización y tasa de recurrencia sísmica, así como la variación de las características del movimiento sísmico con el tamaño y la ubicación del terremoto. El análisis de peligro sísmico probabilístico permite identificar, cuantificar y combinar en una manera racional estas incertidumbres, proporcionando una evaluación más completa del peligro sísmico.

En los códigos de diseño sísmico, o en literatura de ingeniería sísmica y sismología, el cálculo del peligro sísmico probabilístico es expresado en términos de un parámetro que pueda describir la severidad de un movimiento sísmico, que se conoce como medida de intensidad sísmica. Actualmente, las medidas de intensidad sísmica más utilizadas para el análisis de peligro sísmico probabilístico son la aceleración máxima del suelo ( $A_{ms}$ ) y la aceleración espectral en el primer modo de vibración de la estructura ( $Sa(T_1)$ ). Aunque es importante mencionar que existen varias medidas de intensidad en la actualidad bastante prometedoras [10-18].

El objetivo principal de este trabajo es llevar a cabo el análisis de peligro sísmico probabilístico para el Estado de Sinaloa en México, que es considerada como una región de sismicidad moderada a alta; sin embargo, han sido pocos los esfuerzos en realizar estudios de este tipo para esta zona de México. Por lo tanto, en este estudio se obtienen curvas y mapas de peligro sísmico con la finalidad de conocer las intensidades sísmicas y la distribución geográfica del peligro sísmico en el Estado de Sinaloa.

## 2. SISMOLOGÍA EN MÉXICO

La República Mexicana está situada en una de las regiones sísmicamente más activas del mundo, enclavada dentro del área conocida como el Cinturón Circumpacífico o anillo de fuego donde se concentra la mayor actividad sísmica del planeta (Servicio Geológico Mexicano). Se trata de una especie de anillo, de ahí su nombre, que está ubicado en las costas del océano pacífico y su principal característica es que concentra algunas de las zonas de subducción más importantes del mundo.

La alta sismicidad en el país, es debido principalmente a la interacción entre las placas de Norteamérica, la de Cocos, la del Pacífico, la de Rivera y la del Caribe, así como a fallas locales que corren a lo largo de varios estados, aunque estas últimas menos peligrosas. La Placa Norteamericana se separa de la del Pacífico pero roza con la del Caribe y choca contra las de Rivera y Cocos, de aquí la incidencia de sismos (Servicio Geológico Mexicano).

El estudio de la actividad sísmica de México comenzó a principios del siglo XX; sin embargo, los antecedentes históricos de grandes sismos del país fueron registrados en un importante número de documentos. En 1910 se inauguró la red sismológica mexicana y desde esa fecha hasta nuestros días se ha mantenido una observación continua de los temblores cuyos registros se conservan en la Estación Sismológica de Tacubaya y otras instalaciones del Instituto de Geofísica de la UNAM, encargada de operar el Servicio Sismológico Nacional (SSN) y su red de estaciones sismológicas. El SSN reporta en el país, en promedio, la ocurrencia de 4 sismos por día de magnitud  $M > 3.0$ .

Existe otro grupo de trabajo en el Centro de Investigaciones y de Educación Superior de Ensenada, B.C. (CICESE), que enfoca su estudio entre otros aspectos, a la actividad sísmica asociada tanto al Golfo de California como a la falla de San Andrés, al igual que la Red Sismológica del Noroeste (RESNOR).

Por otra parte, en el año 2016 ocurrieron 15460 eventos sísmicos de acuerdo a los reportes emitidos por Servicio Sismológico Nacional. Las magnitudes de estos sismos van de 1.4 a 6.5. La distribución de los epicentros se concentra principalmente en los estados de la costa del Océano Pacífico, en el Istmo de Tehuantepec y en el Golfo de California (Ver Figura 1). También se presentaron algunos sismos en el centro y norte del País. Durante este año acontecieron 6 terremotos dentro del territorio mexicano de magnitud mayor o igual a 6.0, destacando entre estos el registrado el día 21 de enero a las 12:06 hrs, con una magnitud de 6.5 y su epicentro fue localizado en el Océano Pacífico a 277 km al oeste de Cihuatlan, Jalisco.

De acuerdo a la Figura 1 el territorio mexicano es una zona sísmicamente muy activa, uno de los eventos que son difíciles de olvidar para la población mexicana es el sismo ocurrido en septiembre 1985 en la ciudad de México, que causó la muerte de miles de personas y serios daños a la capital del país. Por lo tanto, las pérdidas sufridas por grandes terremotos en México, hacen clara la necesidad de realizar estudios

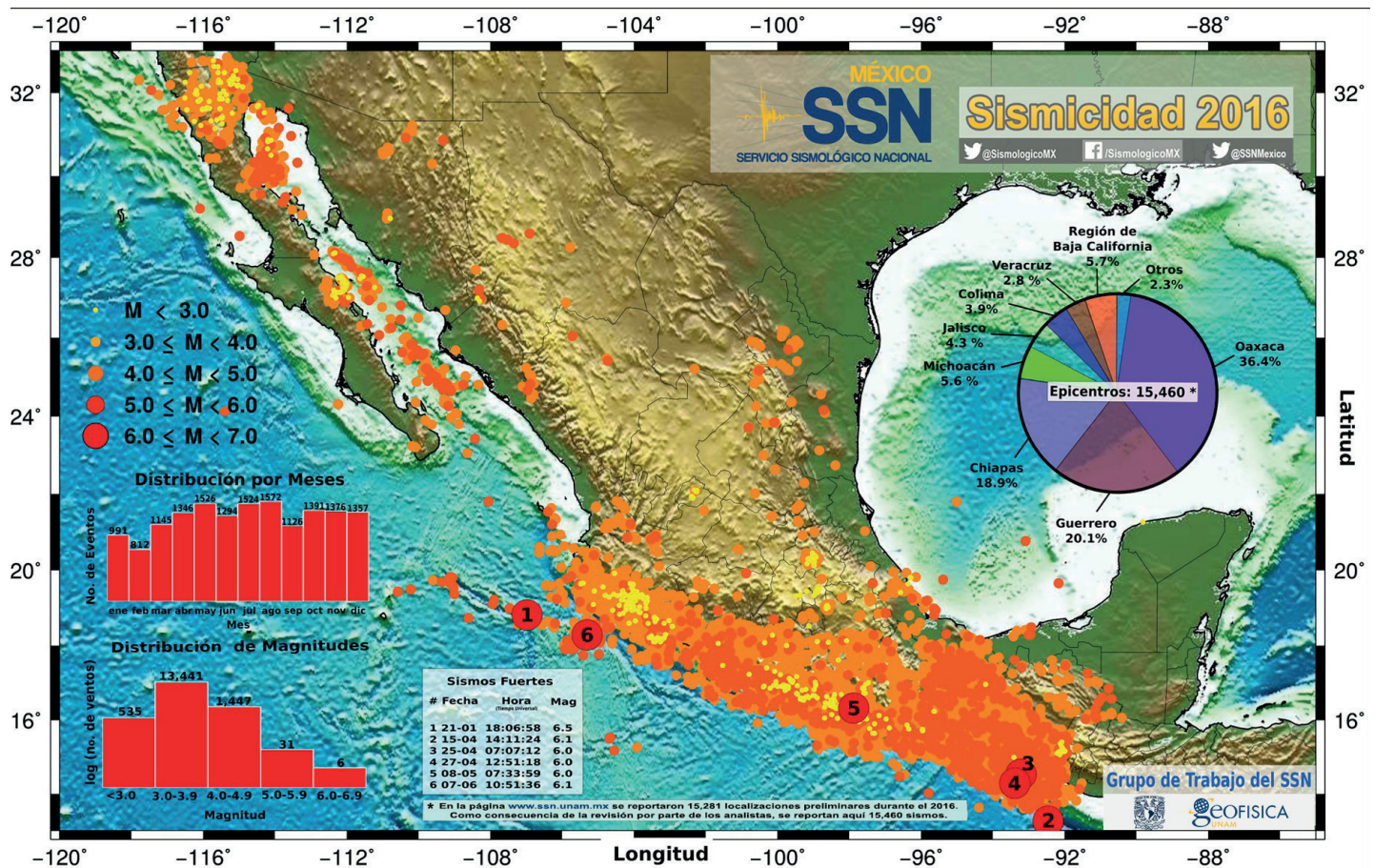


Figura 1. Mapa de sismicidad 2016.

de peligro sísmico en esas regiones que se encuentran expuestas a la actividad sísmica. Como se ilustrará a continuación, en el estado seleccionado de México llamado Sinaloa para calcular el peligro sísmico probabilístico es una región con moderada a alta sismicidad.

### 3. ÁREA DE ESTUDIO

La zona noroeste de México, específicamente el Estado de Sinaloa, es considerada como una región de sismicidad moderada a alta; sin embargo, han sido pocos los esfuerzos en realizar estudios de peligro sísmico para esta área. En los últimos años la actividad sísmica se ha incrementado considerablemente en esta región, de aquí surge la necesidad de realizar estudios de peligro sísmico con la finalidad de estimar el potencial de un movimiento sísmico que pueda ocurrir en esta región, así como para obtener parámetros pre-

liminares a ser utilizados para el diseño sísmico de estructuras seguras. La ubicación de Sinaloa se muestra en la Figura 2 con respecto al mapa de la República Mexicana.

Se debe tener en cuenta que dentro del área de estudio se seleccionaron 4 de las ciudades más importantes del Estado, que son las ciudades de Culiacán, Guasave, Los Mochis y Mazatlán (ver Figura 3), con el fin de evaluar el peligro sísmico de forma más detallada; es decir, obtener las curvas de peligro sísmico. En cada una de estas ciudades se tomó como sitio de estudio el centro histórico, que es donde se encuentran monumentos históricos y otro tipo de edificaciones de gran valor cultural y económico.

### 4. PELIGRO SÍSMICO

El objetivo del análisis de peligro sísmico probabilístico es determinar el nivel de intensidad que podría

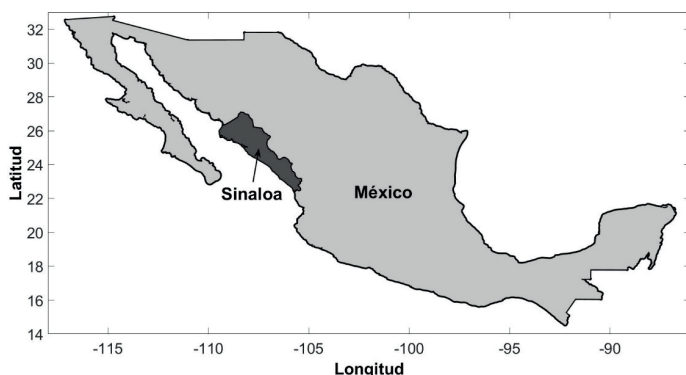


Figura 2. Ubicación del estado de Sinaloa.

ocurrir en diferentes partes de un área específica de estudio, considerando todos los posibles eventos sísmicos, junto con sus probabilidades asociadas de ocurrencia, con el fin de encontrar el nivel de intensidad de movimiento del suelo que sea igual o mayor que cierta tasa de excedencia [19]. El uso de los conceptos probabilísticos ha permitido considerar explícitamente el uso de las incertidumbres en el tamaño, ubicación y tasa de recurrencia de los sismos, así como en la variación de las características del movimiento sísmico con el tamaño y ubicación del terremoto. El análisis de peligro sísmico probabilístico permite identificar, cuantificar y combinar en una manera racional estas incertidumbres, proporcionando una evaluación más completa de la amenaza sísmica.

El análisis de peligro sísmico probabilístico también puede ser descrito como un proceso de cuatro pasos [19]:

El primer paso, consiste en la identificación y caracterización de las fuentes sísmicas. En la mayoría de los casos, a cada fuente se le asigna una distribución uniforme de probabilidades, lo cual implica que el terremoto tiene igual probabilidad de ocurrir en cualquier punto dentro de la fuente. Estas distribuciones se combinan luego con la geometría de la fuente para obtener las correspondientes distribuciones de probabilidad de la distancia de la fuente al sitio.

Enseguida, se debe caracterizar la sismicidad o distribución temporal de la recurrencia sísmica. Esto se realiza usando una relación de recurrencia que especifica la razón promedio en que un sismo de determinado tamaño será excedido. La relación de recurrencia permite considerar un tamaño máximo de terremoto, pero no se limita a considerar sólo ese terremoto.

Mediante el uso de relaciones de predicción (leyes de atenuación) se debe determinar el movimiento sísmico que puede ser producido en el sitio por te-

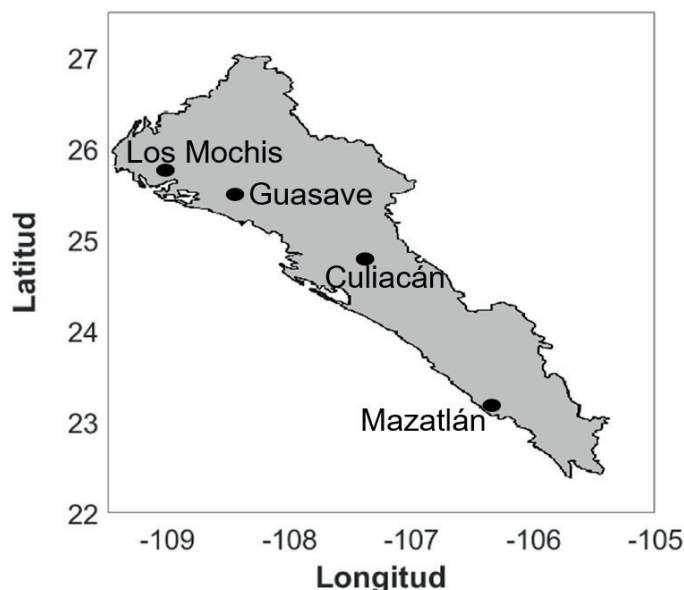


Figura 3. Sitios bajo estudio.

remotos de cualquier tamaño posible que ocurran en cualquier punto de la fuente. El método probabilístico permite considerar las incertidumbres inherentes a las relaciones de predicción o leyes de atenuación.

Finalmente, se combinan las incertidumbres en la ubicación, tamaño y en los parámetros de predicción del movimiento sísmico para obtener la probabilidad de que el parámetro del movimiento sísmico sea excedido durante un periodo particular.

El resultado final son curvas de peligro sísmico, donde un parámetro de movimiento de suelo tal como la aceleración máxima del suelo y la probabilidad media anual de excedencia de este parámetro son relacionados. Estas curvas son útiles porque a través de ellas es posible obtener espectros de peligro uniforme y mapas de peligro sísmico, que usualmente son la clave para definir las fuerzas sísmicas de diseño en una edificación provistas por los códigos sísmicos alrededor del mundo.

Las curvas de peligro sísmico pueden ser obtenidas para zonas fuentes individuales y combinadas con el fin de expresar el peligro total en un sitio particular. El concepto básico de los cálculos requeridos para desarrollar curvas de peligro sísmico es bastante simple. La probabilidad de exceder un valor particular,  $y^*$ , de un parámetro de movimiento de suelo,  $Y$ , es calculado para un posible terremoto en un lugar posible de la fuente y entonces multiplicado por la probabilidad de que un terremoto de magnitud particular pueda ocurrir en esa ubicación. El proceso es entonces repetido

para todas las magnitudes y localizaciones posibles con las probabilidades de cada suma. La formulación básica para el cálculo de las curvas de peligro sísmico se muestra en la Ecuación 1 [20].

$$\lambda_{y^*} = \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{j=1}^{N_M} \sum_{k=1}^{N_R} \nu_i P[Y > y^* | m_j, r_k] \quad (1)$$

$$P[M = m_j] P[R = r_k]$$

donde  $\lambda_{y^*}$  es la tasa anual de excedencia,  $\nu_i$  es la tasa media anual de excedencia de una magnitud asociada a una fuente sísmica,  $P[Y > y^* | m_j, r_k]$  es la probabilidad que algún parámetro del movimiento del suelo  $Y$  estimado para un sismo de una magnitud  $m_j$  y una distancia  $r_k$ , exceda cierto valor  $y^*$ ,  $P[M = m_j]$  es la probabilidad que una magnitud  $M$  sea igual a una magnitud  $m_j$  y  $P[R = r_k]$  es la probabilidad que una distancia  $R$  sea igual a una distancia  $r_k$ . Las curvas de peligro sísmico pueden ser fácilmente combinadas con el modelo de Poisson para estimar probabilidades de excedencia en intervalos de tiempo finito. La probabilidad de excedencia de  $y^*$  en un periodo de tiempo  $T$  es dado por la Ecuación 2:

$$P[Y_T > y^*] = 1 - e^{-\lambda_{y^*} T} \quad (2)$$

## 5. ESTIMACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO: RESULTADOS NUMÉRICOS

En la actualidad existe una diversidad de programas computacionales para la estimación del peligro sísmico; sin embargo, en esta sección con la finalidad de evaluar el peligro sísmico de una manera más confiable se desarrolló un programa de computadora basado en parámetros de sismicidad actualizados. En la modelación de fuentes sísmicas se utilizó la división del territorio de la República Mexicana en unidades o zonas sismotectónicas dada por Zúñiga *et al.* (1997) [21] (Figura 4) y los parámetros de sismicidad para estas zonas fueron obtenidos por Mendoza (2012) [22]; además, la incertidumbre en la distribución de distancias de la fuente sísmica al sitio se tiene en cuenta mediante el uso de histogramas. Para ello se divide la zona fuente en una fina malla de 0.1 grados de separación entre puntos coordinados, el intervalo total de distancia es agrupado en varios intervalos; es decir, para caracterizar la distribución de distancias de la fuente al sitio, se determina que tantos segmentos forman parte de cada intervalo de distancias. Las ordenadas del histograma normalizado representan la frecuencia relativa que deberá ser igual a la probabilidad si un infinito número de segmentos se utiliza, pero que es una aproximación a la probabilidad en este caso. Similarmente, esto fue llevado a cabo para cada fuente sismotectónica. Por otra parte, para determinar el movimiento sísmico en un sitio se utilizó una ley

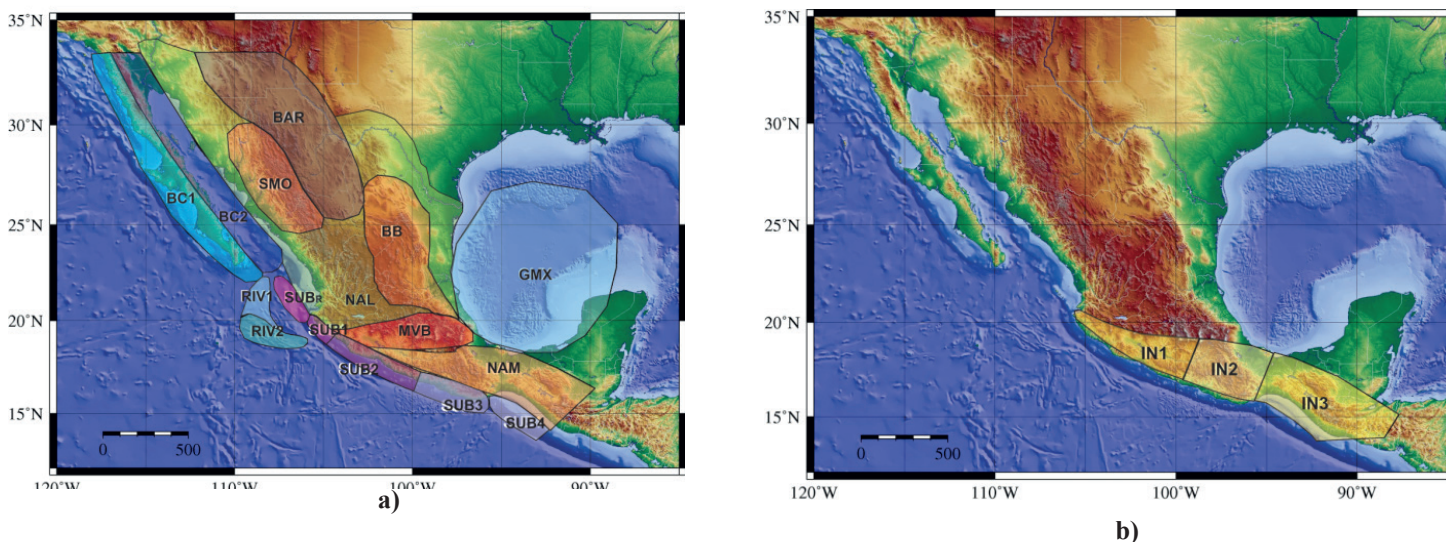


Figura 4. Zonas sismotectónicas de México: a) Regiones correspondientes a sismos de profundidad somera y b) Regiones de sismos de profundidad intermedia (Zúñiga *et al.*, 1997)

de atenuación obtenida para un sitio con características sismotectónicas similares a las del estado de Sinaloa, como lo es la relación de atenuación de Boore y Atkinson (2007)[23], que se define en la siguiente expresión:

$$\ln Y = F_M(M) + F_D(R_{JB}, M) + F_S(V_{S30}, R_{JB}, M) + \varepsilon \sigma_T \quad (3)$$

En la Ecuación 1,  $F_M$ ,  $F_D$  y  $F_S$  representan el escalamiento de la magnitud, función de distancia y ampliación del sitio, respectivamente.  $M$  es la magnitud momento,  $R_{JB}$  es la distancia de Joyner-Boore (definida como la distancia más cercana a la superficie de proyección de la falla, que es aproximadamente igual a la distancia epicentral para eventos de  $M \leq 6$ ), y  $V_{S30}$  es la velocidad promedio de las ondas de cortante en los primeros 30 metros de profundidad en el sitio.  $\varepsilon$  es el número fraccional de desviaciones estándar de un solo valor predicho de  $\ln Y$  lejos del valor medio de  $\ln Y$  (e. g.,  $\varepsilon = -1.5$ , sería 1.5 desviaciones estándar menor que el valor medio). Todos los términos, incluyendo el coeficiente  $\sigma_T$ , son periodo dependientes.

La metodología mostrada anteriormente para el análisis de peligro sísmico fue aplicada al Estado de Sinaloa, localizado en la región noroeste de México, en las costas del golfo de California. Debido a la insuficiencia de datos geológicos que nos permitan conocer los tipos de suelo a través de toda la región, en este trabajo se evaluó el peligro sísmico de acuerdo a la velocidad promedio de las ondas de cortante a 30 m de profundidad, que es un indicador del tipo de suelo en un sitio. La Tabla 1 muestra la relación entre la velocidad de ondas de cortante y el tipo de suelo de acuerdo a la clasificación de suelos NEHRP [24]

Generalmente diferentes niveles de peligro son tomados en cuenta en el análisis de peligro sísmico probabilístico. Los dos niveles de peligro considerados en este estudio son: 10% y 2% de probabilidad de excedencia en 50 años. El primer nivel de peligro basado en un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años es equivalente a un periodo de retorno de 475 años; este nivel de peligro se conoce como terremoto frecuente o diseño básico. El segundo nivel de peligro basado en un 2% de probabilidad de excedencia en 50 años es equivalente a un periodo de retorno de 2475 años; este nivel de peligro se conoce como terremoto de ocurrencia excepcional o máximo probable.

Tabla 1. Clasificación de suelos NEHRP

| Tipo de suelo | Descripción  | Velocidad promedio de las ondas de cortante ( $V_{S30}$ ) (m/s) |
|---------------|--------------|-----------------------------------------------------------------|
| A             | Roca dura    | > 1500                                                          |
| B             | Roca         | 760 - 1500                                                      |
| C             | Roca blanda  | 360 - 760                                                       |
| D             | Suelo rígido | 180 - 360                                                       |
| E             | Suelo blando | < 180                                                           |

### 5.1 Curvas de Peligro Sísmico

Una forma de expresar el resultado final del análisis de peligro sísmico es a través de las curvas de peligro sísmico, que son de gran ayuda a la hora de evaluar la intensidad provocada por un terremoto en un sitio, donde el objetivo primordial consiste en determinar la tasa media anual de excedencia que supere un cierto nivel de movimiento sísmico en un sitio, para un intervalo de niveles de intensidad. Esta información puede resumirse como se muestra en la Figura 5, donde se observa que los niveles bajos de intensidad se superan con relativa frecuencia, mientras que las intensidades altas son raras. Si se contara con un amplio registro de terremotos en un sitio que abarcara miles de años, sería posible obtener esta curva completa experimentalmente, pero para este caso esto no es posible porque no se cuenta con suficientes datos para extrapolar en las tasas de interés. Además, se tienen que considerar las incertidumbres en el tamaño, la ubicación y la intensidad del movimiento sísmico. Debido a estos desafíos en el enfoque matemático para efectuar el análisis de peligro sísmico probabilístico como se mencionó anteriormente se deben combinar modelos matemáticos para la ubicación y el tamaño de potenciales terremotos para predecir la potencial intensidad causada por estos futuros terremotos [25].

La ventaja de los resultados obtenidos en este estudio es que las curvas están asociadas a distintos valores de la velocidad de ondas de cortante, por lo tanto, bastará con seleccionar la curva adecuada al tipo del suelo del sitio. En la Figura 5 se muestran las curvas de peligro sísmico para los cuatro sitios en estudio para un periodo estructural de un segundo y distintas velocidades promedio de ondas de cortante. Se observa como a medida que la velocidad promedio de ondas de cortante disminuye, se incrementa  $Sa(T_1)$  para una tasa de excedencia en particular. Por ejemplo, para un periodo de retorno de 475 años, la Tabla 2 indica los

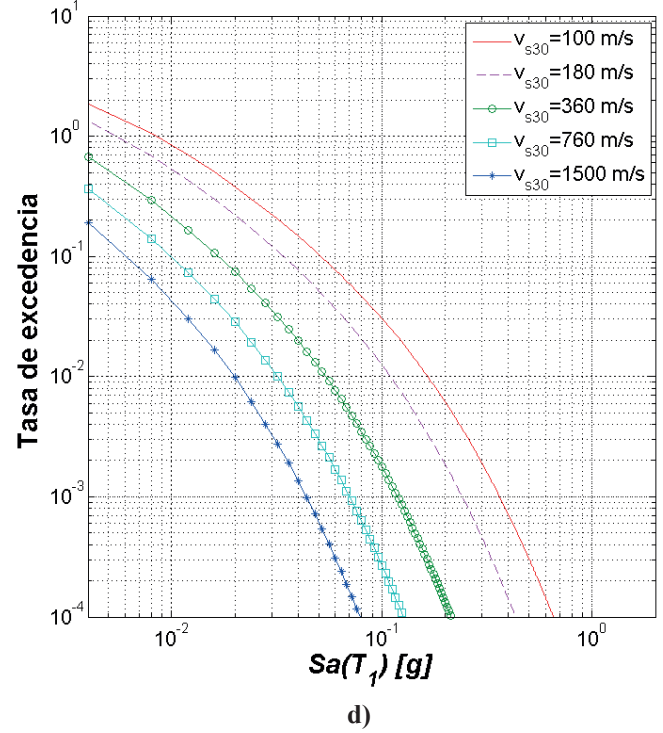
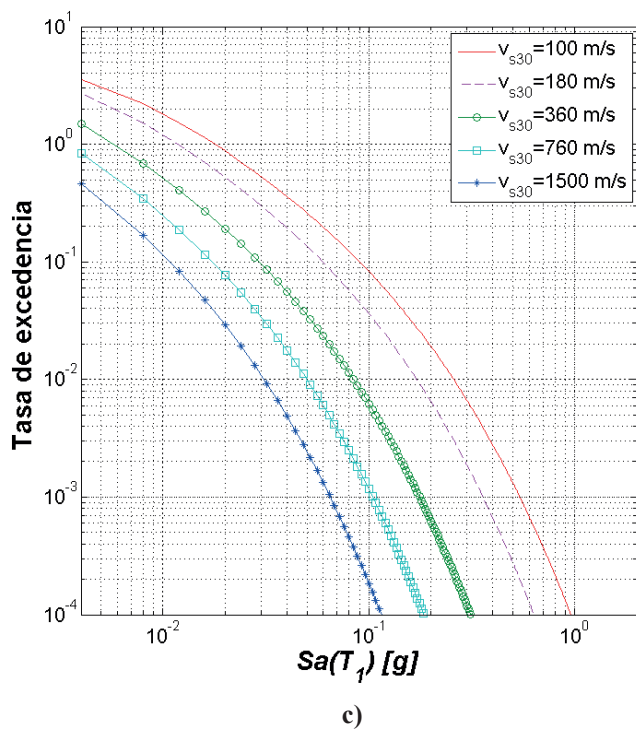
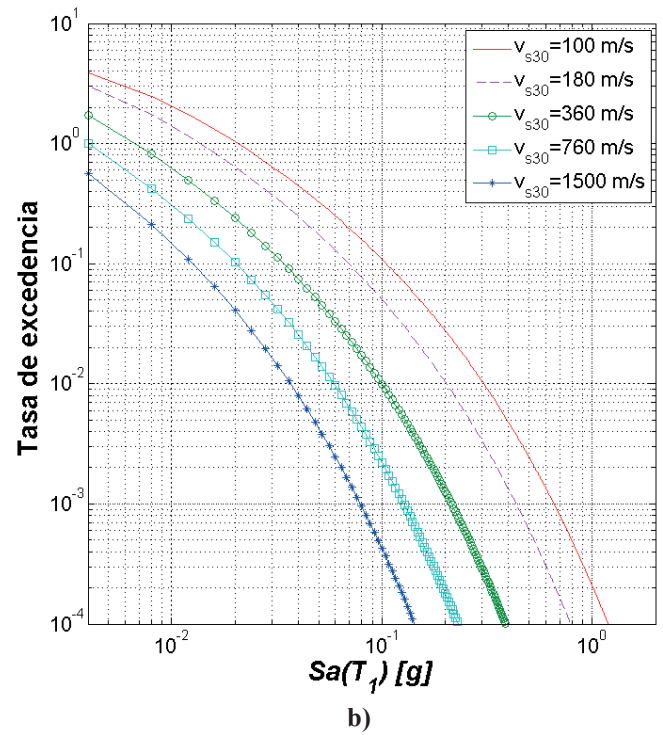
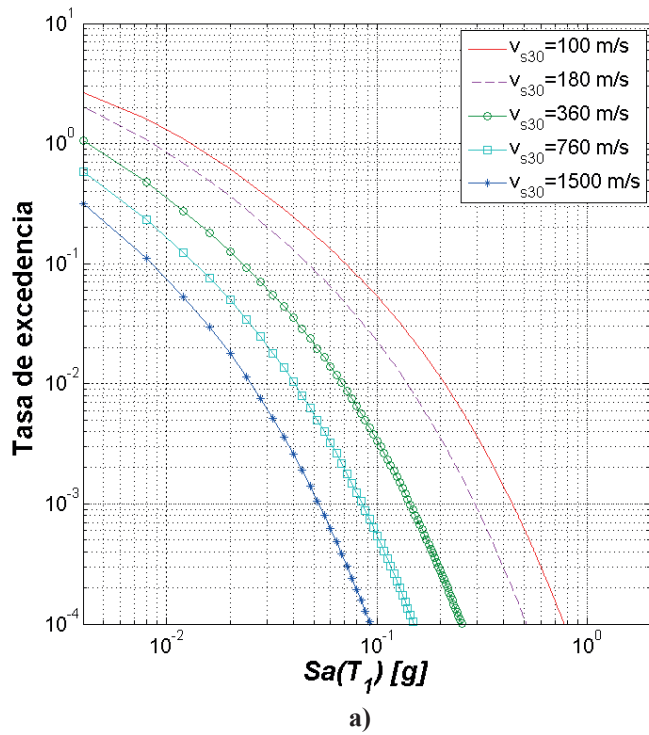


Figura 5. Curvas de peligro sísmico para un periodo estructural de un segundo para distintas velocidades de ondas de cortante para los sitios: a) Culiacán, b) Los Mochis, c) Guasave y d) Mazatlán

valores de  $Sa(T_p)$  para distintas velocidades de ondas de cortante para el sitio Culiacán.

**Tabla 2. Valores de la intensidad en términos de  $Sa$  para el sitio Culiacán y periodo estructural de un segundo para distintas velocidades de ondas de cortante con periodo de retorno de 475 años**

| Velocidad de ondas de cortante ( $V_{s30}$ ) | $Sa$ [g] |
|----------------------------------------------|----------|
| 100                                          | 0.37     |
| 180                                          | 0.25     |
| 360                                          | 0.12     |
| 760                                          | 0.07     |
| 1500                                         | 0.044    |

## 5.2 Mapas de peligro sísmico

Otra forma de expresar el resultado final del análisis de peligro sísmico es mediante mapas de peligro sísmico que se pueden obtener para cualquier región que cuente con los elementos necesarios para el cálculo de estos. Los mapas de peligro sísmico presentados en esta sección muestran la aceleración espectral máxima horizontal con 10% y 2% de probabilidad de excedencia en 50 años para diferentes tipos de suelo y considerando diferentes periodos estructurales. Algunos mapas de peligro sísmico son presentados en las Figuras 6 a 8. En estas figuras se puede observar la distribución del peligro sísmico. Aunque la distribución de las intensidades en términos de  $Sa$  en unidades de gravedad (g) para cada mapa es similar, note que el valor de la intensidad depende del tipo de suelo, probabilidad de excedencia y periodo estructural; por lo tanto, el intervalo de valores de intensidad para cada mapa de peligro sísmico es dado por la barra de color localizada en la parte derecha de cada figura, donde las intensidades más pequeñas son mostradas en azul y las intensidades más grandes en rojo.

Los mapas de peligro sísmico en las Figuras 6 a 8 muestran que la parte noroeste de la región de Sinaloa es la que se encuentra expuesta a un mayor peligro sísmico. Para el centro el peligro sísmico es menor que para la zona noroeste, y conforme se avanza a la parte sureste de la región de Sinaloa el peligro tiende a disminuir. Sin embargo, es importante resaltar que el peligro sísmico está presente en toda la región. La distribución del peligro sísmico observada se debe a la cercana distancia entre la región de Sinaloa y la

región sismotectónica BC2 (ver Figura 4), porque la actividad sísmica de dicha región es mayor en comparación con el resto de las otras fuentes que afectan al Estado. La Figura 6 ilustra la variación de las intensidades considerando un periodo estructural de 0.5 segundos y diferentes tipos de suelo, en este estudio representado por la velocidad promedio de las ondas de cortante. En el caso de un suelo blando con una velocidad promedio de las ondas de cortante de 100 m/s la intensidad alcanza 3.0g en términos de  $Sa$  (Figura 6a), para el caso de suelo rígido con velocidad promedio de las ondas de cortante de 180 m/s (Figura 6b) y roca blanda con velocidad promedio de las ondas de cortante de 360 m/s (Figura 6c) se obtienen valores de  $Sa$  iguales a 2.0 y 1.0g. Por otra parte, cuando el tipo de suelo es considerado como roca se aprecian intensidades de 0.7g (Figura 6d). Las intensidades para un suelo blando son de alrededor de un 50% más grandes que las obtenidas para un suelo rígido, mientras que para un suelo rígido son aproximadamente 100% más grande que para roca blanda. Esto indica que conforme el suelo incrementa su rigidez, la intensidad tiende a reducirse considerablemente.

Los mapas de peligro sísmico en las Figuras 7 y 8 son comparados para periodos de retorno de 475 y 2475 años considerando el mismo tipo de suelo mediante un valor similar de velocidad de ondas de cortante para aceleración máxima del suelo ( $A_{ms}$ ) y un periodo estructural de un segundo. En general, se puede observar que los valores de intensidad en términos de  $Sa$  son alrededor de un 60% más grandes para el caso de un periodo de retorno igual a 2475 años sin importar el periodo estructural bajo consideración. Finalmente, el trabajo aquí presentado solamente se llevó a cabo para una región específica de México; sin embargo, el procedimiento es aplicable a otras regiones.

## 6. CONCLUSIONES

Se estimó el peligro sísmico para el Estado de Sinaloa. Los resultados obtenidos sugieren la importancia de la velocidad de ondas de cortante en la estimación de los mapas de peligro sísmico; en particular, cuando la velocidad de las ondas de cortante tiende a incrementar, los valores de intensidad de terremoto presentados en los mapas de peligro sísmico en términos de  $Sa$  para un sitio específico disminuyen. Por lo tanto, la tasa anual de excedencia de  $Sa$  es mayor para los suelos blandos.

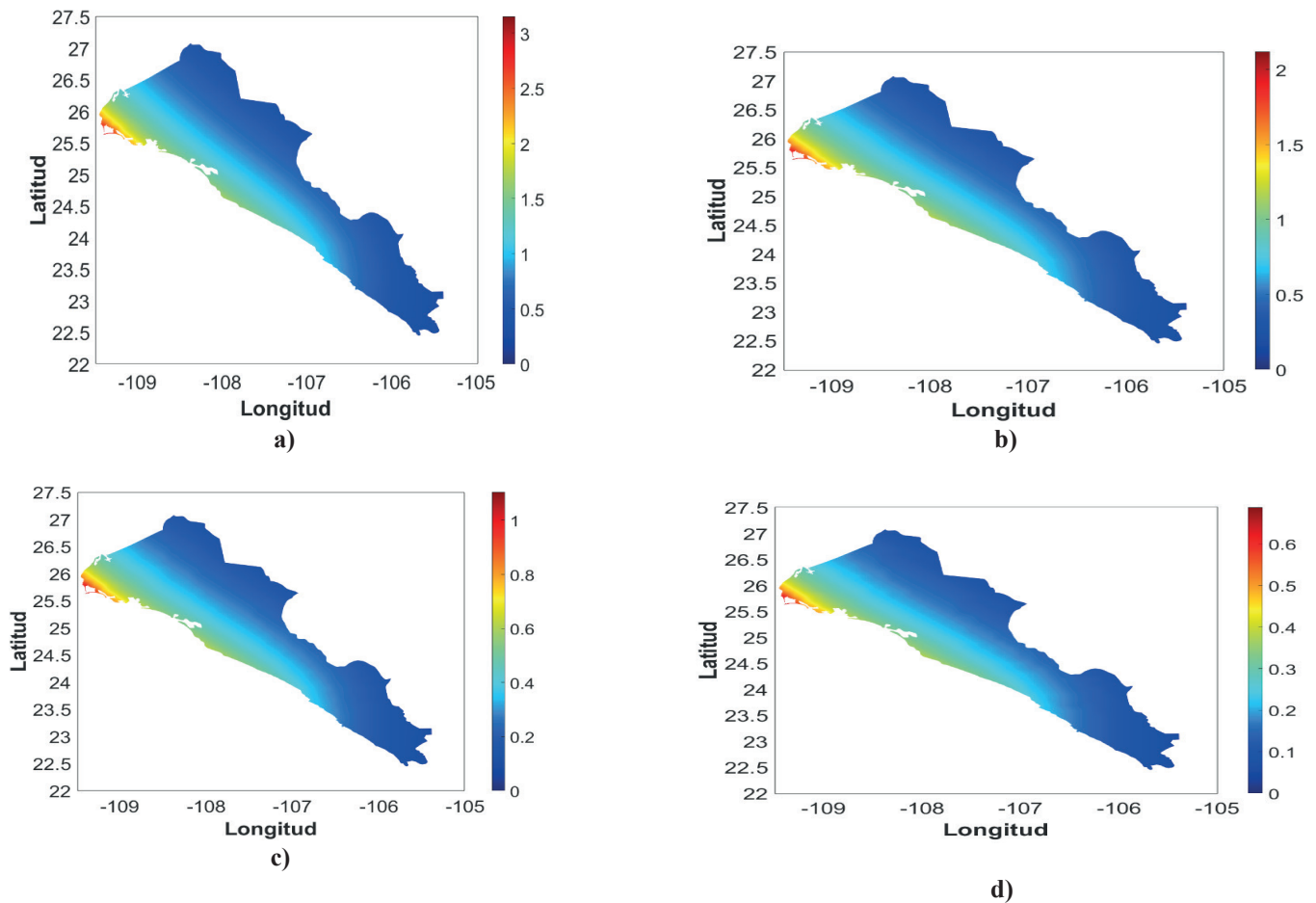


Figura 6. Mapas de peligro sísmico asociados a un periodo de retorno de 475 años y un periodo estructural de 0.5 segundos en términos de  $S_a$  (g) para velocidades de ondas de cortante de: a) 100 m/s, b) 180 m/s, c) 360 m/s y c) 760 m/s

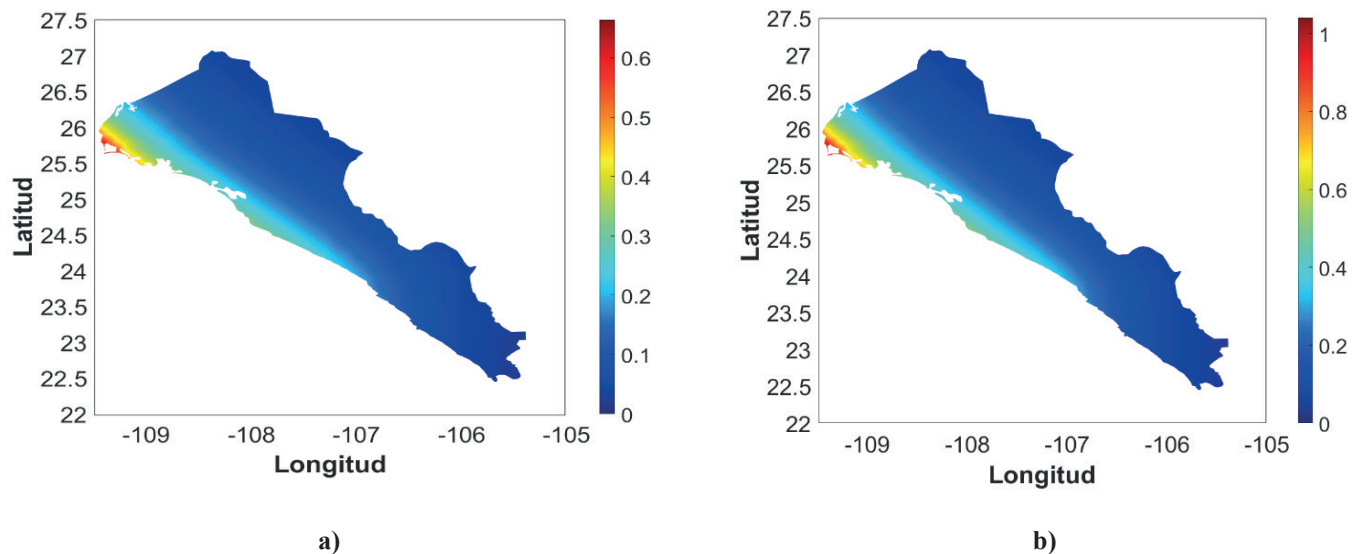


Figura 7. Mapas de peligro sísmico para  $A_{ms}$  con una velocidad de ondas de cortante de 360 m/s en términos de  $S_a$  (g) asociados a periodos de retorno de: a) 475 años y b) 2475 años

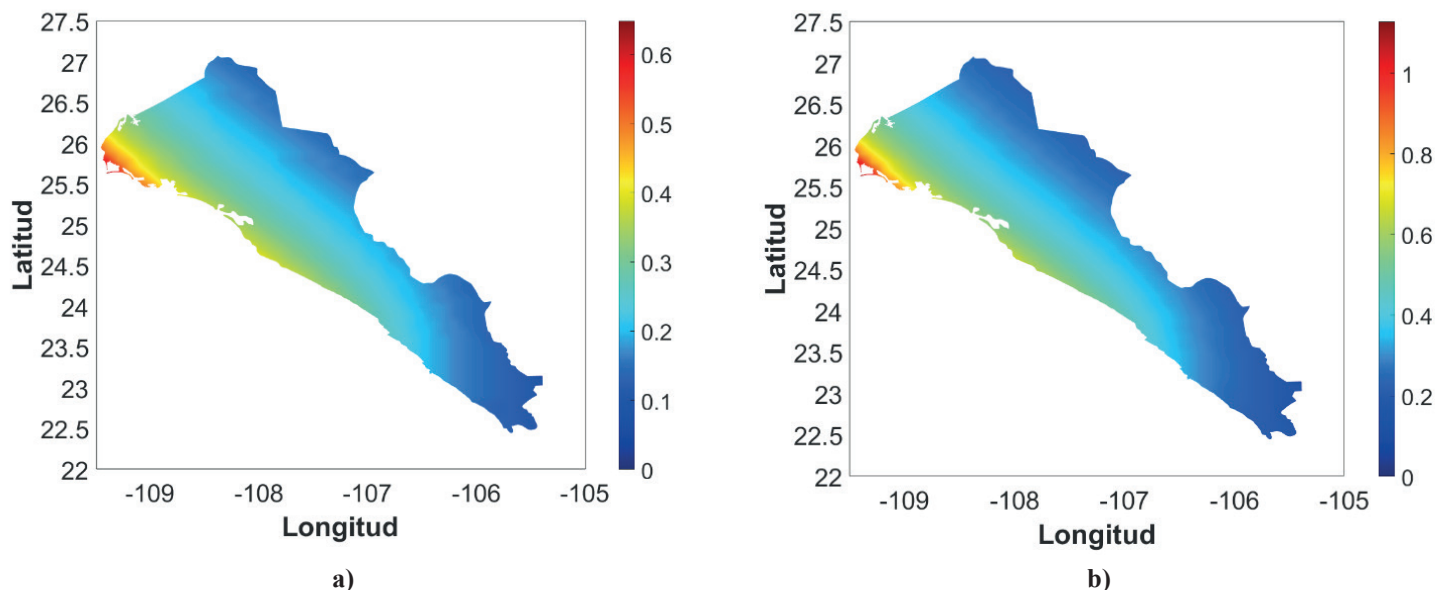


Figura 8. Mapas de peligro sísmico para una velocidad de ondas de cortantes de 360 m/s y un periodo estructural de un segundo en términos de  $S_a$  (g) asociados a periodos de retorno de: a) 475 años y b) 2475 años

Finalmente, con el análisis de peligro sísmico probabilístico desarrollado y la distribución geográfica de la región se concluye que la parte noroeste de la región de Sinaloa es la que se encuentra expuesta a un mayor peligro sísmico; en particular cerca de las Ciudades de Los Mochis y Guasave. Esto indica que las ordenadas espectrales de diseño (coeficiente sísmico requerido) son mayores para estos sitios. Para el centro de Sinaloa, donde está localizada la Ciudad de Culiacán Capital del Estado, el peligro sísmico es menor que para la zona noroeste, y conforme se avanza a la parte sureste de la región de Sinaloa el peligro tiende a disminuir. Sin embargo, es importante resaltar que en toda la región el peligro sísmico está presente, por lo tanto, las edificaciones deben diseñarse tomando en cuenta el efecto de los sismos en todo el Estado de Sinaloa.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló con el apoyo económico brindado por El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a través del Proyecto CB-01-167419 y la Beca otorgada al primer autor. Se agradece el apoyo de la Universidad Autónoma de Sinaloa dentro del proyecto PROFAPI 2015.

## REFERENCIAS

- [1] Esteva, L. (1968). Bases para la formulación de decisiones de diseño sísmico. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- [2] Cornell, C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.* 58, 1583-1606.
- [3] Romeo, R., Paciello, A. y Rinaldis, D. (2000). Seismic hazard maps of Italy including site effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 20, 85-92. DOI: 10.1016/S0267-7261(00)00040-3
- [4] Secanell, R., Goula, X., Susagna, T., Fleta, J. y Roca A. (2004). Seismic hazard zonation of Catalonia, Spain, integrating random uncertainties. *Journal of Seismology* 8, 25-40. DOI: 10.1023/B:JOSE.0000009516.91044.51
- [5] Meletti, C., Galadini, F., Valensise, G., Stucchi, M., Basili, R., Barba, S., Vannucci, G. y Boschi, E. (2008). A seismic source zone model for the seismic hazard assessment of the Italian territory. *Tectonophysics* 450, 85-108. DOI: 10.1016/j.tecto.2008.01.003

[6] Leyton, F., Ruiz, S. y Sepulveda, S.A. (2010). Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile central. *Andean Geology* 37:2, 455-472.

[7] Razeghi, H.R., Ghodrati, G., Razavian, S.A. y Rahimi, M.A. (2016). Probabilistic Seismic Hazard Analyses and Obtaining Uniform Hazard Spectra of Tabriz, Iran. *KSCE Journal of Civil Engineering* 20:5, 1813-1823. DOI: 10.1007/s12205-015-0175-9

[8] Housner, G.W. (1952). Spectrum intensities of strong motion earthquakes, Proceedings. Symposium on Earthquake and Blast Effects on Structures, Earthquake Engineering Research Institute.

[9] Arias, A. (1970). A measure of earthquake intensity, Seismic Design for Nuclear Power Plants, edited by R. J. Hansen, MIT Press, Cambridge, MA, 438-483.

[10] Von-Thun, J.L., Rochin, L.H., Scott, G.A. y Wilson, J.A. (1988). Earthquake ground motions for design and analysis of dams. In: Earthquake engineering and soil dynamics: II. Recent advance in ground-motion evaluation. Geotechnical Special Publication 20, ASCE. New York, 463-81.

[11] Shome, N. y Cornell, C.A. (1999). Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures. Reliability of Marine Structures Program, Report No. RMS-35, Department of Civil Engineering, Stanford University.

[12] Córdova, P.P., Dierlein, G.G., Mehanny, S.S.F. y Cornell C.A. (2001). Development of a two parameter seismic intensity measure and probabilistic assessment procedure. The second U.S.-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforce Concrete Building Structures, Sapporo, Hokkaido, 187-206.

[13] Riddell, R. y Newmark, N.M. (1979). Force-deformation models for nonlinear analysis. *J. Struct. Div.* 105:12, 2773-2778.

[14] Baker, J.W. y Cornell, C.A. (2005). A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 34, 1193-1217. DOI: 10.1002/eqe.474

[15] Bojórquez, E. y Iervolino, I. (2011). Spectral shape proxies and nonlinear structural response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 31, 996-1008. DOI: 10.1016/j.soildyn.2011.03.006

[16] Buratti, N. (2012). A comparison of the performances of various ground-motion intensity measures. The 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 24-28 September.

[17] Modica, A. y Stafford, P. (2014). Vector fragility surfaces for reinforced concrete frames in Europe. *Bulletin of Earthquake Engineering* 12:4, 1725-1753. DOI: 10.1007/s10518-013-9571-z

[18] Bojórquez, E. y Iervolino, I. (2011). Spectral shape proxies and nonlinear structural response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 31, 996-1008. DOI: 10.1016/j.soildyn.2011.03.006

[19] Bojórquez, E., Baca, V., Bojórquez, J., Reyes-Salazar, A., Chávez, R., & Barraza, M. (2017). A simplified procedure to estimate peak drift demands for mid-rise steel and R/C frames under narrow-band motions in terms of the spectral-shape-based intensity measure INp. *Engineering Structures*, 150, 334-345. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.046>

[20] Reiter, L. (1990). Earthquake hazard analysis - issues and insights, Columbia University Press, New York. 254 p.

[21] Kramer, S.L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall.

[22] Zúñiga, F.R., Suárez, G., Ordaz, M. y García-Acosta, V. (1997). Proyecto: Peligro Sísmico en Latinoamérica y el Caribe, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, proyecto 89-0190.

[23] Mendoza, A. (2012). Estudio de la estabilidad del valor b para regiones sismotectónicas de México. Tesis de Maestría, UNAM.

[24] Boore, D.M. y Atkinson, G.M. (2007). Boore-Atkinson NGA ground motion relations for geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters. PEER 2007/01, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California.

[25] Building Seismic Safety Council National Institute. (2003). NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA 450).

[26] Baker, J.W. (2008). An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA). White Paper, Version 1.3, 72pp.

[27] Servicio Geológico Mexicano. Disponible en: <http://portalweb.sgm.gob.mx/museo/es/riesgos/sismos/sismologia-de-mexico>.

## Semblanzas

### Robespierre Chavez Lopez



Obtuvo el grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería impartido por la Facultad de Ingeniería Culiacán de la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) en el año 2017 con mención honorífica, en 2012 adquirió el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería por la Facultad de Ingeniería Culiacán de la UAS, y es egresado de la carrera de licenciado en ingeniería civil de la Facultad de Ingeniería Culiacán de la UAS, generación 2005-2010. Ganó el Premio a la Mejor Tesis de Posgrado 2013 a nivel Estatal otorgado por el Instituto de Apoyo a la Investigación e Innovación del Estado de Sinaloa (INAPI). Ha contribuido en la elaboración de 15 artículos científicos para revistas indizadas y congresos. Realizó varias estancias de investigación en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y una estancia de investigación internacional en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona de la Universidad Politécnica de Cataluña. Actualmente se encuentra incorporado a la Facultad de Ingeniería Culiacán donde desarrolla líneas de investigación sobre temas de ingeniería sísmica e ingeniería estructural. Entre sus aportaciones científicas, destaca la elaboración de mapas de peligro sísmico para el estado de Sinaloa utilizando medidas de intensidad sísmica más eficientes.

### Edén Bojórquez Mora

Profesor Investigador de Tiempo Completo Titular C de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Grado de Licenciatura en Ingeniería Civil por la FIC de la UAS con mención honorífica. Estudios de Maestría y Doctorado en Ingeniería en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, grado con mención honorífica. **PREMIO** a la mejor tesis Doctoral en el sexto Concurso Nacional de Tesis de Doctorado (2009) otorgado por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. **PREMIO** por el artículo más sobresaliente de la Revista de Ingeniería Sísmica durante el periodo 2009-2010 como autor único, otorgado por la SMIS. **PREMIO** por dirigir la mejor tesis de Posgrado a nivel Estado otorgado por INAPI 2013-2014 y las mejores tesis de Licenciatura a nivel nacional relacionadas a la Ingeniería Estructural por la SMIE 2016. Estancia Posdoctoral en el Departamento de Ingeniería Estructural de la Universidad de Nápoles Federico II, Italia. Profesor-Investigador Repatriado por CONACYT a la Facultad de Ingeniería, UAS (2008-2009). **Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores**, y miembro honorífico del Sistema Sinaloense de Científicos y Tecnólogos, así como del **Cuerpo Académico Consolidado de Estructuras y Mecánica Básica**. Autor de casi 200 artículos en Revistas Científicas y Congresos Nacionales e Internacionales. Director de casi 50 tesis de Licenciatura, Maestría y Doctorado, actualmente dirige varias tesis de Maestría y de Doctorado incluyendo de estudiantes de la UNAM, y ha supervisado a más de 20 estudiantes durante veranos de la investigación científica. Es revisor de las revistas indizadas y congresos sobre estructuras y sísmica de mayor prestigio en el mundo. Ha impartido conferencias magistrales en países como Emiratos Árabes Unidos (Dubai). **Actualmente, Coordinador de la Maestría y Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en la unidad Culiacán y es miembro del Comité Académico y Núcleo Académico Básico de dichos Programas**. Es **Editor de la Revista de Ingeniería Sísmica** de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica la más prestigiosa en el mundo en su área escrita en español. En 2016 fue Galardonado con el Premio **Ingeniero Civil del Año** otorgado por el Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Sinaloa 2016-2017, y fue **VICEPRESIDENTE** de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica 2016-2017. Entre sus aportaciones científicas destaca la *creación de una nueva medida de intensidad sísmica (Intensidad IB) representativa del potencial destructivo de un terremoto*, la cual está siendo reconocida por investigadores de las instituciones más prestigiadas a nivel mundial tales como las Universidades de Stanford en Estados Unidos, Imperial College de Londres, Bolonia, Pavia y Nápoles en Italia, Grenoble Francia, entre otras. Actualmente, el Dr. Bojórquez está trabajando en la generación de registros sísmicos, de viento, mapas de peligros naturales, fragilidad de estructuras, edificios con disipadores de energía, diseño sismo-resistente sustentable y otros temas encaminados al futuro desarrollo de un Reglamento de Construcción específico para los Municipios del Estado de Sinaloa.



# Comportamiento mecánico de adoquines prefabricados con agregados reciclados provenientes de los residuos de la construcción

## Mechanical behavior of prefabricated pavers with recycled aggregates from construction waste

Carolina Arredondo Armenta<sup>1</sup>, Olimpia Alvarado Fierro<sup>1\*</sup>, Carlos Hernán Lora Urías<sup>1</sup>

### RESUMEN

En este trabajo se pretende reconocer lugares en la región central del Estado de Sinaloa donde se depositen escombros con el objetivo de disponer de ellos para llevar a cabo el reciclaje de concreto, obtener las propiedades físicas del agregado natural y el agregado proveniente del reciclaje y de los cementos más comerciales en la localidad para elaborar mezclas de mortero. Adicionalmente evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas creadas y elaborar piezas de adoquín con la mezcla que presente el mejor comportamiento mecánico en términos de su resistencia a la compresión. Para ello se aplica la metodología que establecen las Normas Mexicanas del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). Finalmente se indican los beneficios que pueda brindar la práctica del uso de concreto reciclado en la ingeniería..

Recibido: agosto 2017  
Aceptado: octubre 2017  
Publicado: marzo 2018

### Palabras Clave:

Reciclaje, residuos de la construcción, agregados reciclados, adoquines.

### Keywords:

Recycling, construction waste, recycled aggregates, pavers.

### ABSTRACT

This work aims to recognize places in the central region of the State of Sinaloa where debris are deposited to dispose of them to implement concrete recycling, obtain the physical properties of the natural aggregate, the recycling aggregate and the most commercial cements in the locality to make mortar mixtures. Additionally, evaluate the mechanical performance of the created mixtures and elaborate cobble pieces with the mixture which presents the best performance in terms of its resistance to compression. For this purpose, the methodology established by the Mexican Standards of the National Organization for Standardization and Certification of Construction and Building (ONNCCE) is applied. Finally, the benefits of using recycled concrete in civil engineering can be provided.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los primeros usos que se le dieron a los materiales provenientes de la demolición de edificios fueron después de la Segunda Guerra Mundial. Lo anterior debido a la destrucción de numerosas edificaciones en las ciudades de Gran Bretaña y Alemania principalmente, donde surge la idea para lograr su reconstrucción, y con esto reutilizar el material reciclado en las obras de Ingeniería Civil. En 2009 en Valencia, España, se inauguró el primer puente internacional construido totalmente con concreto reciclado, proveniente de una estructura demolida con anterioridad. La obra, tiene una longitud de 165 metros y para su construcción se emplearon 348 metros cúbicos de agregados reciclados.

\*Autor para correspondencia.  
Direcciones de correo electrónico: Olimpia Alvarado Fierro [oaf@uas.edu.mx](mailto:oaf@uas.edu.mx).

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Sinaloa, FIC, Culiacán Rosales, Sinaloa, México. C.P. 80040

Una gran cantidad de escombros producto de la demolición de estructuras se generan anualmente en los países desarrollados, en los que los depósitos de escombros derivados de la actividad de la construcción llegan a ser un serio problema social y ambiental para las ciudades, debido a la necesidad de disponer terrenos para su vertimiento, como también, al alto costo que implica su manejo.

De acuerdo a datos de la Unión Europea, en 1992 los países pertenecientes a ella generaron 200 millones de toneladas anuales de residuos de construcción y demolición, una problemática originada por el gran volumen de escombros [1].

En varios países de la Unión Europea, la actividad del reciclaje de residuos de la construcción y demolición tiene 20 años aproximadamente [2], donde el reciclaje de concreto ya es una realidad, mientras que en México, una empresa que procesa desechos originados por la industria de la construcción, lucha por sobrevivir. Es por ello, que se pretende encontrar resultados positivos ante la práctica del reciclaje de escombros [3].

El objetivo general que se quiere alcanzar es “utilizar los escombros provenientes de la construcción para el reciclaje del concreto y, a partir de él, obtener agregados para mezclas de mortero utilizadas en la fabricación de adoquín”.

Para lograr este objetivo, es necesario puntualizar los objetivos específicos, que son: identificar lugares de disposición de residuos en la región central del Estado de Sinaloa, y disponer de escombros para llevar a cabo el reciclaje. Obtener las propiedades físicas del agregado proveniente del reciclaje de concreto. Obtener las propiedades físicas de los tres cementos más comerciales en la localidad para la elaboración de mezclas de mortero. Elaborar mezclas de mortero con agregados reciclados, con cada uno de los diferentes tipos de cemento. Evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas creadas tanto con agregados naturales como reciclados. Realizar una comparación entre los datos obtenidos de cada una de las mezclas de mortero. Elaborar piezas de adoquín con la mezcla que presente el mejor comportamiento, para darle un uso específico según su resistencia a la compresión.

En el tema de reciclaje de materiales de construcción, hace falta concretar muchos aspectos por los que se le ha cuestionado, dichos factores pueden enunciarse partiendo desde un primer plano, que no se tiene a ciencia cierta, la cantidad exacta de escombros en cada país; además, resulta complicado el hecho de

compartir la ideología del concreto reciclado entre todos los países y que sea aceptado formalmente, dado que la diversidad de los materiales existentes en las obras civiles es muy extensa [3].

Concretos Reciclados, como se conoce, es la única empresa en México dedicada a reciclar el escombros, fue la primera en América Latina, pero a pesar de lo fructuoso que podría ser el negocio, en un país donde se generan 30,000 toneladas diarias y que en los últimos años, estudios nacionales e internacionales demuestran que las propiedades físicas y mecánicas del concreto constituido por adiciones controladas de acuerdo al uso del agregado reciclado en su mezcla, garantizan la utilización adecuada de este material, el negocio no se ha podido expandir [4].

Se debe considerar que los escombros tienen un potencial muy alto para considerarse en el reciclaje, debido a las grandes cantidades que se generan diariamente, por otro lado, no es fácil competir contra los productos convencionales existentes en el mercado.

En la construcción, se define mortero a la combinación de aglomerantes y aglomerados, los más comunes están compuestos por cemento, agregado fino y agua, que se distingue del concreto por la ausencia de agregados gruesos. En el mortero reciclado, el material que se somete al proceso de recuperación es el agregado fino. Los estudios enfocados al mortero reciclado hacen referencia a su buen comportamiento, ya que este cumple con la característica de fluidez marcada por la normativa vigente y se declara, que como pasa con el concreto, mediante una buena supervisión y un apropiado manejo, genera buenos resultados en las funciones para las que está destinado [5].

Se sobreentiende que los productos de primera generación son aquellos fabricados con materiales vírgenes, o materias primas, En la actualidad, surge la necesidad de someter a evaluaciones a los nuevos productos llamados de “segunda generación”, los cuales se crean mediante el reciclaje de los desechos provenientes del mismo producto o de uno diferente.

Es una realidad, que tarde o temprano, el ser humano se verá en la necesidad de recurrir a esta práctica, influenciado por la falta de terrenos para el depósito de los escombros y la alza de precios en el manejo de éstos, o quizá, por la degradación de este material debido a su explotación. Con base en estos factores, se busca la manera de encontrar los beneficios que pueda brindar la práctica del uso de concreto reciclado, enfocándose a las propiedades físicas y mecánicas [6]

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Materiales

Los materiales a utilizar para la fabricación de estos productos son: cemento, agregados, agua y pigmentos o aditivos (en caso de que se requiera).

#### a) Agregados

La arena que se utiliza es resultado de un proceso de preparación de material proveniente de la demolición de obras civiles o de depósitos de escombros.

El proceso de preparación del material consiste básicamente en triturar de manera manual y mecánica y cribar por medio de mallas (ver Figuras 1, 2 y 3).

#### b) Cementos de Referencia

Para la selección del tipo de cemento a utilizar, se



Figura 1. Preparación del material, etapa de trituración manual

seleccionan las 3 marcas más comerciales de la entidad, son cementos portland compuesto Tipo CPC 30R. Para fines de esta investigación, se identifican cada uno de ellos de la siguiente manera: Cemento Tipo I, Cemento Tipo II y Cemento Tipo III.

### 2.2 Ensayes a los materiales

#### a) A los agregados (concreto reciclado)

La prueba de granulometría y módulo de finura, basada en la Norma Mexicana NMX-C-077-ONNCCE [7], consistente en determinar el porcentaje presente de cada uno de los tamaños de material una vez que culmine el proceso de trituración y cribado, con el fin de conocer la distribución de las partículas de diferentes tamaños a través de las cribas.

Con la Norma NMX-C-073-ONNCCE [8], se determinan los pesos volumétricos, tanto suelto como compacto de los agregados, estos datos se requieren para el diseño de mezclas de mortero.

El contenido de impurezas se obtiene con la Prueba de Colorimetría. Diferencia de alturas y lavado por la malla no. 200, la cual se basa en la Norma NMX-C-088-ONNCCE [9], que determina el porcentaje de finos de la muestra de agregados.

#### b) A los cementantes



Figura 2. Preparación del material, etapa de trituración mecánica



Figura 3. Cribado por mallas, se deja el material clasificado como arena (material con diámetro menor a 4.75 mm o que pasa la malla no. 4)

El peso volumétrico del cemento lo establece la Norma NMX-C-073-ONNCCE [8], se lleva a cabo en dos variantes: calcular el peso volumétrico suelto y peso volumétrico compactado de cada uno de los tres tipos de cemento a estudiar. Cabe mencionar que esta norma es utilizada en agregados, y es aplicable también a los cementos hidráulicos.

La densidad de los cementantes hidráulicos se realiza de acuerdo a la Norma NMX-C-152-ONNCCE [10], que tiene como objetivo determinar el volumen

líquido desplazado de la mezcla y que no contenga vacíos al calcular el parámetro de densidad.

La prueba de consistencia normal se lleva a cabo bajo la Norma NMX-C-057-ONNCCE [11] y mide la resistencia que opone la pasta de cemento a la penetración del vástago de un aparato normalizado, llamado Aparato de Vicat. La consistencia normal se define como la cantidad de agua necesaria para que el vástago de 1 centímetro de diámetro, consiga penetrar  $10\text{mm} \pm 1\text{mm}$  dentro de la pasta de cemento elaborada, esto en un lapso de 30 segundos. Los tiempos de fraguado Inicial y final los establece la Norma NMX-C-059-ONNCCE [12]. Una vez que se obtiene la consistencia normal, se deja reposar el espécimen en una cámara de humedad o desecador, durante 30 minutos, después de su moldeo. Al transcurrir los 30 minutos, se extrae del desecador y se coloca de nuevo en el Aparato de Vicat, pero ahora con la aguja de 1mm de diámetro para determinar su penetración, se repite este procedimiento pero ahora dejando reposar al espécimen solo 15 minutos en la cámara de humedad, hasta que se logre una penetración de 25mm. El tiempo de fraguado final será aquel, en el cual la misma aguja, no consiga penetrar visiblemente la pasta del cemento en estudio.

### 2.3 Fabricación de especímenes de prueba

Con la finalidad de hacer la selección definitiva del tipo de cemento a utilizar, se crean especímenes de prueba, hasta encontrar la mezcla que presente la mayor resistencia a la compresión.

Se establecieron las proporciones tomando como base una muestra de 3 kg de arena y por medio de una regla de tres se indica la cantidad de cemento que se debe agregar, con base en el peso volumétrico suelto de los dos materiales. Con esto se procede a realizar la mezcla, donde varía la cantidad de agua; la mezcla será aceptada cuando cumpla con la prueba de fluidez, y con la mezcla aceptada se elaboran los cubos de mortero.

Para la correcta elaboración de la mezcla de mortero y para la fabricación de los especímenes, se recurre a la Norma NMX-C-085-ONNCCE [13], la cual sirve de guía en el uso correcto de la mezcladora, así como, en los tiempos de mezclado y reposo del material. Al concluir con el tiempo de mezclado para la elaboración de la pasta, inmediatamente se lleva a cabo la prueba de fluidez, la cual es necesaria para determinar la trabajabilidad de las pastas de morteros de cemen-

tantes hidráulicos y ésta se basa en la Norma NMX-C-144-ONNCCE [14].

Una vez que concluye la etapa de elaboración de las mezclas, el siguiente paso es elaborar para cada mezcla diferente de mortero, nueve (9) cubos de 50 mm de arista, donde sus moldes son de metal, constituidos con paredes lo suficientemente rígidas para evitar deformaciones. Esto con la finalidad de crear especímenes para que sean sometidos a un proceso de curado y posteriormente realizarles los ensayos a compresión, correspondientes a la edad de 7, 14 y 28 días, los especímenes de prueba se realizan de acuerdo a la Norma NMX-C-061-ONNCCE [15].

### 2.4 Fabricación de adoquín con mortero reciclado

#### a) Selección final de los materiales

El cemento se selecciona de acuerdo a los resultados finales de la resistencia a la compresión de los cubos de mortero, específicamente el que presenta mayor resistencia ante la aplicación de carga axial. Mientras que para el agregado, se utiliza el material reciclado preparado en el proceso de trituración y cribado. Para la fabricación del adoquín con mortero reciclado, se recurre al apoyo de una empresa de prefabricados de la región, donde cuentan con los moldes y materiales necesarios para su correcta elaboración.

Para la fabricación de las piezas de adoquín con mortero reciclado (ver Figura 4), fue Tipo Cruz de Tasco de dimensiones  $15 \times 25 \times 5\text{cms}$  (ver Figura 5).

El punto final y quizá más significativo de todo el proceso, es conocer si los adoquines prefabricados con mortero reciclado ofrecen realmente la calidad y resistencia necesaria para poder ser utilizados en los pavimentos y sustituir a los adoquines constituidos de arena natural. Para determinar la resistencia a la



Figura 4. Fabricación de las piezas de adoquín

compresión del adoquín se emplea la Norma NMX-C-036-ONNCCE [16].

Además de determinar la resistencia a la compresión de las piezas de adoquín, se tiene que determinar la absorción de las mismas, ya que es un requisito físico que marca la Norma NMX-C-314-ONNCCE [14].



**Figura 5. Adoquín Tipo Cruz de Tabasco**

Para llevar a cabo esta prueba, se seleccionan al azar, cinco piezas de adoquín del total del lote de prefabricación y que no fueron sujetas a carga axial, las cuales se introducen en el horno alrededor de 24 horas, con la finalidad de que estén completamente secas, para obtener el peso seco de la muestra. Posteriormente, las piezas se depositan en un recipiente donde se sumergen en agua por un periodo aproximado de 24 horas, para lograr que se saturen. Una vez que transcurre el tiempo, se extraen del contenedor y se elimina el agua superficial con un paño y se calcula su peso inmediatamente, para luego determinar la absorción total, esta prueba se basa en la Norma NMX-C-037-ONNCCE [17].

### 3. RESULTADOS

La Tabla 1, muestra los resultados de las pruebas físicas de los agregados, tanto para el natural como el reciclado.

En la Tabla 2, se muestran los resultados de las características físicas de los tres tipos de cementos seleccionados para su estudio.

Con la elaboración de los especímenes de prueba (cubos) y sus correspondientes resultados del ensaye a la compresión simple, se selecciona el tipo de cemento.

La Tabla 3 muestra tales resultados para los tres tipos de cementos. De ellos, el cemento Tipo I es el de mejor comportamiento mecánico y es con éste con el que se elaboran las piezas de adoquín.

**Tabla 1. Características físicas de los agregados**

| Pruebas físicas de los agregados               | Agregado natural | Agregado reciclado |
|------------------------------------------------|------------------|--------------------|
| Módulo de finura                               | 2.97             | 3.4                |
| Peso volumétrico suelto (Kg/m <sup>3</sup> )   | 2101.13          | 1867.50            |
| Peso volumétrico compacto (Kg/m <sup>3</sup> ) | 2271.25          | 2029.50            |
| Impurezas, colorimetría (tono)                 | 1-2              | 1-2                |
| Impurezas, diferencia de alturas (% de finos)  | 4.794            | 4.717              |

**Tabla 2. Características físicas de los cementos**

| Pruebas físicas a los cementos               | Tipo I | Tipo II | Tipo III |
|----------------------------------------------|--------|---------|----------|
| Peso volumétrico (Kg/m <sup>3</sup> )        | 1403   | 1423    | 1462     |
| Densidad (%)                                 | 3.60   | 4.20    | 1.00     |
| Consistencia normal, humedad de la pasta (%) | 39.0   | 35.8    | 36.4     |
| Tiempo de fraguado inicial (min)             | 161    | 192.5   | 180      |
| Tiempo de fraguado final (min)               | 225    | 247.5   | 225      |

Para la fabricación de las piezas de adoquín, se utiliza el cemento seleccionado (Tipo I) y agregado reciclado y éstas piezas se ensayan a la compresión simple, la Tabla 4 muestra esos resultados, tanto para las piezas elaboradas con agregados reciclados, como para las piezas prefabricadas con agregados tradicionales. En la prueba de absorción, los adoquines elabo-

rados con agregado reciclado obtuvieron un resultado del 11%.

**Tabla 3. Selección del tipo de cemento para elaborar las piezas de adoquín**

| Ensaye a la compresión de cubos de mortero | Agregado reciclado (escombros) |         |          |
|--------------------------------------------|--------------------------------|---------|----------|
|                                            | Tipo I                         | Tipo II | Tipo III |
| 7 días                                     | 193                            | 140     | 221      |
| 14 días                                    | 203                            | 150     | 205      |
| 28 días                                    | 261                            | 178     | 235      |

**Tabla 4. Ensaye a la compresión de adoquines**

| Edad    | Agregado natural (f'c, kg/cm <sup>2</sup> ) | Agregado reciclado (f'c, kg/cm <sup>2</sup> ) |
|---------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 7 días  | -                                           | -                                             |
| 14 días | -                                           | 282                                           |
| 21 días | -                                           | 273                                           |
| 28 días | 412                                         | 301                                           |

La Tabla 5 muestra los requisitos físicos que establece la Norma para Adoquines para su uso en pavimentos y con referencias de la resistencia a la compresión, dimensiones y la absorción, su clasificación por tipo y aplicaciones [14].

#### 4. CONCLUSIONES

El valor del módulo de finura del material reciclado, se encuentra por encima del rango considerado óptimo para una arena (2.3-3.1), mientras que el de la arena natural cumple con este parámetro.

En la prueba de impurezas el material reciclado presenta poco contenido orgánico, similar al del agregado natural.

Los resultados en las pruebas realizadas al agregado reciclado, muestran que si el tamaño del agregado se reduce es posible mejorar sus propiedades físicas y

que el comportamiento sea similar al de un agregado natural.

**Tabla 5. Requisitos físicos que establece la Norma NMX-C-314-ONNCCE-Construcción-Concreto-Adoquines para uso en pavimentos**

| Tipo | Espesor mínimo en cm | Absorción en agua por 24 horas (% máximo) | Resistencia a la compresión en N/mm <sup>2</sup> (kg/cm <sup>2</sup> ) | Aplicación                                               |
|------|----------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| A    | 4 a 6                | 8                                         | 24.0<br>(250)                                                          | Andadores, plazuelas, banquetas y cocheras.              |
| B    | 8                    | 8                                         | 24.0<br>(250)                                                          | Tránsito ligero en zonas residenciales.                  |
| C    | 8                    | 8                                         | 29.0<br>(300)                                                          | Tránsito medio en calles y estacionamientos de servicio. |
| D    | 8 ó mas              | 8                                         | 34.0<br>(350)                                                          | Tránsito pesado.                                         |

Los especímenes de prueba fabricados con el agregado reciclado, lograron resistencias muy cercanas a los fabricados con arena natural, demostrando que el hacer uso de este material no afecta en la calidad de las piezas, en cuanto a resistencia a la compresión simple.

El cemento Tipo I, presentó el mejor comportamiento en los especímenes fabricados en combinación con el material reciclado, dando una mayor resistencia a la compresión simple que los cementos Tipo II y Tipo III a los 28 días.

El porcentaje de absorción de los adoquines elaborados con cemento Tipo I, está por encima del valor que establece la norma NMX-C-314-ONNCCE, para el uso de adoquines en pavimentos que es del 8%.

Los adoquines prefabricados con mortero reciclado, alcanzaron resistencias esperadas para poder ser considerados como “adoquines para pavimentos”, basado en lo que establece la normatividad vigente.

De acuerdo a la ficha técnica de adoquines para uso en pavimento y a los requisitos físicos (solamente dimensiones y resistencia a la compresión) que ésta

Menciona, el uso permisible de estos adoquines es Tipo A y son aptos para usarse en andadores, plazuelas, banquetas y cocheras.

## AGRADECIMIENTOS

A los colaboradores del proyecto Ing. Francisco Javier Osuna Picos y el Ing. Julio César González Félix. A la Universidad Autónoma de Sinaloa, a través de sus Proyectos PROFAPI, por el financiamiento otorgado. A la Empresa BCA Block, S.A. de C.V. por el apoyo brindado para elaborar los especímenes de prueba.

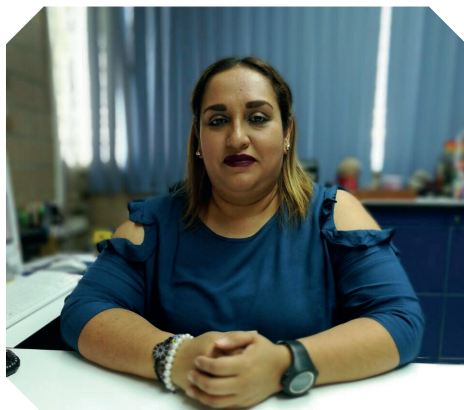
## REFERENCIAS

- [1] Bedoya, Carlos Mauricio, “El concreto reciclado con escombros como generador de hábitats urbanos”, Escuela de Construcción. Universidad Nacional de Colombia. (2003).
- [2] Montoya, H.D. Pino, C.L., Valdés G.A., “Reutilización de residuos del hormigón”, BIT 12 (41), Chile. (2005).
- [3] Glinka, María E. Vedoya, Daniel E. Pilar, Claudia A, “Estrategias de reciclaje y reutilización de residuos sólidos de construcción y demolición”, Secretaria de Investigación y Posgrado – Facultad de Arquitectura y Urbanismo Universidad Nacional del Nordeste, Argentina. (2006).
- [4] México. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. Revista electrónica (online) [www.imcyc.com.mx](http://www.imcyc.com.mx) “Construcción y Tecnología del concreto: problemas, causas y soluciones”. (Junio, 2012)
- [5] Álvarez, Jorge Luis, “Morteros de albañilería con escombros de demolición”, Materiales de construcción, Volumen 41 No. 246, España.(1997).DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/mc>.
- [6] Buck, Alan, “Recycled concrete as source of aggregate”, Journal of the ACI. Volumen 41 No. 5, Detroit. (1977).
- [7] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCE), “Método de prueba para análisis granulométrico”, NMX-C-077-ONNCCE, 1997.
- [8] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCE), “Masa volumétrica”, NMX-C-073-ONNCCE, 2004.
- [9] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCE), “Determinación de impurezas orgánicas en el agregado fino”, NMX-C-088-ONNCCE, 1997.
- [10] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCE), “Determinación de la densidad”, NMX-C-152-ONNCCE, 2010.
- [11] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCE), “Determinación de la consistencia normal”, NMX-C-057-ONNCCE, 2010.
- [12] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCE), “Determinación del tiempo de fraguado de cementantes hidráulicos”, NMX-C-059-ONNCCE, 2010.
- [13] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCE), “Método Estándar para el mezclado de pastas y morteros cementantes hidráulicos”, NMX-C-085-ONNCCE, 2010.
- [14] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCE), “Adoquines para uso en pavimentos. Ficha técnica, NMX-C-314-ONNCCE, 1986.
- [15] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCE), “Determinación de la Resistencia a la Compresión de cementantes hidráulicos”, NMX-C-061-ONNCCE, 2010.
- [16] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCE), “Resistencia a la compresión, método de prueba para bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines”, NMX-C-036-ONNCCE, 2013.
- [17] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCE), “Determinación de la absorción de agua y absorción inicial de agua” NMX-C-037-ONNCCE, 2005.

## Semblanzas

### Carolina Arredondo Armenta

Es egresada de la Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Realizó para su egreso, la Tesis “Comportamiento de adoquines prefabricados con agregados de concretos reciclados provenientes de los residuos de la construcción”. Tiene un Diplomado en Software Aplicado a la Ingeniería. Actualmente labora en el Área de Control de Costos.



### Olimpia Alvarado Fierro

Es Ingeniero Civil por la Universidad Autónoma de Sinaloa, con Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres por la Universidad Autónoma de Chihuahua. Es Profesor-Investigador de Tiempo Completo con adscripción en la Facultad de Ingeniería Culiacán, miembro del Área Académica de Transportes. Ha publicado diversos artículos en congresos nacionales y ha dirigido 13 tesis concluidas de licenciatura y dos que se encuentran en proceso.

### Carlos Hernán Lora Urías

Es Ingeniero Civil por la Universidad Autónoma de Sinaloa, con Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres por la Universidad Autónoma de Chihuahua. Es Profesor-Investigador de Tiempo Completo con adscripción en la Facultad de Ingeniería Culiacán, miembro del Área Académica de Transportes. Ha publicado diversos artículos en congresos nacionales y ha dirigido 11 tesis concluidas de licenciatura y cuatro que se encuentran en proceso.



# Simulación de registros de viento usando modelos de densidad espectral

## Wind records simulation using spectral density models

Omar Payán-Serrano<sup>1\*</sup>, Eden Bojórquez Mora<sup>1</sup>

### RESUMEN

Debido a la falta de registros reales de velocidades del viento, los ingenieros civiles y estructuralistas suelen utilizar enfoques simplificados y conservadores para considerar los efectos dinámicos de viento. Diversos estudios sugieren que es posible obtener registros sintéticos que representen el viento turbulento a partir de modelos de densidad espectral, los cuales describen la componente turbulenta como la suma de múltiples ondas sinusoidales de diferente amplitud y frecuencia. El objetivo de este trabajo es analizar algunos de los modelos de densidad espectral más utilizados, con el fin de distinguir el que mejor representa el campo de velocidades del viento para aplicaciones de diseño eólico de estructuras. Los resultados permiten observar que los modelos de von Karman, Solari y von Karman-Harris generan registros sintéticos con características cercanas a las definidas por los parámetros del viento turbulento.

### ABSTRACT

Recibido: agosto 2017  
Aceptado: octubre 2017  
Publicado: marzo 2018

#### Palabras Clave:

Análisis dinámico, simulación de viento, funciones de densidad espectral.

Due to the lack of real wind records to perform dynamic analysis of structural systems, civil and structural engineers commonly use simplified and conservative approaches to consider the dynamic effects of wind. Several studies suggest that is possible to obtain synthetic wind records from spectral density models, which describe the turbulent component as the sum of multiple sinusoidal waves with different amplitude and frequency. The aim of this paper is to analyze some of the models frequently used in order to distinguish which best represents the wind velocity field for wind design. The results allow us to observe that von Karman, Solari and von Karman-Harris models generate synthetic records with characteristics close to objective values.

#### Keywords:

dynamic analysis, wind simulation, spectral density functions

## 1. INTRODUCCIÓN

La tendencia arquitectónica a diseños cada vez más esbeltos ha forzado a la ingeniería civil a considerar análisis del tipo dinámico para evaluar el comportamiento de las estructuras. La falta de registros reales de velocidades del viento con características adecuadas para el análisis dinámico estructural genera la motivación de estudiar diversos modelos de densidad espectral de potencia para producir series de tiempo simuladas que representen de manera aproximada el campo de velocidades del viento.

\*Autor para correspondencia.

Dirección de correo electrónico: Omar Payán-Serrano, [omarjps@hotmail.com](mailto:omarjps@hotmail.com)

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Sinaloa, FIC, Culiacán Rosales, Sinaloa, México. C.P. 80040

La Figura 1 describe un edificio afectado por fuerzas dinámicas  $p(t)$ , las cuales varían en función del tiempo y la altura. Las fuerzas dinámicas son generadas a partir de la variación de la velocidad del viento y el área de obstrucción o choque donde se ejerce la presión eólica. Como se puede observar en la figura, la velocidad del viento puede ser representada por una señal o serie de tiempo, la cual contiene el valor de velocidad para cada instante de tiempo; a este tipo de viento se le conoce como viento turbulento. Debido al cambio de características turbulentas del viento con respecto a la altura, se requiere de registros sintéticos individuales que describan el comportamiento de la velocidad para cada punto en el espacio.

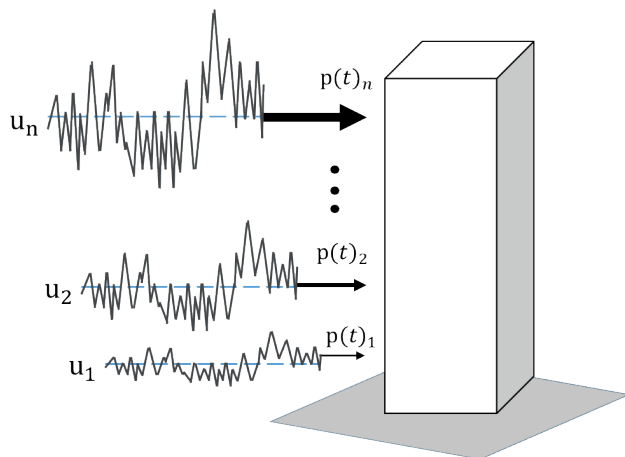


Figura 1. Edificio afectado por viento turbulento

### 1.1 Viento Turbulento

Las irregularidades de la superficie de la tierra provocan que el viento adquiera un comportamiento turbulento. Esta influencia llega a un nivel de altura nombrado capa límite atmosférica, siendo esta capa el límite de la atmosfera donde, a partir de ella, el viento deja de tener influencia debido a la rugosidad del terreno (Manwell, 2009). A la variación de velocidad del viento con la altura se le conoce como perfil vertical de velocidades del viento. El viento normalmente puede ser descompuesto como una velocidad media  $\bar{u}$  con una dirección predominante  $x$  y tres componentes turbulentas perpendiculares (longitudinal  $u(t)$ , lateral  $v(t)$  y vertical  $w(t)$ ); con la componente turbulenta longitudinal alineada al eje  $x$ , formando un plano horizontal con la componente lateral alineada al eje  $y$  y perpendicular al plano la componente vertical alineada al eje  $z$ . La Figura 2a muestra la variación típica del viento con la altura y la Figura 2b la descomposi-

ción vectorial de una muestra de velocidad del viento en el punto  $m$ .

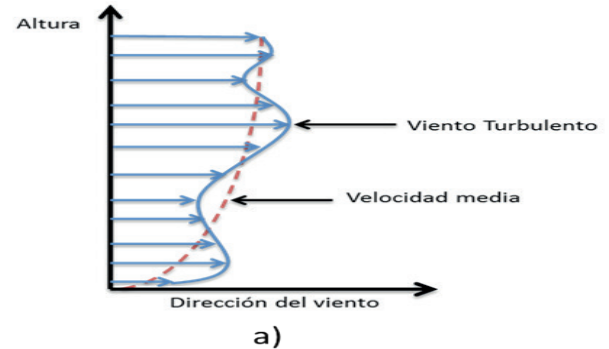


Figura 2. a) Perfil vertical de velocidades

La componente longitudinal es el resultado de sumar la parte turbulenta  $u(t)$  con la velocidad media  $\bar{u}$ . Esta componente es la de mayor interés en el análisis estructural porque es de principal incidencia en las magnitudes de los parámetros de diseño; generando los valores máximos de deformación, momento de volteo y cortante en la base. Para el cálculo del perfil vertical de velocidades medias, los códigos de diseño consideran factores de rugosidad. Uno de los modelos más utilizados es el conocido como ley de potencia. La velocidad básica o regional es un valor que depende de la ubicación geográfica del sitio de interés y frecuentemente se promedia a 3s y a una altura de referencia de 10 m.

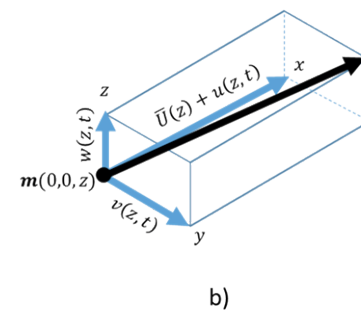


Figura 2. b) Descomposición vectorial de la velocidad del viento en el punto  $m$

### 1.1.2 Intensidad de turbulencia y longitud de escala

La medida más básica de turbulencia es conocida como intensidad o índice de turbulencia. La intensidad de turbulencia es una medida de dispersión basada en la velocidad media. Este parámetro se define como la relación de la desviación estándar y la velocidad media (Holmes, 2001). En el caso de terrenos homogéneamente horizontales, la intensidad es una función de la altura y la rugosidad del terreno.

La escala de longitud puede ser representada físicamente como la longitud promedio de los vórtices o torbellinos. En su forma matemática se define como el tiempo promedio en el cual existe correlación de las fluctuaciones de velocidad del viento multiplicado por la velocidad media. Este tiempo promedio es conocido como escala de tiempo y puede ser estimado a partir de la integración de la función de auto-correlación desde cero a la primera raíz. Después de estudiar el comportamiento del viento al utilizar distintos registros reales del viento, diversos autores han propuesto expresiones empíricas para el cálculo de la longitud de escala.

### 1.2 Función de densidad de potencia

La componente longitudinal puede ser considerada como el resultado de una composición de varias ondas superpuestas a una velocidad media. Estas ondas tendrían variación de frecuencia, amplitud y fase. La función de densidad espectral describe la relación entre frecuencia y amplitud correspondiente a la parte turbulenta del viento. Varios autores han presentado modelos matemáticos para representar el contenido de potencia del viento en función de la frecuencia. Los modelos frecuentemente utilizados en ingeniería eólica para la componente longitudinal son von Karman (1948), von Karman-Harris (Harris, 1968), Kaimal et al. (1972), Modified Kaimal (Hiriart, 2001), Solari (1993), Davenport (1961):

von Karman:

$$S_u(z, n) = \frac{4(5.7u^{*2})L_u(z)/U(z)}{1.339 \left[ 1 + 39.48 \left( \frac{n L_u(z)}{U(z)} \right)^2 \right]^{5/6}} \quad (1)$$

von Karman-Harris:

$$S_u(z, n) = \frac{4(\sigma^2)L_u(z)/U(z)}{\left[ 1 + 70.8 \left( \frac{n L_u(z)}{U(z)} \right)^2 \right]^{5/6}} \quad (2)$$

Kaimal:

$$S_u(z, n) = \frac{105u^{*2} z / \bar{U}(z)}{\left[ 1 + 33 \left( \frac{n z}{\bar{U}(z)} \right) \right]^{5/3}} \quad (3)$$

Modified Kaimal:

$$S_u(z, n) = \frac{100u^{*2} z / \bar{U}(z)}{\left[ 0.44 + 33 \left( \frac{n z}{\bar{U}(z)} \right) \right]^{5/3}} \quad (4)$$

Solari:

$$S_u(z, n) = \frac{6.868\sigma^2 L_u(z) / \bar{U}(z)}{\left[ 1 + 10.302 \left( \frac{n L_u(z)}{\bar{U}(z)} \right) \right]^{5/3}} \quad (5)$$

Davenport:

$$S_u(z, n) = \frac{2\sigma^2 L / \bar{U}(z)}{3 \left[ 1 + \left( \frac{n L}{\bar{U}(z)} \right) \right]^{4/3}} \quad (6)$$

donde:

- $S_u(z, n)$  es la función de densidad de potencia.
- $n$  es la frecuencia en Hz.
- $L_u$  es la escala de longitud.
- $u^*$  es la velocidad de fricción.

De acuerdo con von Karman (1948) la velocidad de fricción está relacionada con la desviación estándar de la siguiente manera:

$$\sigma^2 = 5.7u^{*2} \quad (7)$$

En este trabajo se utilizaron los modelos anteriormente mencionados con el propósito de generar registros sintéticos a partir del método de representación espectral.

## 2. MARCO TEÓRICO

Los registros sintéticos del viento pueden ser generados a partir del método de simulación por representación espectral propuesta por Shinozuka (1972). Este método está basado en la expresión compacta o reducida de Series de Fourier al sustituirse y adaptar el coeficiente de amplitud por la función de densidad de potencia. Una modificación del método de Shinozuka

permite considerar la influencia cruzada del viento con relación a otros puntos en el espacio. Para el caso de  $m$  procesos estocásticos estacionarios  $u_j(t), j=1,2,3,\dots,m$ ; y  $t = i\Delta t, i = 0,1,2,\dots,N_s$ , la expresión para simular registros sintéticos de la parte turbulenta de la componente longitudinal en varios puntos con separación vertical es la siguiente (Shinozuka y Jan 1972):

$$u_j(t) = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^{N_f} |H_{jk}(\omega_l)| \sqrt{2\Delta\omega} \cos[\omega_l t + \theta_{kl}] \quad (8)$$

donde:

$u_j(t)$  es una señal con media cero representada por un vector de tamaño  $1 \times N_s$ .

$H_{jk}(\omega_l)$  es un elemento de la matriz triangular inferior  $H(\omega_l)$  de la talla, la cual es definida por el proceso de factorización de Cholesky a partir de la matriz de densidad espectral cruzada.

$\Delta\omega$  es el incremento de frecuencia angular (rad/s), procedimiento definido en Veers (1988).

$\theta_{kl}$  es un elemento de la matriz de Angulo de fase  $\Theta$  con tamaño  $m \times N_p$  generado aleatoriamente con distribución uniforme de  $[0, 2\pi]$ .

$N_f$  es el número de valores o muestras obtenidos a partir de la discretización de la función de densidad espectral.

La matriz de densidad espectral cruzada describe la dependencia de la componente turbulenta en dos puntos a una frecuencia dada. Esta dependencia es debida a la influencia que puede tener la propagación de la turbulencia de un punto a otro.

### 3. RESULTADOS

Con el objetivo de estudiar el comportamiento de los modelos de densidad espectral en diferentes escenarios eólicos, se definieron 16 combinaciones para cada modelo de densidad espectral en los cuales se consideran tormentas de intensidad baja, media y alta.

La Figura 3 muestra la combinación de los modelos de densidad espectral con los parámetros categoría de terreno  $C_T$  y velocidad regional  $V_R$ , esto para generar los diferentes casos de estudio. Utilizando el método de representación espectral se generaron registros sintéticos para los niveles de 10, 50, 100, 150 y 200 m de altura, con lo cual se abarca un amplio intervalo de estructuras civiles.

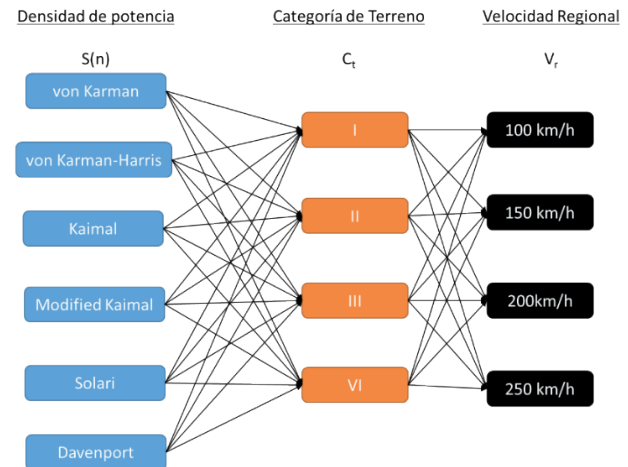


Figura 3. Combinación de posibles escenarios eólicos

La Figura 4 muestra las series de tiempo obtenidas a partir de la simulación con los diferentes modelos de densidad espectral para un escenario  $C_T=2$ ,  $z = 100$  m,  $V_R = 200$  m/s. Las señales son del tipo estocásticas estacionarios con media cero; es decir, son señales que a pesar de ser aleatorias, estas mantienen constante los parámetros estadísticos de media y desviación estándar; estas series de tiempo representan la parte turbulenta de la componente longitudinal. La suma de la velocidad media y la parte turbulenta da como resultado el vector de velocidades del viento.

El comportamiento de la intensidad de turbulencia para cada nivel de altura de cada modelo en un escenario de  $C_T = 2$ ,  $V_R = 150$  m/s es mostrado en la Figura 5. Se observa una tendencia inversamente proporcional a la altura y los modelos de mejor aproximación a la intensidad de turbulencia objetivo son von Karman, von Karman-Harris, Solari y Davenport.

La figura 6 muestra la tendencia de cada modelo al analizar el parámetro de longitud de escala de las respectivas series de tiempo. Se observa que el comportamiento es directamente proporcional a la altura; los modelos von Karman, von Karman-Harris y Solari muestran una tendencia de cercana con la curva objetivo.

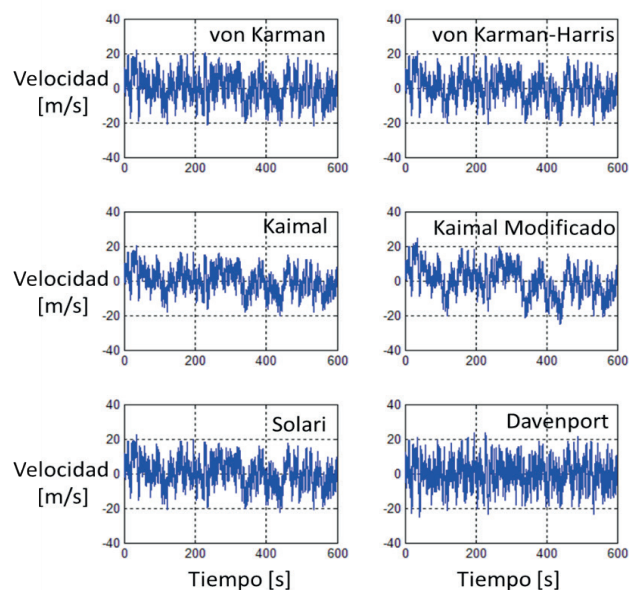


Figura 4. Series de tiempo obtenidas con los modelos von Karman, von Karman-Harris, Kaimal, Kaimal Modificado, Solari and Davenport; para  $C_T=2$ ,  $z=100$  m,  $V_R=200$  m/s

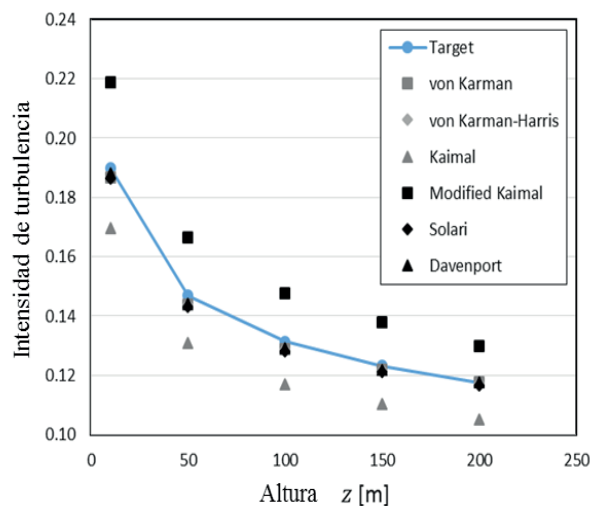


Figura 5. Valores medios de Intensidad de Turbulencia; considerando  $C_T=2$ ,  $V_R=150$  m/s

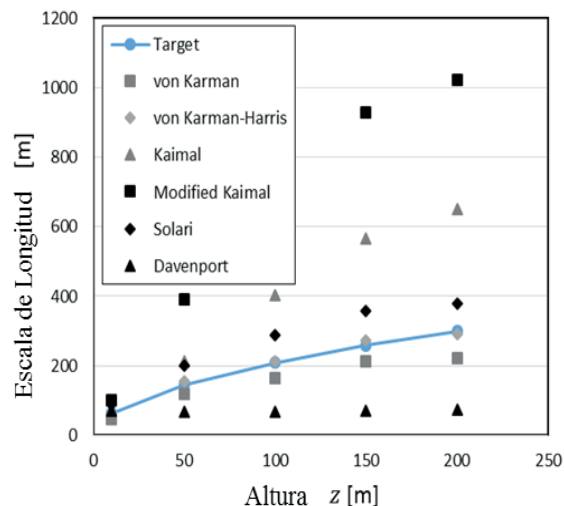


Figura 6. Valores medios de Longitud de Escala; considerando  $z_0=0.05$  m and  $\bar{U}_R=150$  m/s

La Tabla 1 expone de manera cuantitativa el error promedio producido por los modelos de densidad espectral evaluados en cada categoría de terreno con el parámetro de intensidad de turbulencia. Los modelos Kaimal y Kaimal modificado generan series de tiempo con errores promedio mayores al doble que los producidos por los modelos como von Karman, von Karman-Harris, Solari o Davenport.

Tabla 1. Error total de intensidad de turbulencia por categoría de terreno

| Modelo            | Categoría de terreno |      |      |      | Suma<br>[Error Total] |
|-------------------|----------------------|------|------|------|-----------------------|
|                   | I                    | II   | III  | IV   |                       |
| von Karman        | 0.36                 | 0.28 | 0.36 | 0.31 | 1.30                  |
| von Karman-Harris | 0.37                 | 0.27 | 0.38 | 0.32 | 1.34                  |
| Kaimal            | 2.30                 | 2.15 | 2.35 | 2.28 | 9.08                  |
| Kaimal Modificado | 2.29                 | 2.52 | 2.09 | 2.11 | 9.01                  |
| Solari            | 0.51                 | 0.38 | 0.53 | 0.44 | 1.86                  |
| Davenport         | 0.28                 | 0.26 | 0.30 | 0.32 | 1.16                  |

#### 4. CONCLUSIONES

Se generaron registros sintéticos para alturas de 10, 50, 100, 150 y 200 m, utilizando los modelos de densidad espectral de von Karman, Von Karman-Harris, Kaimal, Kaimal Modificado, Solari y Davenport, considerando además cuatro categorías de terrenos con velocidades de viento regionales de 100, 150, 200 y 250 km/h. Las características turbulentas de 9600 registros sintéticos fueron analizadas con la finalidad de evaluar el desempeño de cada modelo en la aplicación de diseño eólico estructural. La comparación de los resultados con los valores objetivo obtenidos a partir de ecuaciones empíricas utilizadas en la mayoría de los manuales de diseño por viento, nos permite concluir que los modelos von Karman, von Karman-Harris y Solari representan de manera aproximada el campo de velocidades del viento turbulento; el modelo propuesto por Davenport permite generar registros sintéticos con el menor error en intensidad de turbulencia; sin embargo, las características de longitud de escala no eran cercanas a la curva de valores objetivo. Finalmente, las series de tiempo con mayor error promedio fueron las generadas con los modelos Kaimal y Kaimal Modificado.

#### REFERENCIAS

- [1] Manwell, J. F. (2009). *Wind energy explained: Theory, design and application*, USA, New York: Wyle.
- [2] Holmes, J.D. (2001). *Wind loading of structures*, Spon Press, London.
- [3] Karman, T.v. (1948). Progress in the statistical theory of turbulence. *National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 34, No. 11, pp. 530–539.
- [4] Harris, R.I. (1968). On the spectrum and auto-correlation function of gustiness, *Electrical Research Association*, United Kingdom.
- [5] Kaimal, J.C., Wyngaard, J.C., Izumi, Y., and Coté, O. R. (1972). Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 98, No. 417, pp. 563–589. DOI: 10.1002/qj.49709841707.
- [6] Hiriart, D., Ochoa, J.L., and García, B. (2001). Wind power spectrum measured at the San Pedro Mártir Sierra. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, Vol. 37, No. 2, pp. 213–220, México. DOI: 2001RMx-AA..37..213H.
- [7] Solari, G. (1993). Gust buffeting, I: Peak wind velocity and equivalent pressure. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, No. 2, pp. 365–382. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:2(365).
- [8] Davenport, A.G. (1961). The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 87, No. 372, pp. 194–211. DOI: 10.1002/qj.49708737208.
- [9] Shinozuka, M., and Jan C.-M. (1972), Digital simulation of random processes and its applications. *Journal of Sound and Vibrations*, Vol. 25, No 1, pp. 111–128. DOI: 10.1016/0022-460X(72)90600-1.

## Semblanzas

### Omar Payán-Serrano



En Junio del 2014 adquirió el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería por la Facultad de Ingeniería Culiacán de la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) con mención honorífica, y es egresado de la carrera de licenciado en Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de Culiacán en el 2008. Ha contribuido en la elaboración de 4 artículos científicos para revistas indizadas y congresos. Realizó una estancia de investigación en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo con el Doctor Jorge Ruiz García. Actualmente es estudiante del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en la Facultad de Ingeniería Culiacán de la UAS desde agosto del 2014, bajo la dirección del Doctor Edén Bojórquez Mora se desarrolla la línea de investigación sobre temas de ingeniería eólica estructural. Entre sus aportaciones científicas, destaca la elaboración de herramientas de predicción para el cálculo de máximos desplazamientos de edificio bajo cargas de viento utilizando redes neuronales artificiales.

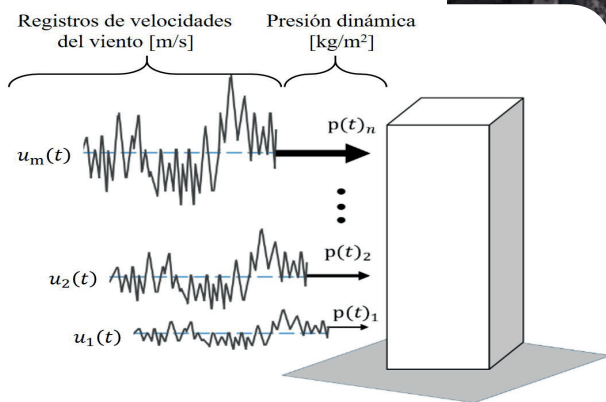
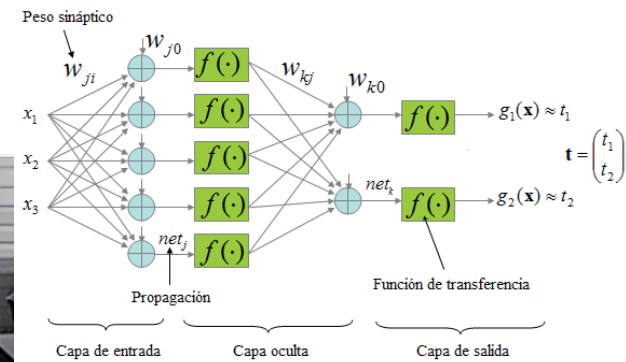
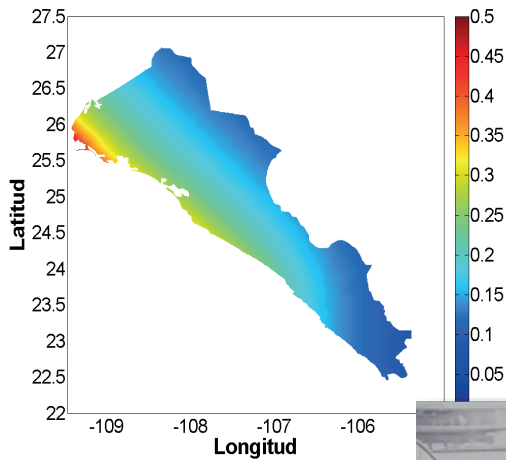
### Edén Bojórquez Mora

Profesor Investigador de Tiempo Completo Titular C de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Grado de Licenciatura en Ingeniería Civil por la FIC de la UAS con mención honorífica. Estudios de Maestría y Doctorado en Ingeniería en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, grado con mención honorífica. **PREMIO** a la mejor tesis Doctoral en el sexto Concurso Nacional de Tesis de Doctorado (2009) otorgado por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. **PREMIO** por el artículo más sobresaliente de la Revista de Ingeniería Sísmica durante el periodo 2009-2010 como autor único, otorgado por la SMIS. **PREMIO** por dirigir la mejor tesis de Posgrado a nivel Estado otorgado por INAPI 2013-2014 y las mejores tesis de Licenciatura a nivel nacional relacionadas a la Ingeniería Estructural por la SMIE 2016. Estancia Posdoctoral en el Departamento de Ingeniería Estructural de la Universidad de Nápoles Federico II, Italia. Profesor-Investigador Repatriado por CONACYT a la Facultad de Ingeniería, UAS (2008-2009). **Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores**, y miembro honorífico del Sistema Sinaloense de Científicos y Tecnólogos, así como del **Cuerpo Académico Consolidado de Estructuras y Mecánica Básica**. Autor de casi 200 artículos en Revistas Científicas y Congresos Nacionales e Internacionales. Director de casi 50 tesis de Licenciatura, Maestría y Doctorado, actualmente dirige varias tesis de Maestría y de Doctorado incluyendo de estudiantes de la UNAM, y ha supervisado a más de 20 estudiantes durante veranos de la investigación científica. Es revisor de las revistas indizadas y congresos sobre estructuras y sísmica de mayor prestigio en el mundo. Ha impartido conferencias magistrales en países como Emiratos Árabes Unidos (Dubai). **Actualmente, Coordinador de la Maestría y Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en la unidad Culiacán y es miembro del Comité Académico y Núcleo Académico Básico de dichos Programas**. Es **Editor de la Revista de Ingeniería Sísmica** de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica la más prestigiosa en el mundo en su área escrita en español. En 2016 fue Galardonado con el Premio **Ingeniero Civil del Año** otorgado por el Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Sinaloa 2016-2017, y fue **VICEPRESIDENTE** de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica 2016-2017. Entre sus aportaciones científicas destaca la *creación de una nueva medida de intensidad sísmica (Intensidad IB) representativa del potencial destructivo de un terremoto*, la cual está siendo reconocida por investigadores de las instituciones más prestigiadas a nivel mundial tales como las Universidades de Stanford en Estados Unidos, Imperial College de Londres, Bolonia, Pavia y Nápoles en Italia, Grenoble Francia, entre otras. Actualmente, el Dr. Bojórquez está trabajando en la generación de registros sísmicos, de viento, mapas de peligros naturales, fragilidad de estructuras, edificios con disipadores de energía, diseño sismo-resistente sustentable y otros temas encaminados al futuro desarrollo de un Reglamento de Construcción específico para los Municipios del Estado de Sinaloa.





# RIT-UAS



<http://revistaingenieria.uas.edu.mx>