



REVISTA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UAS



Editor: Edén Bojórquez Mora

Coordinación y maquetación: Karla V. López Ley

- **Influencia de los factores de carga en los costos iniciales de edificios de concreto reforzado.**
Juan Bojórquez, Henry E. Reyes, Edén Bojórquez, Alfredo Reyes-Salazar, Robespierre Chávez y Joel Carvajal.
- **Tratamiento de aguas vía floculación usando materiales ambientalmente amigables: Ensayos en México.**
H. Mael Gálvez-Limón, Diana V. Félix-Alcalá, M. Priscila Quiñonez-Angulo, Mónica G. Aguilar-Aguirre, Carmen Aida Ochoa-Rivera y Lorenzo A. Picos-Corrales.
- **Reducción de la respuesta sísmica mediante el uso de aisladores de base elastoméricos con núcleo de plomo en una estructura de ocho niveles.**
Carlos Flores Aburto, Joel Melchor Ojeda Ruiz, Manuel Barraza, Alberto Parra Meza, Donobhan Presichi Gerardo y Victor Baca



Índice de Contenido

8 Influencia de los factores de carga en los costos iniciales de edificios de concreto reforzado

Influence of load factors on the initial costs of reinforced concrete buildings

Juan Bojórquez, Henry E. Reyes, Edén Bojórquez, Alfredo Reyes-Salazar, Robespierre Chávez y Joel Carvajal

20 Tratamiento de aguas vía floculación usando materiales ambientalmente amigables: Ensayos en México

Water treatment via flocculation using environmentally friendly materials: Trials in Mexico

H. Mael Gálvez-Limón, Diana V. Félix-Alcalá, M. Priscila Quiñonez-Angulo, Mónica G. Aguilar-Aguirre, Carmen Aida Ochoa-Rivera y Lorenzo A. Picos-Corrales

33 Reducción de la respuesta sísmica mediante el uso de aisladores de base elastoméricos con núcleo de plomo en una estructura de ocho niveles

Reduced seismic response by using lead-core elastomeric base isolators in an eight-level structure

Carlos Flores Aburto, Joel Melchor Ojeda Ruiz, Manuel Barraza, Alberto Parra Meza, Donobhan Presichi Gerardo y Victor Baca

REVISTA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UAS

Órgano de difusión de la Facultad de Ingeniería, UAS

Dr. Jesús Madueña Molina

Rector

Dr. Gerardo Alapizco Castro

Secretario General

M.C. Salvador Pérez Martínez

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

Dr. Carlos Ayala Barrón

Director 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

Equipo Editorial

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

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

Comité Editorial

Dr. Edén Bojórquez Mora

Universidad Autónoma de Sinaloa,
México

Dr. Alfredo Reyes Salazar

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

Dra. Sonia Elda Ruiz Gómez

Universidad Nacional Autónoma de
México, 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. Juan Bojórquez Mora

Universidad Autónoma de Sinaloa,
México

Dr. Julián Carrillo

Universidad Militar de Nueva Grana-

da, Colombia

Dr. Gustavo Palazzo

Universidad Tecnológica Nacional de
Argentina, Argentina

Dr. Antonio Formisano

University of Naples Federico II, Na-
poli, Campania, Italia

Dr. Francisco López Almansa

Universidad Politécnica de Cataluña,
Barcelona, España

Dr. Ivano Iovinella

University of Naples Federico II, Na-
poli, 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 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. Jesús Madueña Molina**, Rector de la Universidad Autónoma de Sinaloa, al **Dr. Carlos Ayala Barrón**, Director 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 la **Lic. Yamel Adriana Cárdenas Aragón** y la **MTE. Alan Gabriel Lazcano Beltrán**.

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 250 artículos en Revistas Científicas y Congresos Nacionales e Internacionales. Ha sido director de 60 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. Fungió como **VICEPRESIDENTE** de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica durante 2016 y 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.

Influencia de los factores de carga en los costos iniciales de edificios de concreto reforzado

Influence of load factors on the initial costs of reinforced concrete buildings

Juan Bojórquez^{1*}, Henry E. Reyes¹, Edén Bojórquez¹, Alfredo Reyes-Salazar¹, Robespierre Chávez¹,
Joel Carvajal¹

RESUMEN

En este artículo se aborda la influencia que tienen los factores de carga en el diseño y costos de edificios de concreto reforzado ubicados en la ciudad de México. Para el diseño estructural se seleccionaron edificios de 4, 8 y 12 niveles ubicados en diferentes tipos de suelo, cada uno de los edificios fue diseñado con diferentes factores de carga. Los costos iniciales de las estructuras fueron obtenidos con base en la cantidad de los materiales de acero de refuerzo y concreto. Los resultados obtenidos en el estudio muestran la diferencia de costos al diseñar los edificios con la combinación de carga estipulada en las normas, y diseñar los edificios con combinaciones de carga en el cual los factores de carga incrementan su valor; además, se observa la influencia que tiene el tipo de suelo en los costos iniciales de las estructuras diseñadas.

Recibido: agosto 2021

Aceptado: noviembre 2021

Publicado: noviembre 2021

Palabras clave:

Factores de carga, edificios de concreto, diseño sísmico, costos iniciales

Keywords:

Load factors, reinforced concrete buildings, seismic design, initial costs

ABSTRACT

This article addresses the influence of the load factors on the design and costs of reinforced concrete buildings located in Mexico City. For the structural design, buildings with 4, 8 and 12 story levels were selected and supposed to be located on different types of soil, each of the buildings was designed with different load factors. The initial costs of the structures were estimated based on the quantity of the reinforcing steel materials and concrete. The results obtained in the study show the difference in costs through the buildings designed with the load combination stipulated in the Mexico City standards and the buildings designed with load combinations in which the load factors increase their value; in addition, the influence that the type of soil has on the initial costs of the designed structures is observed.

1. INTRODUCCIÓN

El valle de México es de las zonas de mayor peligrosidad sísmica a nivel mundial, por lo que el reglamento para construcciones siempre ha buscado salvaguardar la integridad tanto de las estructuras como de sus ocupantes, modificando la zonificación del valle de México para fines de diseño sísmico. Por lo anterior, es importante conocer las características de la zonificación y enfocar la revisión de los factores que influyen en el diseño de las estructuras. En toda

*Autor para correspondencia: Juan Bojórquez Mora
Dirección de correo electrónico: juanbm@uas.edu.mx

¹Universidad Autónoma de Sinaloa, FIC, Culiacán Rosales, Sinaloa, México. C.P. 80040

construcción es importante cuantificar los costos para su edificación y verificar la seguridad estructural en el diseño. Los costos iniciales se pueden obtener en función de la estructuración de los edificios, el suelo donde se edifica y la combinación de los factores de carga, existen numerosos estudios donde se ha abundado sobre lo importante de considerar los costos en el diseño sísmico de las estructuras [1-9]. La seguridad de las construcciones de edificios en la ciudad de México está sujeta a la normatividad del reglamento de construcción de dicha ciudad [10]. Las normas técnicas complementarias sobre criterios y acciones para el diseño estructural especifican que la seguridad de las estructuras sujetas a cargas o acciones permanentes, variables y accidentales deben incrementarse multiplicando por un factor de carga. Para verificar la seguridad estructural cuando movimientos sísmicos sean tomados en cuenta, las normas especifican que se debe considerar un factor de carga de 1.1 que debe multiplicar las cargas muertas, vivas y cargas por sismo. El diseño de una estructura dependerá de las especificaciones de diseño, si se utilizan diferentes combinaciones de carga a los especificados en el reglamento de construcción de la ciudad de México (RCDF), el

diseño mostrará variaciones. Estas variaciones serán reflejadas en el volumen de los materiales, del cual depende el costo inicial total de una edificación. En este estudio se realiza una comparación de los costos iniciales totales del diseño de un conjunto de edificaciones en diferentes tipos de suelos y con diferentes factores de carga.

2. METODOLOGÍA

La metodología aplicada se resume a continuación:

2.1 Características de las zonas de estudio

Los edificios a diseñar están ubicados en tres tipos de suelos de la ciudad de México. Estos suelos se caracterizan por la diferencia en su periodo, los cuales presentan un periodo T_s igual a 0.75, 2.0 y 3.0 segundos.

Los espectros de diseño que se ilustran en la Figura 1, se obtuvieron a partir de las normas técnicas complementarias para diseño por sismo [11], estos fueron utilizados para realizar los análisis sísmicos en las estructuras.

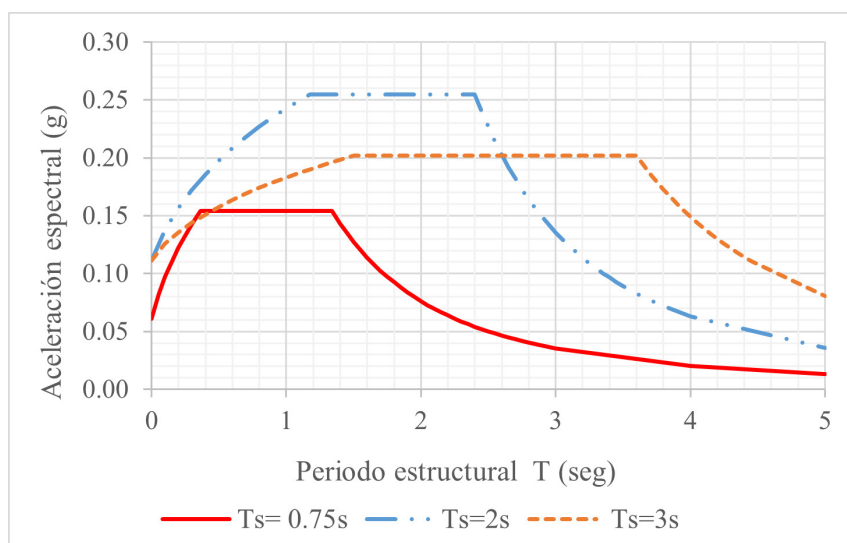


Figura 1: Espectros de diseño para los suelos utilizados.

2.2 Diseño de los edificios de concreto reforzado

2.2.1 Características de los edificios

Los edificios propuestos para el diseño tienen una elevación de 4, 8 y 12 niveles. Estos tienen una estructuración a base de marcos rígidos de concreto reforzado y losa de concreto maciza que hace la función de diafragma rígido. Los edificios están formados por tres crujeas en ambas direcciones espaciadas a una separación de 6m para edificios de 4 niveles, y separación de 8m para edificios de 8 y 12 niveles, con una altura de entrepiso de 4m para todos los edificios. En la figura 2 se muestra la planta y elevación tipo de los edificios estudiados.

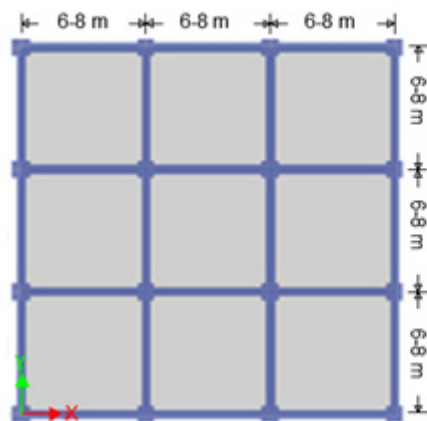
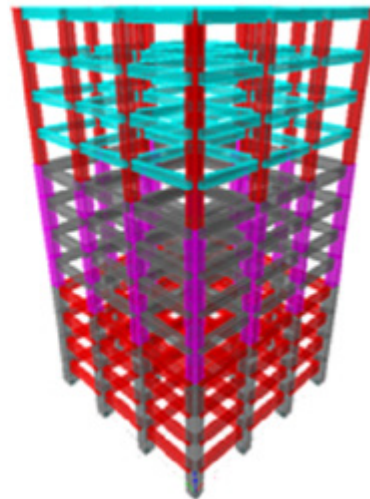


Figura 2: Planta y elevación de edificio de 12 niveles.

2.2.2 Especificaciones para el diseño estructural

Para los análisis sísmicos se tomó en cuenta un factor de comportamiento sísmico $Q=2$ y una distorsión límite permisible de $Y_{\max} = 0.015$. Las estructuras se consideran regulares en planta y en altura por lo que el factor de irregularidad se consideró igual a la unidad. En el análisis estructural de los edificios no se consideraron los efectos de interacción suelo-estructura, de manera que los apoyos en la base de las columnas en los edificios fueron idealizados como empotramientos perfectos, el cual restringe los movimientos de rotación y translación en la base de las columnas respecto a los ejes coordenados X, Y, Z.



El diseño de los elementos se realizó siguiendo las especificaciones de las normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto [12]. Para el diseño se tomó en cuenta el efecto del agrietamiento reduciendo el momento de inercia de los elementos para el cálculo de las rigideces. El momento de inercia efectivo de las secciones columnas se consideró como el momento de inercia de la sección bruta multiplicado por un factor de 0.7, para

el caso de las secciones vigas el momento de inercia efectivo se consideró como el momento de inercia de la sección bruta multiplicado por un factor de 0.5.

Las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en los elementos estructurales son especificadas a continuación:

→Concreto

•Peso volumétrico del concreto: $\gamma_c = 2400 \frac{kg}{m^3}$

•Resistencia a compresión del concreto: $f'_c = 250 \frac{kg}{cm^2}$

•Módulo de elasticidad del concreto: $E_c = 221359 \frac{kg}{cm^2}$

→Acero

•Peso volumétrico del acero de refuerzo: $\gamma_s = 7849 \frac{kg}{m^3}$

•Esfuerzo a la fluencia: $f_y = 4200 \frac{kg}{cm^2}$

•Módulo de elasticidad del acero de refuerzo: $\gamma_s = 2038901 \frac{kg}{cm^2}$

Tabla 1: Cargas muertas de entrepiso.

Carga	Peso [kg/m ²]
Azulejo	40
Instalaciones	50
Losa	360
Muros ligeros	120
Nivelación piso	60
Plafón	40
Reglamento	40
CM total de entrepiso	710

2.2.3 Cargas actuantes para el diseño estructural

Las cargas permanentes fueron determinadas mediante un análisis de carga en el cual se tomó en cuenta el peso propio de la losa, muros, acabados y detalles, así como la carga adicional reglamentaria. Las tablas 1 y 2 muestran las cargas muertas de entrepiso y azoteas actuantes en todos los edificios.

Las cargas variables o vivas fueron obtenidas de las normas técnicas complementarias sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones [13] tomando en cuenta el uso ocupacional de los edificios como oficinas.

2.2.4 Factores y combinaciones de carga

En el diseño de edificios el reglamento especifica que para revisar la seguridad de los elementos ante los estados límites de servicio de las estructuras sujetas a las acciones permanentes (C_M), las acciones variables (C_V) y una acción accidental por sismo (C_s) deben incrementarse por un factor de carga (F_c). Las Normas

Tabla 2: Cargas muertas de azotea.

Carga	Peso [kg/m ²]
Impermeabilización	60
Instalaciones	150
Losa	360
Pendiente de techo	100
Plafón	40
CM total de azotea	710

Tabla 3: Cargas vivas utilizadas.

Carga	Entrepiso [kg/m ²]	Azotea [kg/m ²]
Carga Viva (CV)	250	100
Cvinstantanea	180	70

técnicas complementarias sobre criterio y acciones para el diseño estructural de las edificaciones [13] especifican que el factor de carga (F_c) será:

- $FC= 1.3$ y $F_c=1.5$ cuando la combinación incluye solo acciones permanentes y variables.
- $FC= 1.1$ cuando en la combinación interviene por lo menos una acción accidental.

Para el diseño de los edificios de este trabajo se utilizaron 25 combinaciones de cargas diferentes (Tabla 4). En estas combinaciones, los factores de carga fueron variando para una acción en específico. La primera combinación es la sugerida por el reglamento vigente, para el resto de las combinaciones se propuso hacer una variación de los factores de carga de la combinación 1. En las primeras 7 combinaciones se presenta una variación en los factores de la carga muerta (F_{CM}), sucesivamente se modificó el factor de las acciones variables (F_{CV}) en las 5 combinaciones siguientes, y por último se modificó el factor de carga accidental por sismo (F_{CS}) en las últimas 13 combinaciones.

2.2.5 Elementos geométricos de los edificios diseñados

Se realizó el diseño estructural para cada tipo de edificios ubicados en los diferentes tipos de suelos y diseñados con cada una las diferentes combinaciones de carga (Tabla 4). De los diseños estructurales se obtuvieron las características de los elementos que conforman los edificios, vigas rectangulares y columnas cuadradas.

En las Tabla 5 y Tabla 6 se muestra una lista de los parámetros buscados en los diseños de los edificios. Estos parámetros son necesarios para cuantificar los materiales, concreto y acero de refuerzo de los edificios.

2.3 Costos iniciales de los edificios

Una vez diseñadas las estructuras se puede realizar una estimación del costo inicial en función del costo de los materiales que se emplearían para su construcción. El costo inicial de la estructura se puede calcular con base en el costo directo, costo indirecto y utilidad del contratista [14-15].

Tabla 4: Variación de factores de carga en las combinaciones.

Combinaciones de carga							
Combinación	F_{CM}	F_{CV}	F_{CS}	Combinación	F_{CM}	F_{CV}	F_{CS}
(γ)				(γ)			
1	1.1	1.1	1.1	13	1.1	1.1	1.2
2	1.2	1.1	1.1	14	1.1	1.1	1.3
3	1.3	1.1	1.1	15	1.1	1.1	1.4
4	1.4	1.1	1.1	16	1.1	1.1	1.5
5	1.5	1.1	1.1	17	1.1	1.1	2
6	2	1.1	1.1	18	1.1	1.1	3
7	3	1.1	1.1	19	1.0	1.0	1.1
8	1.1	1.3	1.1	20	1.0	1.0	1.2
9	1.1	1.5	1.1	21	1.0	1.0	1.3
10	1.1	1.7	1.1	22	1.0	1.0	1.4
11	1.1	2	1.1	23	1.0	1.0	1.5
12	1.1	3	1.1	24	1.0	1.0	2
				25	1.0	1.0	3

El costo directo considera el material y la mano de obra, que se aproxima a un 40 % del costo del material cuantificado para la construcción.

$$C_{DI} = 1.4C_M \quad (1)$$

Donde C_{DI} : Costo directo; C_M : costo del material

El costo indirecto (C_{IN}) que es el gasto que se realiza en una obra por el contratista el cual no está incluido en el costo directo, pero es necesarios para la realización del proyecto. Para este trabajo se consideró como el 20 % del costo directo (C_{DI}).

$$C_{IN} = 0.2C_{DI} \quad (2)$$

Donde C_{IN} : Costo indirecto.

La utilidad (U_M), que representa la ganancia del constructor, se estimó como el 15% de la adición del costo directo (C_{DI}) y el costo indirecto (C_{IN}).

$$U_M = 0.15(C_{DI} + C_{IN}) \quad (3)$$

Donde U_M : Utilidad.

Tabla 5: Parámetros de diseño en vigas.

	Parámetro	Unidades
B	Base	cm
H	Peralte	cm
As ext _{sup}	Acero en tensión	cm ²
As ext _{inf}	Acero en compresión	cm ²
As cen _{sup}	Acero en compresión	cm ²
As cen _{inf}	Acero en tensión	cm ²
Sep ext	Separación de estribos (extremo)	cm
Sep cen	Separación de estribos (centro)	cm

Tabla 6: Parámetro de diseño en columnas.

	Parámetro	Unidades
Bx	Base	cm
Hy	Peralte	cm
As col	Acero longitudinal en la columna	cm ²
Sep	Separación de estribos	cm

Como se considera el costo inicial de la estructura (C_I) como la suma del costo directo, costo indirecto y utilidad, se puede representar de la siguiente forma:

$$C_I = C_{DI} + C_{IN} + U_M \quad (4)$$

Haciendo la conversión de la ecuación anterior:

$$C_I = C_{DI} + C_{IN} + U_M = 1.38C_{DI} = 1.93C_M \quad (5)$$

Donde C_I : Costo inicial.

En la Tabla 7 se muestran los precios unitarios de los materiales de construcción que fueron utilizados, el tipo de moneda utilizada en los precios es la moneda nacional en pesos mexicanos. Estos precios promedio eran lo presentes en el primer trimestre del año 2021 cuando se realizó el estudio.

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos fueron los costos iniciales de todos los diferentes edificios diseñados con las 25 combinaciones de carga diferentes ubicados sobre los tres tipos de suelos. Los costos iniciales fueron obtenidos utilizando la ecuación 5 para todos los edificios de concreto reforzado.

Al analizar la Tabla 8 se puede observar la variación de los costos iniciales cuando los edificios son diseñados en diferentes tipos de suelo y con la misma combinación. Se observa que en la mayoría de los casos existe una diferencia importante en los costos, de igual manera podemos ver que al incrementar ligeramente un mismo factor de carga los costos iniciales son similares a los costos de la primera combinación, también se presentan diferencias sustanciales en los costos cuando se duplica o triplica un factor de carga en el diseño.

En la tabla 9 se muestra un resumen de todos los periodos estructurales de los edificios diseñados ubicados en los tres tipos diferentes de suelos bajo las 25 combinaciones de cargas distintas entre sí. En la tabla se puede apreciar la variación de los periodos estructurales con referencia a la combinación de carga utilizada y al tipo de suelo donde se ubicó la estructura.

4. COMPARACIÓN DE LOS COSTOS INICIALES TOTALES DE LAS ESTRUCTURAS CON DIFERENTES FACTORES DE CARGA.

El diseño sísmico de los edificios según el RCDF especifica que debe utilizarse la combinación de factores de carga: $1.1C_M + 1.1C_V + 1.1C_S$; estos factores de carga corresponden a la primera combinación utilizada para el diseño de los edificios. Se realiza una comparación de los costos iniciales de las estructuras (Tabla 8) que tienen el mismo número de niveles y diseñadas con la misma combinación de carga (Combinación 1), pero ubicadas en diferentes tipos de suelo, y se observó lo siguiente: de la comparación de los edificios ubicados en suelo con $T_s = 2.0s$, con estructuras desplantadas sobre suelo con $T_s = 0.75s$, se pudo observar que los costos iniciales son aproximadamente de un 30% a 270% mayor para estructuras sobre suelo con $T_s = 2.0s$. Por otro lado, al comparar los costos de los edificios desplantados en suelo con $T_s = 3.0s$, con estructuras desplantadas sobre suelo con $T_s = 0.75s$, se observó que los costos iniciales son aproximadamente de un 13% a 200% mayor para el suelo con $T_s = 3.0s$. Al hacer la comparación de los costos iniciales para estructuras que tienen el mismo número de niveles y combinación de carga ubicadas en suelo con $T_s = 2.0s$, con edificios ubicados sobre suelo con $T_s = 3.0s$, se observó que los costos iniciales son aproximadamente de un 17% a 27% mayor para el suelo con $T_s = 2.0s$.

Tabla 7: Costo unitario de los materiales.

Material	Precio \$
Concreto $f'c=250$ [kg/cm ²]	2200 \$/m ³
Acero de refuerzo	23000 \$/Ton

Tabla 8: Costos iniciales de los edificios diseñados con diferentes combinaciones de carga.

	Suelo T=0.75 s.			Suelo T=2 s.			Suelo T=3 s.		
Edificio	4 Niv	8 Niv	12 Niv	4 Niv	8 Niv	12 Niv	4 Niv	8 Niv	12 Niv
	Ci	Ci	Ci	Ci	Ci	Ci	Ci	Ci	Ci
Combo	MDP (\$)	MDP (\$)	MDP (\$)	MDP (\$)	MDP (\$)	MDP (\$)	MDP (\$)	MDP (\$)	MDP (\$)
1	1.94	7.173	12.137	2.53	14.401	32.765	2.157	11.64	25.75
2	2.042	7.585	11.98	2.476	14.299	32.777	2.194	12.068	25.528
3	2.024	7.983	12.049	2.421	14.372	33.102	2.145	12.111	25.396
4	2.039	8.647	12.368	2.504	14.236	33.258	2.151	12.041	25.463
5	2.033	9.132	13.063	2.512	14.081	33.413	2.148	12.364	25.501
6	2.113	11.867	17.474	2.47	15.418	38.352	2.228	12.768	27.615
7	2.405	15.819	34.045	2.773	18.19	45.965	2.409	16.111	39.519
8	1.945	7.502	12.165	2.534	14.684	32.975	2.161	11.747	25.9
9	2.042	7.532	11.98	2.476	14.629	33.015	2.126	11.599	25.897
10	2.021	7.596	12.012	2.48	14.709	33.045	2.13	12.095	25.88
11	2.023	7.815	12.053	2.42	14.677	33.148	2.135	12.122	25.896
12	2.058	9.104	13.234	2.507	14.393	33.026	2.106	12.295	26.188
13	2.058	7.821	11.951	2.621	15.323	35.665	2.155	12.15	27.897
14	2.135	8.042	11.972	2.792	15.545	37.356	2.401	13.135	30.219
15	2.237	8.461	11.941	2.819	16.699	40.427	2.435	13.736	30.74
16	2.335	9.877	12.192	2.874	17.74	41.602	2.486	14.656	32.815
17	2.695	15.673	15.807	3.291	22.292	53.207	2.762	17.488	43.365
18	3.529	22.049	60.036	4.322	29.938	90.148	3.503	24.656	71.824
19	1.947	6.577	11.091	2.521	14.367	32.604	2.129	11.872	25.699
20	2.054	6.734	11.372	2.765	15.012	35.107	2.184	12.212	27.735
21	2.149	6.992	11.311	2.769	15.675	38.219	2.254	13.169	29.667
22	2.196	8.006	11.454	2.664	16.685	40.472	2.32	13.69	31.371
23	2.303	8.339	11.645	2.871	17.304	41.095	2.364	14.796	32.557
24	2.625	15.793	13.831	3.507	21.216	53.228	2.769	18.339	42.178
25	3.626	22.026	60.161	4.383	29.61	90.857	3.544	23.796	72.045

Tabla 9: Resumen de los periodos fundamentales de las estructuras.

	Suelo T=0.75 s.			Suelo T=2 s.			Suelo T=3 s.		
Edificio	4 Niv	8 Niv	12 Niv	4 Niv	8 Niv	12 Niv	4 Niv	8 Niv	12 Niv
Periodo	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Combo	Seg.	Seg.	Seg.	Seg.	Seg.	Seg.	Seg.	Seg.	Seg.
1	1.13	2.13	3.34	1.01	1.07	1.26	1.08	1.33	1.39
2	1.13	2.08	3.32	0.97	1.07	1.23	1.09	1.3	1.33
3	1.08	2.01	3.32	0.92	1.07	1.17	1.01	1.37	1.33
4	1.06	1.74	3.12	0.91	1.07	1.16	1.01	1.31	1.33
5	1.01	1.75	2.9	0.91	1.12	1.16	0.9	1.31	1.28
6	0.89	1.29	2.32	0.75	0.96	1.04	0.85	1.15	1.26
7	0.71	1.05	1.17	0.68	0.81	0.92	0.71	0.94	1.05
8	1.13	2.12	3.34	1.01	1.11	1.25	1.08	1.35	1.37
9	1.13	2.08	3.32	0.97	1.11	1.25	1.04	1.35	1.34
10	1.08	2.08	3.32	0.97	1.11	1.25	1.04	1.3	1.34
11	1.08	2.01	3.32	0.92	1.11	1.25	1.04	1.3	1.34
12	0.95	1.74	2.77	0.87	1.04	1.2	0.9	1.27	1.3
13	1.08	2.08	3.32	0.97	1.06	1.13	1.04	1.33	1.32
14	1.08	2.08	3.32	0.94	1.04	1.1	1.04	1.27	1.26
15	1.06	1.99	3.26	0.88	1.02	1.02	1	1.24	1.21
16	1.01	1.7	3.26	0.85	0.93	1.01	0.91	1.06	1.17
17	0.88	1.05	2.45	0.67	0.73	0.81	0.73	0.91	0.94
18	0.62	0.8	0.7	0.52	0.58	0.53	0.59	0.66	0.66
19	1.19	2.59	4	1.01	1.07	1.26	1.1	1.39	1.39
20	1.13	2.53	4	1.02	1.05	1.16	1.04	1.33	1.38
21	1.08	2.44	4	0.97	1.04	1.09	1.04	1.29	1.38
22	1.08	2.04	4	0.88	1.02	1.02	0.93	1.24	1.32
23	1.06	2	3.73	0.85	0.98	1.02	0.9	1.1	1.3
24	0.87	1.05	3.17	0.67	0.8	0.81	0.75	0.93	0.98
25	0.7	0.8	0.7	0.53	0.59	0.53	0.58	0.72	0.66

El costo inicial total (CIT) de las estructuras diseñadas con cada combinación diferente se normalizó con base al costo inicial total del edificio diseñado con la combinación 1 (CIT RCDF). En la figura 3 se muestran los costos normalizados de los edificios de 4 niveles en el cual se observa una tendencia similar en los

costos para los edificios desplantados en los diferentes suelos. Los costos presentan una tendencia a elevarse como resultado del diseño de los edificios con combinaciones que utilizan mayores factores de carga, esto debido a la obtención de secciones más robustas en el diseño de elementos. La figura 4 presenta los costos

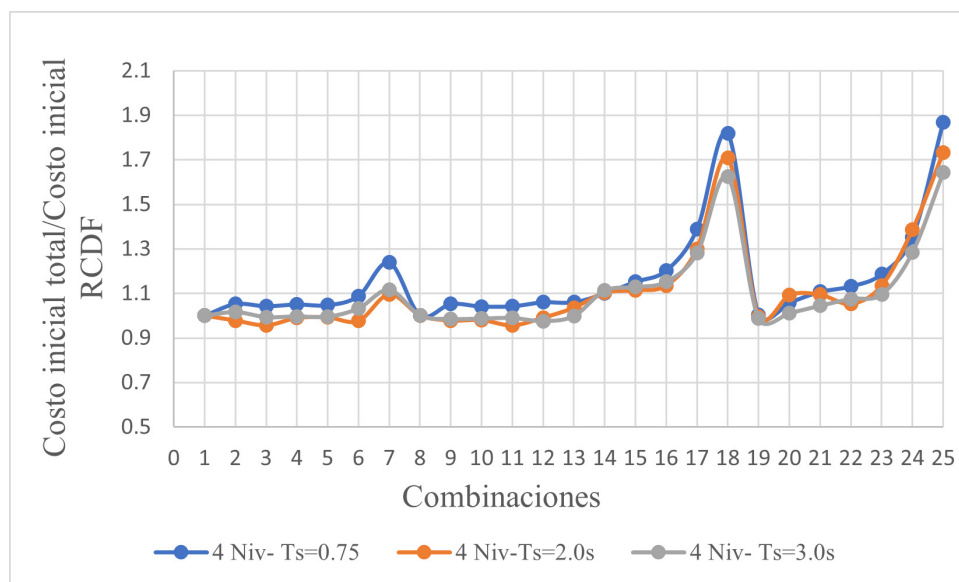


Figura 3: Costo normalizado de edificios de 4 niveles.

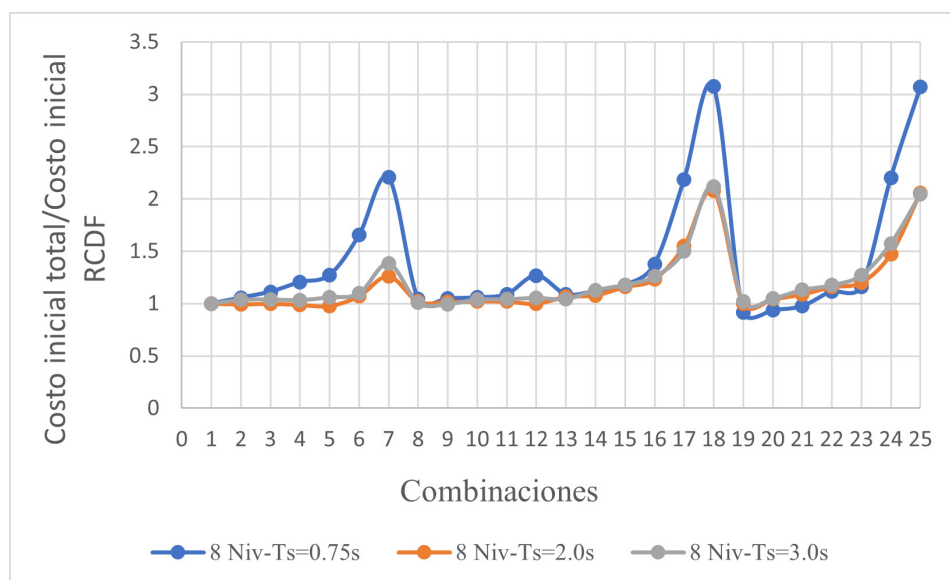


Figura 4: Costo normalizado de edificios de 8 niveles.

normalizados de los edificios de 8 niveles y la figura 5 los costos normalizados de los edificios de 12 niveles. Se observa en ambas figuras una tendencia bastante similar en el comportamiento de los costos; además, se puede apreciar para los dos tipos de edificios de 8 y 12 niveles que están diseñados en suelo $T_s=0.75s$

los costos normalizados respecto a la combinación 1 tienen una mayor variación cuando se incrementan los factores de carga en las combinaciones, este comportamiento se puede atribuir a la influencia que tiene el tipo de suelo en los factores de carga con el cual se diseñó la estructura.

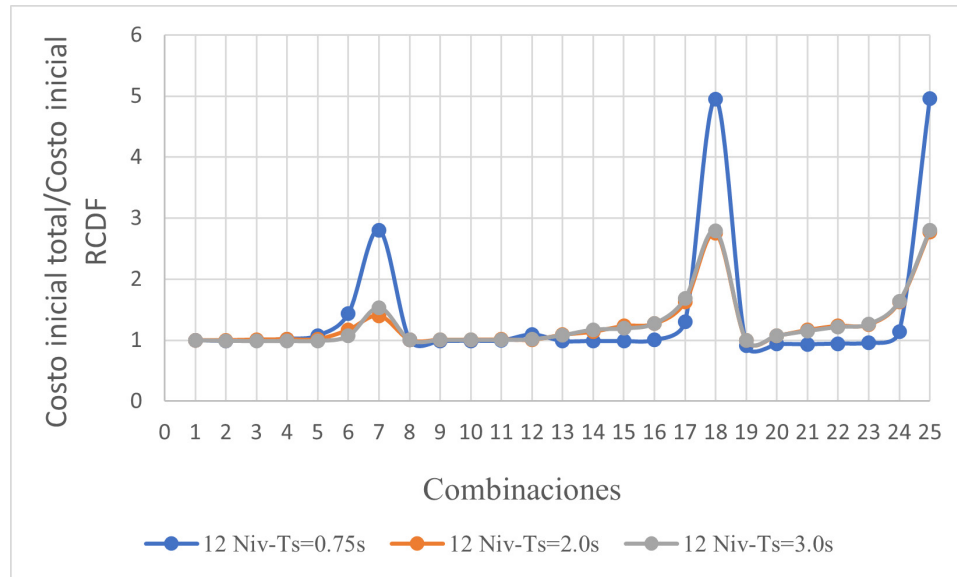


Figura 5: Costo normalizado de edificio de 12 niveles.

5. CONCLUSIONES

Se realizó un estudio sobre la influencia que tienen los factores de carga para diseño sísmico de edificios en los diferentes tipos de zonas sísmicas de la Ciudad de México. Para este objetivo, se utilizaron tres edificios de concreto reforzado de diferentes alturas, los cuales fueron diseñados con 25 combinaciones de carga utilizando para la combinación 1 los factores establecidos por el reglamento de construcción de la ciudad de México. De los resultados obtenidos, se observó que los costos iniciales de los edificios incrementan cuando la combinación de carga utilizada para el diseño de los edificios presenta factores de carga mayores que los estipulados por la normativa del reglamento; además, estos costos presentan una variación en función del suelo en el cual están desplantados los edificios, así como del número de niveles.

Los costos iniciales para edificios diseñados sobre un tipo de suelo varían aproximadamente un 20% cuando se modifican los factores de carga muerta y viva. Se observa que cuando se varían los factores de carga por sismo, el costo total puede elevarse hasta un 80% en comparación con la combinación de carga propuesta por el reglamento de la Ciudad de México. Además, al comparar un edificio ubicado en diferentes tipos de suelos diseñado con la misma combinación de carga, el costo inicial se incrementó en un intervalo del 30% al 200%.

Los costos obtenidos fueron normalizados con respecto a la combinación vigente. Los resultados sugieren que para los suelos $T_s=2.0s$ y $T_s=3.0s$ la tendencia en los costos con las diferentes combinaciones de carga no presentan mucha variación en comparación con el costo inicial de la combinación 1. Para el caso del suelo $T_s=0.75s$, se observó una mayor variación

en los costos al diseñar los edificios con las diferentes combinaciones. Con los resultados obtenidos en este estudio, se concluye que existe una influencia directa del tipo de suelo tanto en los factores de carga como en los costos iniciales de los edificios, lo cual no se considera en la versión actual del reglamento de construcciones de la Ciudad de México.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló gracias al apoyo económico brindado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) bajo el proyecto Ciencia Básica 287103 y al apoyo de la beca de doctorado otorgada al autor Henry E. Reyes. Finalmente se agradece el apoyo recibido por parte de la Universidad Autónoma de Sinaloa dentro del proyecto PROFAPI 2022.

REFERENCIAS

- [1] Thiruvengadam, V., Wason, J. C., & Gayathri, L. (2004, August). Cost modeling of reinforced concrete buildings designed for seismic effects. In 13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada.
- [2] Thiruvengadam, V., & Guitte, T. (2017). Quantity and cost modelling of reinforced concrete buildings of 12 to 20 storey designed for seismic effects. 16th World Conference on Earthquake, Santiago Chile.
- [3] Asamoah, R. O., Ankrah, J. S., Offei-Nyako, K., & Tutu, E. O. (2016). Cost analysis of precast and cast-in-place concrete construction for selected public buildings in Ghana. *Journal of Construction Engineering*.
- [4] Mubarak, M., Abdullah, A., Azmeri, A., & Hayati, Y. (2019). Cost Estimation of Structural Components of a Building by considering the Seismic Load on Different Regions. *Advances in Civil Engineering*.
- [5] Begum, M., Serajus, S. M., Tauhid, B. K. N., & Ahmed, W. (2013). Cost analysis of steel concrete composite structures in Bangladesh.
- [6] Tedia, A., & Maru, D. S. (2014). Cost, Analysis and Design of Steel-Concrete Composite Structure RCC Structure. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol.11, No.1, pp. 54-59.
- [7] Markou, G. (2021). A new method of seismic retrofitting cost analysis and effectiveness for reinforced concrete structures. *Engineering Structures*, vol. 246, pp. 113083.
- [8] Orellana, M. A., Ruiz, S. E., Bojórquez, J., Reyes-Salazar, A., & Bojórquez, E. (2021). Optimal load factors for earthquake-resistant design of buildings located at different types of soils. *Journal of Building Engineering*, vol. 34, pp. 102026.
- [9] Frangopol, D. M., Dong, Y., & Sabatino, S. (2017). Bridge life-cycle performance and cost: analysis, prediction, optimization and decision-making. *Structure and Infrastructure Engineering*, vol 13, No. 10, pp. 1239-1257.
- [10] Reglamento de construcción del Distrito Federal (2017). Administración Pública de la Ciudad de México. *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*, Jefatura de Gobierno, Ciudad de México, México.
- [11] Normas Técnicas complementarias para Diseño por Sismo (2020). *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*, México.
- [12] Normas Técnicas complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (2017). *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*, México.
- [13] Normas Técnicas complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño de Edificaciones (2017). *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*, México.
- [14] De León, D. (1991). Integrating socio-economics in the development of criteria for optimal aseismic design of R/C buildings. Tesis de Doctorado, University of California.
- [15] Bojórquez, J. (2016). Combinación de cargas para el diseño sísmico de edificios. Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [16] Bazán, E. y Meli, R (2013). Diseño sísmico de edificios. México, D.F. Editorial Limusa.

Tratamiento de aguas vía floculación usando materiales ambientalmente amigables: Ensayos en México

Water treatment via flocculation using environmentally friendly materials: Trials in Mexico

H. Mael Gálvez-Limón¹, Diana V. Félix-Alcalá¹, M. Priscila Quiñonez-Angulo², Mónica G. Aguilar-Aguirre³, Carmen Aida Ochoa-Rivera⁴, Lorenzo A. Picos-Corrales^{1,5,*}

RESUMEN

Actualmente, la contaminación de los cuerpos de agua y su relación con los riesgos de la salud humana es uno de los principales problemas alrededor del mundo. Algunos procesos industriales y la disposición inapropiada de aguas residuales han incrementado los niveles de contaminación de las fuentes de agua, depositando diferentes contaminantes (biomasas, pesticidas, fármacos residuales, iones de metales pesados). En México se descargan grandes cantidades de aguas residuales sin tratar. Relacionado con el tratamiento de aguas, la floculación es uno de los enfoques más usados para la remoción de sólidos suspendidos en el agua. Por ello, en este artículo de revisión se aborda un panorama general sobre tratamiento de aguas usando floculantes ambientalmente amigables y se resumen algunos ensayos con muestras de agua de río y aguas residuales, los cuales se han llevado a cabo en México.

ABSTRACT

Currently, the contamination of water bodies and its relationship with human health risks is one of the main problems around the world. Some industrial processes and the inappropriate disposal of wastewater have increased the contamination levels of water sources, depositing different pollutants (biomass, pesticides, residual drugs, heavy metal ions). In Mexico, large quantities of untreated wastewater are discharged. Regarding water treatment, flocculation is one of the most used approaches for the removal of suspended solids from water. Therefore, this review addresses a general overview on water treatment using environmentally friendly flocculants and summarizes some trials with samples of river water and wastewater, which have been carried out in Mexico.

Recibido: noviembre 2020

Aceptado: octubre 2021

Publicado: noviembre 2021

Palabras clave:

Tratamiento de aguas, floculación, biopolímeros, remoción de turbidez, contaminantes emergentes.

Keywords:

Water treatment, flocculation, biopolymers, turbidity removal, emerging contaminants.

1. INTRODUCCIÓN

Durante la presente pandemia (COVID-19) se ha confirmado que el agua es la sustancia clave para la supervivencia de los seres humanos. La remediación y reúso del agua son de las grandes tareas a cumplir en la época actual. El aumento de la población y la falta de sustentabilidad en el manejo del agua han puesto a los recursos hídricos bajo la lupa a nivel mundial (Makarigakis y Jiménez-Cisneros, 2019). Así, la demanda de agua limpia y la generación de aguas residuales aumenta continuamente. En algunas regiones, un volumen importante de aguas residuales sin tratamiento es depositado sobre las fuentes naturales de agua (SEMARNAT, 2016). Además, las actividades humanas (como la agricultura, minería, industria, entre otras) han originado la liberación de diversos contaminantes tóxicos sobre los cuerpos de agua subterráneos y superficiales (Makarigaki y Jiménez-Cisneros 2019). En años recientes, los resultados de in-

*Autor para correspondencia: Lorenzo A. Picos-Corrales

Dirección de correo electrónico: lorenzo.picos.c@uas.edu.mx

¹Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, 80013, Culiacán, Sinaloa, México.

²Centro de Graduados e Investigación en Química, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana, 22000, Tijuana, B.C., México.

³Secretaría de Transparencia y Rendición de Cuentas del Gobierno del Estado de Sinaloa, 80000, Culiacán, Sinaloa, México.

⁴Radio Universidad Autónoma de Sinaloa, sección Nueva Cultura del Agua, 80030, Culiacán, Sinaloa, México.

⁵Facultad de Ingeniería Culiacán, Universidad Autónoma de Sinaloa, 80013, Culiacán, Sinaloa, México.

vestigaciones han evidenciado la importancia del monitoreo y remoción de contaminantes emergentes (fármacos, pesticidas, productos químicos industriales y de cuidado personal, otros) (Vargas-Berrones y col., 2020; Morin-Crini y col., 2021), pues su presencia en el agua superficial y subterránea ha sido tradicionalmente considerada poco significativa en términos de distribución y/o concentración, por lo que los límites permisibles no están regulados por las leyes de los gobiernos.

De acuerdo a la literatura, en el caso de los pesticidas organoclorados, su persistencia y riesgo a la salud humana han sido comprobados (Rodríguez y col., 2017). Por otra parte, para los metales pesados es muy conocido que existe un riesgo considerable para la salud asociado a la bioacumulación de estas sustancias en los seres humanos (Stuart y col., 2012). El impacto ambiental y de salud pública de los contaminantes emergentes siguen siendo exhaustivamente estudiados (Stuart y col., 2012; EPA, 2017). Lo anterior se debe a que estos compuestos residuales podrían afectar los ecosistemas y estar relacionados con problemas de salud humana graves (Bilal y col., 2019). Tal es el caso de los fármacos que llegan a los cuerpos de agua, estos pueden afectar la capacidad de los microorganismos para metabolizar las fuentes de carbono, es decir, estos químicos afectan la diversidad metabólica de la comunidad del suelo (Pino-Otín y col., 2017). Similarmente, en los cuerpos de agua, el crecimiento de la población de algunas especies de peces puede verse mermado por los contaminantes emergentes (Pérez-Coyotl y col., 2019), y como consecuencia, la salud de los seres humanos puede ser

afectada a través de la cadena alimentaria (Hermosillo-Ochoa y col., 2021).

En los últimos años se ha detectado que las plantas tratadoras de agua residual, ineficientes en la remoción de moléculas pequeñas, y los efluentes domésticos y de hospitales no tratados son los principales distribuidores de fármacos residuales y productos de cuidado personal (Li y col., 2017). Por otra parte, la agricultura es uno de los principales responsables de la propagación de contaminantes debido a los estabilizantes, pesticidas y fertilizantes empleados excesivamente, además del uso de aguas residuales para riego de cultivos (Evans y col., 2019). Mientras que la industria y minería son las principales fuentes de contaminación por metales pesados (Boamah y col., 2015). Entre los ejemplos de contaminación de cuerpos de agua en diferentes regiones del mundo está la contaminación por metales pesados en agua de río en la India (Patel y col., 2018) y Sudáfrica (Addo-Bediao y col., 2018), nutrientes en agua de río en China (Strokal y col., 2016), la presencia de fármacos y hormonas en agua de río en Brasil (Ide y col., 2017), contaminación del mar Mediterráneo por pesticidas (Novillo y col., 2017), así como la presencia de micro plástico en agua de río en Sudáfrica (Reynolds y Ryan, 2018). En el caso de México, los altos niveles de turbidez en agua de río usada en plantas potabilizadoras y las aguas residuales agrícolas no tratadas representan un gran problema (Pérez-Espejo y col., 2011), como se ilustra en la Figura 1. Existen ríos y arroyos notablemente afectados por fertilizantes y pesticidas acarreados por aguas residuales agrícolas que son producidas debido al uso descontrolado del agua en algunos sistemas de



Figura 1. Imágenes del Río Humaya (imagen superior derecha) y aguas residuales agrícolas (imagen superior izquierda) y de granjas acuícolas (imagen inferior) en el estado de Sinaloa.

riego (Picos-Corrales y col., 2020). En estudios específicos en el sur del país, se ha relacionado el padecimiento de cáncer en mujeres como resultado de las concentraciones de pesticidas en fuentes de agua (Rodríguez y col., 2017). Similarmente, el manejo inapropiado de aguas residuales domésticas ha llevado al deterioro de ecosistemas, teniendo como ejemplo la Presa Madín en el centro del país (Pérez-Coyotl y col., 2019). Por ello, se ha incrementado el monitoreo de contaminantes en fuentes de agua, evaluando la presencia de sustancias orgánicas en agua superficiales y subterráneas (Félix-Cañedo y col., 2013; Lesser y col., 2018), fármacos en aguas residuales de hospitales (Calderón y col., 2018), y disruptores endocrinos en humedales (Díaz-Torres y col., 2013). Particularmente para el estado de Sinaloa, se ha investigado los niveles de contaminación por pesticidas organoclorados y organofosforados en drenajes agrícolas (García de la Parra y col., 2012), así como el efecto de estos compuestos tóxicos cuando son bioacumulados por roedores que habitan áreas agrícolas (Pérez-González y col., 2017.). Además, un estudio sobre la laguna Navachiste-Macapule (Culiacán, estado de Sinaloa) reportó la detección de metoxicloro, endrina y heptacloro, los cuales son pesticidas organoclorados cuyo uso está prohibido en México (Montes y col., 2012). Por otra parte, en algunos estudios se han detectado niveles elevados de manganeso en agua del Río Humaya en Culiacán, estado de Sinaloa (Ruelas-Leyva y col., 2017), el cual es una fuente para plantas potabilizadoras.

En base a lo anterior y con el objetivo de divulgar los esfuerzos de grupos de investigación, en este artículo se revisan estudios de biofloculación usando muestras de agua de río y agua residual realizados en zonas diferentes de México. Para ello, se presentan resultados de experimentos usando quitosano, almidón, goma guar, mucilago de nopal y Moringa Oleífera. Principalmente, se reporta la remoción de turbidez, color y metales del agua.

2. MÉTODOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES: FLOCULACIÓN

El tratamiento de aguas se logra mediante la combinación de métodos que permiten la remoción de los contaminantes, procesos tales como la coagulación, la floculación, filtración, oxidación, la adsorción con carbón activado, intercambio iónico, ósmosis inversa, entre otros (Renault y col., 2009; Ruelas-Leyva y col., 2017). Cada metodología es distinta y permite remo-

ver diferentes tipos de contaminantes, por ejemplo: en base a las normas oficiales mexicanas (NOM-127-SSA1-1994), el intercambio iónico y ósmosis inversa permiten remover metales (Pb, Al, Cu, Cr, Fe, Mn), cloruros, sulfatos, cianuros; los métodos de oxidación suelen remover Fe y Mn, materia orgánica y compuestos fenólicos; la adsorción por carbón activado se utiliza en la remoción de As, materia orgánica, compuestos fenólicos y algunos plaguicidas; el método convencional, que involucra la coagulación-floculación y la posterior precipitación y filtración, remueve contaminantes que producen turbiedad, color y olor, además de metales como As, nitratos y nitritos, entre otros.

La coagulación-floculación convencional se destaca por su simplicidad tecnológica y un tiempo corto de proceso, de fácil control y mantenimiento, lo cual lo hace un método económicamente ventajoso; asimismo, es adaptable a diferentes formatos de tratamiento como la clarificación primaria, pretratamiento, y/o tratamiento final y a elevadas cargas de contaminantes. Dicho proceso permite la remoción de contaminantes usando sustancias coagulantes [por ejemplo, Fe_2Cl_3 o $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$] y floculantes [poli(cloruro de aluminio) o productos de poli(acrilamida)] (Lichtfouse y col., 2019). En la etapa de coagulación, el coagulante neutraliza las fuerzas que mantienen separadas a las partículas suspendidas en el agua, lo cual promueve la aglomeración (Andía-Cárdenas, 2000; Nharingo y Moyo, 2016). Posteriormente, se adiciona el floculante para aumentar la eficiencia del proceso, llevando a la formación de flóculos. De manera consecuente, los flóculos más pequeños colisionan entre sí aumentando su tamaño y peso, desencadenando una sedimentación rápida de las partículas (Prakash y col., 2014; Nharingo y Moyo, 2016). Actualmente, mediante el uso de floculantes poliméricos, principalmente polímeros catiónicos, es posible llevar a cabo la floculación directa. Los floculantes poliméricos poseen funciones duales de coagulación y floculación, es decir, neutralizan cargas negativas y unen las partículas desestabilizadas para formar flóculos. Así, con el uso de estos materiales se evita el uso de coagulantes inorgánicos (Lichtfouse y col., 2019). Es importante remarcar que, durante el proceso de floculación, la remoción de contaminantes puede ser conducida a través de cuatro mecanismos diferentes: adsorción y neutralización de la carga, floculación de barrido, compresión de la doble capa, y puente de adsorción. El mecanismo de adsorción y neutralización de la carga, el floculante se

une a las partículas coloidales con carga opuesta y las neutraliza llevando a la floculación. Este mecanismo depende de la cantidad estequiométrica de la concentración de coloides y la cantidad óptima de floculante, es decir se requiere una dosis óptima de floculante para evitar la redispersión (Nharingo y Moyo, 2016). En la floculación de barrido las partículas coloidales desestabilizadas pueden ser atrapadas y barridas en un precipitado amorfo; en este caso, la remoción de partículas evoluciona progresivamente con el incremento del floculante (Andía-Cárdenas, 2000). El mecanismo de compresión de la doble capa resulta de la adición de un electrolito en un sistema coloidal, lo que causa un incremento en de la fuerza iónica en la capa difusa y disminuye la influencia que ejercen las partículas entre sí, lo cual origina la desestabilización de los coloides seguido de la floculación. Este modelo no aplica para el tratamiento de aguas residuales (Andía-Cárdenas, 2000; Nharingo y Moyo, 2016). En el mecanismo del puente de adsorción, cuando se agregan pequeñas dosis de floculante a los coloides, las cadenas de polímero se adsorben en las partículas y una cadena individual se une a varias partículas formando agregados complejos de contaminantes, es decir el polímero favorece la formación del flóculo; en este mecanismo de floculación se requiere una dosis óptima de polímero para alcanzar la eficiencia máxima (Nharingo y Moyo, 2016).

Aunque los coagulantes y floculantes convencionales son productos químicos baratos, eficientes, disponibles y fáciles de usar, su utilización produce ciertos inconvenientes como la contaminación del agua por metales y la producción de grandes cantidades de lodos tóxicos (Lichtfouse y col., 2019). Esto se debe a que las sustancias comúnmente empleadas son inorgánicas y orgánicas no biodegradables (Renault y col., 2009). Por ello, en la última década ha aumentado significativamente el número de estudio sobre floculantes ambientalmente amigables (quitosano, alginato de sodio, almidón, celulosa, mucílagos, Moringa oleífera, otros) obtenidos a partir de fuentes renovables, los cuales podrían ser opciones viables para el tratamiento de aguas (Nharingo y Moyo, 2016; Crini y col., 2019; Picos-Corrales y col., 2020).

3. MATERIALES AMBIENTALMENTE AMIGABLES COMO FLOCULANTES

Los floculantes ambientalmente amigables, principalmente biopolímeros, son de gran interés por su

biocompatibilidad y biodegradabilidad, además que no producen contaminantes secundarios y los sedimentos generados en el proceso de floculación pueden ser tratados como biomasa (Renault y col., 2009; Lee y col., 2014; Liu y col., 2020). Estos floculantes ambientalmente amigables son capaces de remover diversos contaminantes por mecanismos diferentes ya que este tipo de macromoléculas poseen una variedad de grupos funcionales tales como amino, carboxilos e hidroxilos (Özacar y Şengil, 2003). A continuación se presentan las estructuras químicas relacionadas con los siguientes materiales: quitosano, almidón, Moringa oleífera, alginatos y celulosa (ver Figura 2).

3.1. Quitosano

El quitosano es un polímero lineal compuesto aleatoriamente por D-glucosamine y N-acetil-D-glucosamina unidas por un enlace glucosídico β -(1-4) (grupos funcionales $-\text{NH}_2$ y $-\text{OH}$), es derivado de la desacetilación parcial de la quitina, la cual es el segundo biopolímero natural más abundante en el planeta y su fuente principal de obtención es de crustáceos (ej. camarón y cangrejo) (Szygula y col., 2009). El quitosano es insoluble en agua o en disolventes orgánicos pero es soluble en ácidos diluidos (ej. CH_3COOH y HCl), pues los grupos amino libres se protonan volviéndolo completamente soluble (Szygula y col., 2009). Algunos experimentos han demostrado la alta eficiencia del quitosano en la remoción de turbidez y iones de metales pesados produciendo un sedimento más compacto (menor porcentaje de agua retenida) en comparación con floculantes comerciales (Ruelas-Leyva y col., 2017; Picos-Corrales y col., 2020).

3.2. Almidón

El almidón es un polisacárido, formado por unidades de glucosa, que se encuentra presente en vegetales, frutas y granos (ej. papa, arroz y plátano). Este polímero natural consiste en una mezcla de glucanos (grupo funcional $-\text{OH}$), ya que cada partícula de almidón involucra principalmente amilosa (fracción menor) y amilopectina, donde la amilosa es un polímero lineal [enlace glucosídico α -(1,4)], mientras que la amilopectina es un polímero altamente ramificado [enlaces glucosídicos α -(1,4) y α -(1,6)] (Ortega-Domínguez y col., 2010). En tratamiento de aguas, se ha observado que el uso del almidón modificado es una alternativa que permite disminuir el consumo de polímeros sintéticos comúnmente utilizados en el proceso de coagulación y floculación (polielectrolitos),

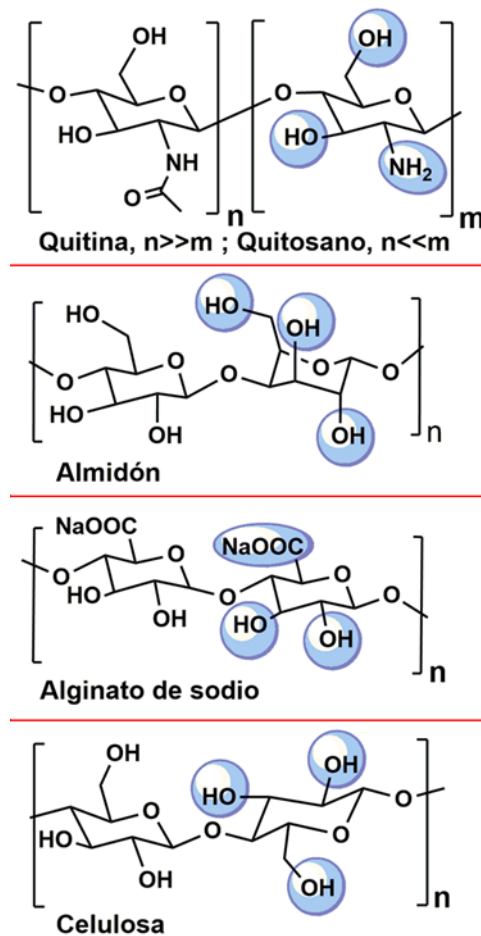


Figura 2. Unidades repetitivas de algunos polímeros ambientalmente amigables.

reduciendo así los costos en plantas tratadoras (Laines-Canepa y col., 2008). Además, el almidón y sus derivados han resultado eficientes en la floculación de partículas minerales ultrafinas e iones de hierro (Dogu y Arol, 2004)

3.3. *Moringa oleífera*

La *Moringa oleífera* es un árbol originario del Himalaya, el cual alcanza una altura de hasta 12 m. Es resistente a climas secos y de fácil adaptabilidad, lo que permite aprovechar su potencial agronómico. Esta planta ha presentado múltiples aplicaciones en áreas como la alimenticia, medicina botánica, tratamiento de aguas, entre otros (Sánchez-Peña y col., 2013). Para tratamiento de aguas, se ha observado que del proceso de extracción de aceites de las semillas de *Moringa oleífera* se obtiene una proteína

catiónica con la particularidad de tener propiedades coagulantes y floculantes. Aproximadamente, un 40% del peso de la semilla corresponde a grasas que no poseen propiedades coagulantes. Cabe señalar que dichos residuos lipídicos no resultan tóxicos para los seres humanos (Mendoza y col., 2000). Este material, además de ser amigable con el medio ambiente y tener una alta eficiencia en la etapa de clarificación del agua, presenta propiedades desinfectantes capaces de eliminar eficazmente algunos microorganismos presentes en agua como coliformes totales y fecales (Dogu y Arol, 2004).

3.4. Alginatos

El alginato es un polisacárido hidrofílico aniónico extraído de las algas pardas y es uno de los materiales naturales biosintetizados más abundantes. Este biopo-

límero está compuesto por ácido β -D-manurónico y unidades de ácido α -L-gulurónico unidas mediante enlaces $\beta(1-4)$ que puede formar hidrogeles fácilmente por simple mezcla con cationes divalentes. El alginato de sodio (SA) es un polielectrolito lineal soluble en agua (Helmiyati y Aprilliza, 2017), pues el ácido alginico contiene los grupos funcionales $-\text{COOH}$ y $-\text{OH}$ (Ikeda y col., 2000). Los hidrogeles de alginatos cuando se mezclan con cationes multivalentes mediante la generación de puentes iónicos entre las cadenas de polímero temperatura ambiente, resultando excelentes candidatos como adsorbentes de diferentes contaminantes (Al-Sakkari y col., 2020; Piras y Smith, 2020). Derivado de sus capacidades gelificantes, el SA puede utilizarse con iones de calcio para tratar aguas turbias (Devrimci y col., 2012).

3.5. Celulosa

La celulosa, generalmente sintetizada por las plantas, es el polisacárido más abundante y constituye el mayor porcentaje de los biopolímeros en la tierra. Su estructura es lineal y está formada por 2000 a 14000 unidades de glucosa unidas por enlace glucosídico $\beta(1,4)$, interactuando entre sí por enlaces de hidrógeno. Es un biopolímero insoluble en agua que posee regiones con un alto ordenamiento (cristalinas), y otras donde el grado de ordenamiento es bajo. Presenta varias formas cristalinas, dando lugar al polimorfismo de la celulosa (Gardner y col., 2008). Este polisacárido de fórmula $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_x$ presenta tres grupos $-\text{OH}$ en cada una de las unidades estructurales. Los materiales sustentables a base de derivados de la celulosa han adquirido un gran interés en su aplicación en el tratamiento de aguas (Mohammed y col., 2018; Nasrollahzadeh y col., 2020).

4. EXPERIMENTOS DE BIOFLOCULACIÓN EN MÉXICO

4.1. Tratamiento de agua de ríos

En México, los cuerpos de agua reciben aproximadamente el 70% del caudal tratado en las plantas tratadoras de aguas residuales. Dentro de todos los sitios de descarga, alrededor del 53% del agua se descarga en ríos, el 15% en arroyos, el 10% en desagües o colectores, el 9% en canales, el 4% en mares, golfos u océanos, mientras que el resto se canaliza hacia estuarios, acuíferos, embalses o represas, entre otros (Raynal-Villasenor, 2020; CONAGUA, 2015a; Anda

y col., 2016). Además de los efluentes de las plantas tratadoras convencionales, algunos efluentes de agua residual agrícola no tratada son descargados directamente en algunos ríos, los cuales suelen ser una de las principales fuentes de abastecimiento para el agua de consumo humano (Picos-Corrales y col., 2020). A pesar del proceso de potabilización, la remoción de compuestos orgánicos presentes en agua de río es un problema complejo. Para el caso de México, la NOM-127-SSA1-1994 establece los parámetros de calidad que debe reunir el agua para uso y consumo humano, donde el límite superior permisible para la turbidez y el color del agua se encuentra en 5 NTU (unidades nefelométricas de turbiedad) y 20 UC (unidades de color en la escala de platino-cobalto), respectivamente; mientras que la mayor concentración permitida para metales y compuestos orgánicos depende de la sustancia en cuestión (ej. $\text{Al}=0.2$ mg/L, $\text{Cu}=2$ mg/L, $\text{Cd}=0.005$ mg/L, $\text{DDT}=0.001$ mg/L, lindano=0.002 mg/L, entre otros). Además, el agua para uso doméstico debe presentar una ausencia de *E. coli* o coliformes fecales.

Debido a la problemática descrita anteriormente, es importante mencionar algunos estudios realizados en México sobre la eficiencia del proceso de floculación usando floculantes ambientalmente amigables que permitan una adecuada remoción de contaminantes comunes y emergentes presentes agua de río. Por ejemplo, en un estudio hecho en el estado de Tabasco se trabajó con muestras del río Carrizal (70 NTU y 85 UC). Para la prueba de jarras se usó una mezcla de almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y sulfato de aluminio grado comercial. La dosis óptima para el tratamiento fueron 2 mg/L de yuca y 28 mg/L de sulfato de aluminio, logrando una eficiencia del 94% en la remoción del color y un 97.9 % en reducción de la turbidez (Solís y col., 2012). En el caso del estado de Sinaloa, un estudio comparativo evaluó la efectividad del quitosano y la harina de semilla de Moringa Oleífera (MOSF, por sus siglas en inglés) para reducir la turbidez y concentración de metales pesados en muestras de agua del Río Humaya. Algunas muestras de agua cruda presentaron turbidez de hasta 70 NTU, además la concentración del plomo (0.0272 mg/L) y el manganeso (0.2164 mg/L) sobrepasaron los límites permisibles establecidos para el agua potable en México (NOM-127-SSA1-1994; $\text{Pb}=0.01$ mg/L y $\text{Mn}=0.15$ mg/L). Las dosis óptimas de quitosano y MOSF para disminuir la turbidez (~90%) fueron de 1 y 5 mg/L, respectivamente. Ambos biofloculantes removieron

un 95% de Pb, la MOSF fue capaz de reducir el Mn hasta en un 90%, a diferencia del quitosano que solo redujo cerca del 25% de este metal. Así, una dosificación adecuada permitió obtener niveles de contaminación por debajo de los límites establecidos por el Gobierno Mexicano (Ruelas-Leyva y col., 2017). Este mismo grupo de investigación realizó un estudio comparativo entre quitosano y harina de paja de frijol (BSF, por sus siglas en inglés) como floculantes. En dicho estudio se registraron valores de turbidez de hasta 32 NTU para el Río Tamazula y 29 NTU para el Río Humaya; donde el quitosano destacó como el bio-floculante más eficaz en la remoción de sólidos para los ríos Tamazula (90%, turbidez final =3) y Humaya (76%, turbidez final =7); en cambio, la BSF redujo la turbidez en 43% y 27%, respectivamente para cada río. Por otro lado, el estudio de remoción de metales se centró en hierro y manganeso, cuya concentración era considerablemente cercana a los límites permisibles; el Río Tamazula presentaba una concentración de 0.238 mg/L de Fe y 0.095 mg/L de Mn; mientras que el Río Humaya tenía concentraciones de 0.190 mg/L de Fe y 0.080 mg/L de Mn. Nuevamente, los resultados demostraron que el quitosano fue más eficaz que el BSF, ya que para el Río Tamazula fue capaz de reducir la concentración de Fe en 78% y en 89% para el Mn; y para el Río Humaya se redujo en 74% para Fe y 81% para Mn (Picos-Corrales y col., 2020). En otro estudio realizado en el estado de Sinaloa se trató agua de río usando quitosano para la remoción de color de agua de río que contenía una concentración preestablecida del fármaco tetraciclina (10 mg/L), simulando contaminación de ríos por fármacos residuales (contaminantes emergentes). En los resultados se observó que una concentración mucho menor de quitosano (0.5 mg/L) llevó a un porcentaje de remoción de color muy comparativo (~60%) al obtenido con el floculante comercial PAC (5 mg/L). De acuerdo a los experimentos en ausencia y presencia de tetraciclina, el quitosano fue el floculante que presentó mayor interacción con el fármaco (Félix-Alcalá, 2020). En todos los casos anteriormente mencionados, donde se usó quitosano, la floculación fue conducida por el mecanismo de adsorción y neutralización de la carga.

4.2. Tratamiento de aguas residuales

De acuerdo con datos presentados por la CONAGUA, en el año 2014 el volumen de aguas residuales provenientes de las descargas municipales fue de aproximadamente 7.2 miles de hectómetros cúbicos

al año (228.7 m³/s), de las cuales 6.65 miles de hectómetros cúbicos al año se colectaron en los sistemas de alcantarillado y se trataron 3.51 miles de hectómetros cúbicos. En el caso de las aguas residuales industriales en ese mismo año se tuvieron descargas correspondientes aproximadamente de 6.67 miles de hectómetros cúbicos al año, de los cuales se trataron 2.07 miles de hectómetros cúbicos al año (CONAGUA 2015b, 2015c). Como se puede observar en los datos anteriores, de la gran cantidad de agua que es descargada, solo una pequeña parte recibe tratamiento primario (no se enfoca en contaminantes emergentes), mientras que el resto de estas aguas contaminadas suelen ser depositadas directamente en el medio ambiente. Por ello, diversos estudios realizados en México han evaluado la remediación de aguas residuales empleando biofloculantes, tanto en descargas municipales como efluentes de diferentes industrias. Por ejemplo, en el estado de Jalisco se llevó a cabo un estudio de tratamiento de vinaza, efluente de la industria tequilera, evaluando diferentes biopolímeros como floculantes, entre ellos el quitosano, goma guar y compuestos de la semilla de algarrobo. En esa investigación, el quitosano a una concentración de 300 mg/L fue el biopolímero más eficiente, logrando el 75% de remoción de color, una reducción del 90% de la turbidez y un 13.55% en la demanda química orgánica (Ferral-Pérez y col., 2016). Por otra parte, en la ciudad de Tijuana, estado de Baja California, se usó quitosano para el tratamiento de agua residual proveniente de la industria productora de tortillas. Los resultados mostraron que este polisacárido fue efectivo a pH 5.5 y dosis menor a 3 g/L, teniendo eficiencias superiores al 80% en la remoción de turbidez (Suarez-Meraz y col., 2016). Para este tipo de agua residual, también se reportó un estudio usando quitosano y alginato de sodio, tanto de manera individual como secuencial. En el tratamiento independiente, el alginato fue más eficiente en la remoción de demanda química de oxígeno (DQO) con un 61.43%, en comparación con el quitosano que presentó un 59.74%. Con respecto al tratamiento secuencial, los mejores resultados se obtuvieron con en el tratamiento donde se utilizó primero alginato y posteriormente quitosano, con un porcentaje de remoción DQO de 70.19% (Vacío-Muro y col., 2020). La combinación de quitosano con alginato de sodio también ha sido evaluada para tratar aguas residuales provenientes de una industria harinera de pescado en la ciudad de Mazatlán, estado de Sinaloa. Para ello, con experimentos de prueba de jarras usando

300 mg/L de quitosano con 20 mg/L alginato de sodio se logró remover exitosamente el 91.84% de sólidos suspendidos totales y 90.83% de sólidos suspendidos volátiles (Arias-Lizárraga y Méndez-Gómez, 2014). Por otra parte, para las aguas residuales derivadas de una industria cosmética localizada en la Ciudad de México, se evaluó el proceso de coagulación-floculación utilizando diferentes biopolímeros (goma guar, goma garrofin y mucilago de nopal). En general, se obtuvieron resultados de remoción de 67.8% para turbidez, 20.1% para conductividad eléctrica y 38.7% de DQO, siendo el mucilago de nopal el floculante de mayor eficiencia en la remoción con 21.1 mg DQO/mg de polímero (Carpinteyro-Urban y col., 2012). En otra investigación que fue realizada en el estado de Tabasco se usó almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en combinación con sustancias inorgánicas como $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, FeCl_3 y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para el tratamiento de aguas residuales domésticas. La combinación que

presentó la mayor eficiencia fue 250 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y 750 mg/L del almidón, logrando remover 75% de la turbidez y 78% del color, resultando una turbidez final de 6 NTU (Ortiz y col. 2018). En otros estudios realizados en la Ciudad de Culiacán, estado de Sinaloa, se ha demostrado la alta eficiencia de bajas concentraciones de quitosano (5-10 mg/L), vía floculación directa, en la remediación de aguas residuales agrícolas y mezclas de efluentes (agua residuales agrícolas y domésticas), llevando la turbidez hasta un valor aceptado por las normas mexicanas para agua de uso doméstico (cerca de 5 NTU) (Ruelas-Leyva y col., 2017; Picos-Corrales y col., 2020).

En la Tabla 1 se resumen algunos datos selectos que demuestran la eficiencia de algunos materiales ambientalmente amigables estudiados como floculantes en muestras de agua tomadas de fuentes diferentes en México.

Tabla 1. Materiales ambientalmente amigables estudiados en el tratamiento de aguas vía floculación.

Material	Dosis	Muestra de agua	Eficiencia de remoción	Referencia
Almidón de yuca con sulfato de aluminio	2 mg/L y 28 mg/L	Río Carrizal (70 NTU)	98%, turbidez	(Solís y col., 2012)
<i>Moringa Oleífera</i>	5-10 mg/L	Río Humaya (70 NTU)	92%, turbidez 90%, Mn	(Ruelas-Leyva y col., 2017)
Quitosano	5 mg/L	Río Tamazula (32 NTU)	90%, turbidez 89%, Mn	(Picos-Corrales y col., 2020)
Quitosano	300 mg/L	Vinaza	90%, turbidez 13%, DQO	(Ferral-Pérez y col., 2016)
Quitosano	5 mg/L	Mezclas de agua residual (160 NTU)	96%, turbidez 80%, Fe	(Picos-Corrales y col., 2020)
Quitosano con alginato de sodio	300 mg/L y 20 mg/L	Industria harinera de pescado	92%, sólidos suspendidos totales	(Arias-Lizárraga y Méndez-Gómez, 2014)

5. CONCLUSIONES

De acuerdo a la literatura consultada, es necesario implementar una campaña de monitoreo exhaustivo de las aguas superficiales, así como llevar a cabo un tratamiento adecuado de las aguas residuales domésticas y agrícolas antes de ser depositadas en el medio ambiente. Los floculantes ambientalmente amigables representan una alternativa prometedora para el tratamiento de aguas a nivel nacional. Dentro de este grupo de floculantes, se observó que el quitosano podría ser la opción que más ventajas ofrece en cuanto a los tipos de agua a tratar, la variedad de contaminantes que puede remover y su eficiencia de remoción, además de que este polisacárido produce un volumen de lodos menor y se puede aplicar a concentraciones más bajas (1 mg/L) comparado con el floculante comercial poli(cloruro de aluminio) (PAC) (5 mg/L). Es importante resaltar que el uso de algunos biofloculantes ha permitido obtener agua con niveles de turbidez y concentraciones de contaminantes dentro de los límites establecidos por el reglamento ambiental mexicano (NOM-127-SSA1-1194; NOM-002-SEMARNAT-1996). En el caso de biomateriales de bajo costo, que ofrecen una eficiencia menor como floculantes, éstos pueden ser utilizados en un pretratamiento de aguas para mitigar los niveles de contaminación antes de otras etapas de remediación.

Nota: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

REFERENCIAS

- Addo-Bediako, A., Matlou, K., & Makushu, E. (2018). Heavy metal concentrations in water and sediment of the Steelpoort River, Olifants River System, South Africa. *African Journal of Aquatic Science*, 43(4), 413-416.
- Al-Sakkari, E. G., Abdeldayem, O. M., Genina, E. E., Amin, L., Bahgat, N. T., Rene, E. R., & El-Sherbiny, I. M. (2020). New Alginate-Based Interpenetrating Polymer Networks for Water Treatment: A Response Surface Methodology Based Optimization Study. *International Journal of Biological Macromolecules*, 155, 772-785.
- Andía-Cárdenas Y. (2000). Tratamiento de agua coagulación y floculación. Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. Disponible en: http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ac55-56209841d9b8&groupId=1015 (consultado el 10 de octubre de 2020).
- Arias-Lizárraga, D. M. & Méndez-Gómez, E. (2014). Remoción de sólidos en aguas residuales de la industria harinera de pescado empleando biopolímeros. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(3), 115-123.
- Bilal, M., Adeel, M., Rasheed, T., Zhao, Y., & Iqbal, H. M. (2019). Emerging contaminants of high concern and their enzyme-assisted biodegradation—a review. *Environment International*, 124, 336-353.
- Boamah, P. O., Huang, Y., Hua, M., Zhang, Q., Liu, Y., Onumah, J., ... & Song, Y. (2015). Removal of cadmium from aqueous solution using low molecular weight chitosan derivative. *Carbohydrate polymers*, 122, 255-264.
- Calderón, A., Meraz, M., & Tomasini, A. (2019). Pharmaceuticals present in urban and hospital wastewaters in Mexico City. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 41(2), 105-112.
- Carpinteyro-Urban, S., Vaca, M., & Torres, L. G. (2012). Can vegetal biopolymers work as coagulant–floculant aids in the treatment of high-load cosmetic industrial wastewaters?. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(8), 4925-4936.
- Cheng, D., Ngo, H. H., Guo, W., Chang, S. W., Nguyen, D. D., Liu, Y., ... & Wei, D. (2020). A critical review on antibiotics and hormones in swine wastewater: Water pollution problems and control approaches. *Journal of hazardous materials*, 387, 121682.
- CONAGUA (2016) Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Pretratamiento y Tratamiento Primario. Comisión Nacional del Agua. Publicaciones Estadísticas y Geográficas SINA 130:92.
- CONAGUA, SEMARNAT (2015a) Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Edición 2015. Conagua, Semarnat, México.
- CONAGUA, SEMARNAT. (2015b) Estadísticas del Agua en México. Edición 2015. Conagua, Semarnat. México.

CONAGUA, SEMARNAT (2015c). Situación del Subsector de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. Edición 2015. Conagua, Semarnat. México.

Crini G., Lichtfouse E, Wilson L.D., Morin-Crini N. 2019. Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters* 17, 195-213.

Devrimci, H. A., Yuksel, A. M., & Sanin, F. D. (2012). Algal Alginate: A Potential Coagulant for Drinking Water Treatment. *Desalination*, 299, 16–21.

Díaz-Torres, E., Gibson, R., González-Farías, F., Zarco-Arista, A. E., & Mazari-Hiriart, M. (2013). Endocrine disruptors in the Xochimilco wetland, Mexico City. *Water, Air, & Soil Pollution*, 224(6), 1586.

Dogu, I. & Arol, A. I. (2004). Separation of Dark-Colored Minerals from Feldspar by Selective Flocculation using Starch. *Powder Technology*, 139, 258–263.

EPA, 2017. Contaminants of Emerging Concern

Evans, A. E., Mateo-Sagasta, J., Qadir, M., Boelee, E., & Ippolito, A. (2019). Agricultural water pollution: key knowledge gaps and research needs. *Current opinion in environmental sustainability*, 36, 20-27.

Félix-Alcalá D.V. (2020). Estudio comparativo usando quitosano de diferentes proveedores para la remoción de turbidez en muestras de agua cruda (Tesis de Licenciatura). Universidad Autónoma de Sinaloa. Culiacán Sinaloa.

Félix-Cañedo, T. E., Durán-Álvarez, J. C., & Jiménez-Cisneros, B. (2013). The occurrence and distribution of a group of organic micropollutants in Mexico City's water sources. *Science of the Total Environment*, 454, 109-118.

Ferral-Pérez, H., Torres Bustillos, L. G., Méndez, H., Rodríguez-Santillan, J. L., Chairez, I. (2016). Sequential treatment of tequila industry vinasses by biopolymer-based coagulation/flocculation and catalytic ozonation. *Ozone: Science & Engineering*, 38(4), 279-290.

García-de la Parra, L. M.; Cervantes-Mojica, L. J.; González-Valdivia, C.; Martínez-Cordero, F. J.; Aguilar-Zárate, G.; Bastidas- Bastidas, P.; Betancourt-Lozano, M. (2012). Distribution of Pesticides and PCBs in Sedi-

ments of Agricultural Drains in the Culiacan Valley, Sinaloa, Mexico. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 63, 323-336

Gardner, D. J., Oporto, G. S.; Mills, R., & Samir, M. A. S. A (2008). Adhesion and Surface Issues in Cellulose and Nanocellulose. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 22, 545–567.

Helmiyati & Aprilliza, M. (2017). Characterization and Properties of Sodium Alginate from Brown Algae used as an Ecofriendly Superabsorbent. *Materials Science and Engineering Conference Series*, 188, 012019.

Hermosillo-Ochoa, E., Picos-Corrales, L.A., Licea-Claverie, A. (2021). Eco-friendly flocculants from chitosan grafted with PNVCL and PAAc: Hybrid materials with enhanced removal properties for water remediation. *Separation and Purification Technology*, 258, 118052.

Ide, A. H., Osawa, R. A., Marcante, L. O., da Costa Pereira, J., & de Azevedo, J. C. R. (2017). Occurrence of pharmaceutical products, female sex hormones and caffeine in a subtropical region in Brazil. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 45(9), 1700334.

Ikeda, A., Takemura, A., Ono, H. (2000). Preparation of Low-Molecular Weight Alginic Acid by Acid Hydrolysis. *Carbohydrate Polymers*, 42, 421–425.

Laines-Canepa, J. R., Goñi-Arévalo, J. A., Adams Schroeder, R. H., & Camacho Chiu, W. (2008). Mezclas Con Potencial Coagulante Para Tratamiento de Lixiviados de Un Relleno Sanitario. *Interciencia*, 33, 22–28.

Lee, C. S., Robinson, J., & Chong, M. F. (2014). A review on application of flocculants in wastewater treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, 92, 489-508.

Lesser, L. E., Mora, A., Moreau, C., Mahlkecht, J., Hernández-Antonio, A., Ramírez, A. I., & Barrios-Piña, H. (2018). Survey of 218 organic contaminants in groundwater derived from the world's largest untreated wastewater irrigation system: Mezquital Valley, Mexico. *Chemosphere*, 198, 510-521.

Li, N., Sheng, G. P., Lu, Y. Z., Zeng, R. J., & Yu, H. Q. (2017). Removal of antibiotic resistance genes from was-

tewater treatment plant effluent by coagulation. *Water research*, 111, 204-212.

Lichtfouse E, Morin-Crini N, Fourmentin M., Zemmouri H., do Carmo Nascimento I.O., Queiroz L.M., Mohd M., Picos-Corrales L.A., Pei H., Wilson L.D., Crini, G. 2019. Chitosan for Direct Bioflocculation Processes. En: Crini, G. y Lichtfouse. *Sustainable Agriculture Reviews* 36: Chitin and Chitosan: Applications in Food, Agriculture, Pharmacy, Medicine and Wastewater Treatment. 36. Francia: Springer. 335-380.

Liu, C., Gao, B., Wang, S., Guo, K., Shen, X., Yue, Q., & Xu, X. (2020). Synthesis, characterization and flocculation performance of a novel sodium alginate-based flocculant. *Carbohydrate Polymers*, 248, 116790.

Makarigakis, A. K., & Jimenez-Cisneros, B. E. (2019). UNESCO's contribution to face global water challenges. *Water*, 11(2), 388.

Mendoza, I., Fernández, N., Ettiene, G. (2000). Uso de La Moringa Oleifera Como Coagulante en la Potabilización de las Aguas. *Ciencia*, 8, 235-242.

Mohammed, N., Grishkewich, N., & Tam, K. C. (2018). Cellulose Nanomaterials: Promising Sustainable Nanomaterials for Application in Water/Wastewater Treatment Processes. *Environmental Science: Nano*, 5, 623-658.

Montes, A.M., González-Farías, F.A. & Botello, A.V. (2012). Pollution by organochlorine pesticides in Nava-chiste-Macapule, Sinaloa, Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184, 1359-1369.

Morin-Crini N., Lichtfouse E., Liu G., Balaram V., Ribeiro A.R.L., Lu Z., Stock F., Carmona E., Teixeira M. R., Picos-Corrales L.A., Moreno-Piraján J.C., Giraldo L., Li C., Pandey A., Hocquet D., Torri G., Crini G. 2021. Emerging Contaminants: Analysis, Aquatic Compartments and Water Pollution. En: Morin-Crini N., Lichtfouse E., Crini G. *Emerging Contaminants Vol. 1. Environmental Chemistry for a Sustainable World*, 65. Switzerland: Springer, Cham. 1-111.

Nasrollahzadeh, M., Sajjadi, M., Iravani, S., & Varma, R. S. (2020). Starch, Cellulose, Pectin, Gum, Alginate, Chitin and Chitosan Derived (Nano)Materials for Sustai-

nable Water Treatment: A Review. *Carbohydrate Polymers*, 251, 116986.

Nharingo T, Moyo M. (2016). Application of *Opuntia ficus-indica* in bioremediation of wastewaters. A critical review. *Journal of Environmental Management* 166: 55-72.

Norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización"

Novillo, O., Pertusa, J. F., & Tomás, J. (2017). Exploring the presence of pollutants at sea: monitoring heavy metals and pesticides in loggerhead turtles (*Caretta caretta*) from the western Mediterranean. *Science of the Total Environment*, 598, 1130-1139.

Ortega-Domínguez, J. A., Laines-Canepa, J. R., & Aparicio-Trápala, M. A. (2010). Almidón Modificado de Plátano: Posible Uso En El Tratamiento de Lixiviados Provenientes de Rellenos Sanitarios. *Kuxulkab*, XVII, 87-97.

Ortiz, V., López, G., Torres, C., Pampillón, L. (2018). Almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) como coadyuvante en la coagulación floculación de aguas residuales domésticas/Cassava Starch (*Manihot esculenta* Crantz) As a coadjuvant in the coagulation flocculation of domestic wastewater. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 7(13), 18-46.

Özacar, M., & Şengil, İ. A. (2003). Evaluation of tannin biopolymer as a coagulant aid for coagulation of colloidal particles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 229, 85-96.

Patel, P., Raju, N. J., Reddy, B. S. R., Suresh, U., Sankar, D. B., & Reddy, T. V. K. (2018). Heavy metal contamination in river water and sediments of the Swarnamukhi River Basin, India: risk assessment and environmental implications. *Environmental Geochemistry and Health*, 40(2), 609-623.

Pérez-Coyotl, I., Galar-Martínez, M., García-Medina, S., Gómez-Oliván, L. M., Gasca-Pérez, E., Martínez-Gale-ro, E., ... & Pérez-Solsona, S. (2019). Polluted water from an urban reservoir (Madín dam, México) induces toxicity and oxidative stress in *Cyprinus carpio* embryos. *Environmental Pollution*, 251, 510-521.

Pérez-Espejo, R., Aguilar-Ibarra, A., Escobedo-Sagaz, J.L. (2011) Agriculture and Water Pollution: Farmers' Perceptions in Central Mexico, *International Journal of Water Resources Development*, 27(1), 263-273.

Perez-Gonzalez, E., Osuna-Martinez, U. G., Herrera-Moreno, M. N., Rodriguez-Meza, G. D., Gonzalez-Ocampo, H. A., & Bucio-Pacheco, M. (2017). Organochlorine pesticides in gonad, brain, and blood of mice in two agricultural areas of Sinaloa. *Bulletin of Environmental Contamination and toxicology*, 98(4), 454-459.

Picos-Corrales, L. A., Sarmiento-Sánchez, J. I., Ruelas-Leyva, J. P., Crini, G., Hermosillo-Ochoa, E., & Gutiérrez-Montes, J. A. (2020). Environment-Friendly Approach toward the Treatment of Raw Agricultural Wastewater and River Water via Flocculation Using Chitosan and Bean Straw Flour as Bioflocculants. *ACS omega*, 5(8), 3943-3951.

Pino-Otín, M. R., Muñiz, S., Val, J., & Navarro, E. (2017). Effects of 18 pharmaceuticals on the physiological diversity of edaphic microorganisms. *Science of The Total Environment*, 595, 441-450.

Piras, C. C. & Smith, D. K. (2020). Multicomponent Polysaccharide Alginate-Based Bioinks. *Journal of Materials Chemistry B*, 8, 8171-8188.

Prakash N.B., Sockan V., Jayakaran P. 2014. Wastewater treatment by coagulation and flocculation. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology* 3, 479-484.

Raynal-Villasenor, J. A. (Ed.). (2020). *Water Resources of Mexico*. World Water Resources, 6. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-40686-8>

Renault F, Sancey B, Badot P, Crini G. (2009). Chitosan for Coagulation/Flocculation Processes – An Eco-Friendly Approach. *European Polymer Journal*, 45, 1337-1348.

Renault, F., Sancey, B., Charles, J., Morin-Crini, N., Badot, P. M., Winterton, P., & Crini, G. (2009). Chitosan flocculation of cardboard-mill secondary biological wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 155, 775-783.

Reynolds, C., & Ryan, P. G. (2018). Micro-plastic ingestion by waterbirds from contaminated wetlands in South Africa. *Marine pollution bulletin*, 126, 330-333.

Rodríguez, Á. G. P., López, M. I. R., Casillas, T. A. D., León, J. A. A., Prusty, B. A. K., & Cervera, F. J. Á. (2017). Levels of persistent organic pollutants in breast milk of Maya women in Yucatan, Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(2), 59.

Ruelas-Leyva, J. P., Contreras-Andrade, I., Sarmiento-Sánchez, J. I., Licea-Claverie, A., Jiménez-Lam, S. A., Cristerna-Madrigal, Y. G., & Picos-Corrales, L. A. (2017). The Effectiveness of Moringa oleifera Seed Flour and Chitosan as Coagulant-Flocculants for Water Treatment. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 45(8), 1600339.

Sánchez-Peña, Y., Martínez-Ávila, G., Sinagawa-García, S., & Vázquez-Rodríguez, J. (2013). Moringa oleifera; Importancia, Funcionalidad y Estudios Involucrados. *AQM Acta Química Mexicana*, 5, 25-30.

SEMARNAT. 2016. Informe de la situación del medio ambiente. Edición 2015. Ciudad de México, México: Semarnat. 498 p.

Solís-Silvan, R., Laines-Canepa, J. R., & Hernández-Barajas, J. R. (2012). Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(3), 229-236.

Stokal, M., Ma, L., Bai, Z., Luan, S., Kroeze, C., Oenema, O., ... & Zhang, F. (2016). Alarming nutrient pollution of Chinese rivers as a result of agricultural transitions. *Environmental Research Letters*, 11(2), 024014.

Stuart, M., Lapworth, D., Crane, E., & Hart, A. (2012). Review of risk from potential emerging contaminants in UK groundwater. *Science of the Total Environment*, 416, 1-21.

Suarez-Meraz, K. A., Ponce-Vargas, S. M., Lopez-Maldonado, J. T., Cornejo-Bravo, J. M., Oropeza-Guzman, M. T., & López-Maldonado, E. A. (2016). Eco-friendly innovation for nejayote coagulation-flocculation process using chitosan: Evaluation through zeta potential measurements. *Chemical Engineering Journal*, 284, 536-542.

Szygula, A., Guibal, E., Palacín, M. A., Ruiz, M., Sastre, A. M. (2009). Removal of an anionic dye (Acid Blue

92) by coagulation–flocculation using chitosan. *Journal of Environmental Management*, 90, 2979-2986.

Vacio-Muro, K. J., Lozano-Álvarez, J. A., Sánchez-González, M. N., Vela, N. A. C., Torres-Ramírez, E., & Jáuregui-Rincón, J. (2020). Remoción de Contaminantes del Nejayote con Alginato y Quitosano. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(3), 497-515.

Vargas-Berrones, K., Bernal-Jácome, L., de León-Martínez, L. D., & Flores-Ramírez, R. (2020). Emerging po-

llutants (EPs) in Latin América: A critical review of under-studied EPs, case of study-Nonylphenol. *Science of The Total Environment*, 726, 138493.

Yakout, A. A., El-Sokkary, R. H., Shreadah, M. A., & Hamid, O. G. A. (2016). Removal of Cd (II) and Pb (II) from wastewater by using triethylenetetramine functionalized grafted cellulose acetate-manganese dioxide composite. *Carbohydrate Polymers*, 148, 406-414.

Reducción de la respuesta sísmica mediante el uso de aisladores de base elastoméricos con núcleo de plomo en una estructura de ocho niveles

Reduction of seismic response through the use of lead-cored elastomeric base insulators in an eight-level structure

Carlos Flores Aburto¹, Joel Melchor Ojeda Ruiz², Manuel Barraza², Alberto Parra Meza², Donobhan Presichi Gerardo¹, Victor Baca³

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objetivo demostrar que es posible reducir la respuesta sísmica de edificios mediante el uso de aisladores de base elastoméricos. Para ello, se determina la respuesta sísmica de un edificio de ocho niveles, la cual se compara con la respuesta estructural del mismo edificio, pero con una interfaz de aisladores elastoméricos con núcleo de plomo entre el segundo y tercer entrepiso. Los dos primeros niveles del edificio corresponden a un área de estacionamiento a base de marcos tridimensionales de concreto reforzado resistentes a momento, y los seis siguientes niveles a oficinas a base de marcos tridimensionales resistentes a momento de acero estructural. En una primera etapa, se hace un análisis sísmico estático y se diseña la estructura de manera convencional, donde los desplazamientos rigen el diseño de los elementos resistentes. Por otro lado, el diseño de los dispositivos aisladores de base se realizó con la demanda de cortante en la base del tercer nivel. Posteriormente, se realizan análisis no lineales de ambos modelos y se comparan sus respuestas sísmicas. Se observa que los valores de la respuesta en términos de cortantes y distorsiones para la estructura aislada alcanzan reducciones considerables tanto para el sismo de diseño como para el sismo máximo considerado.

ABSTRACT

Palabras clave:

Respuesta sísmica,
aisladores de base,
demandas máximas

Keywords:

Seismic response,
base isolators,
maximum demands

The objective of this study is to demonstrate that it is possible to reduce the seismic response of buildings by using base isolator devices. For this aim, the seismic response of an eight-story building is calculated considering two cases. While the first case corresponds to a rigid base model, in the second structure a base isolators interface is used. Lead core elastomeric base isolators devices are used at the base of second and third story level. The first and second levels are designated as parking garage; the structural system here is based on reinforced concrete moment resisting frames. Upper levels are designated as office areas, where the structural system is based on structural steel moment resisting frames. A regular design procedure is applied from static seismic analysis, where structural member design is controlled by lateral displacement demands. Seismic base isolators are designed according to shear force demands at the base of third level. Finally, nonlinear analyses are performed for both structural models (rigid base model and base isolator model). It is observed that the value of the structural response in terms of shears and drifts demands for the base isolator building are considerably reduced when is subjected to earthquake loads.

1. INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Existen regiones en el mundo con una alta actividad sísmica, donde los eventos sísmicos pueden causar grandes pérdidas económicas, así como de vidas

*Autor para correspondencia. Manuel Barraza

Dirección de correo electrónico: barraza.manuel@uabc.edu.mx

¹Profesor de asignatura, Universidad Autónoma de Baja California, Carretera Transpeninsular Ensenada-Tijuana No. 3917, Col. Playitas, CP 22860, Ensenada, B.C., México, cflores52@uabc.edu.mx, donobhan@hotmail.com

²Profesor de Tiempo Completo, Universidad Autónoma de Baja California, Carretera Transpeninsular Ensenada-Tijuana No. 3917, Col. Playitas, CP 22860, Ensenada, B.C., México, joel.ojeda@uabc.edu.mx, albertoparra@uabc.edu.mx

³Estudiante graduado Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán 80040, México. Victor_02305@hotmail.com

humanas, lo que lleva a situaciones de riesgo extremo. Estas regiones sísmicas están bien identificadas debido a eventos históricos, su frecuencia y otros debido a los daños registrado (Bazán y Meli, 2004).

La ubicación cercana a las fallas tectónicas es siempre un factor importante a tomar en cuenta en el diseño estructural, añadiendo que las características del suelo deben ser consideradas debido a la interacción suelo-estructura que puede amplificar la respuesta estructural ante solicitaciones sísmicas. En consecuencia, las metodologías de diseño tienden a evitar mayores impactos por eventos sísmicos (Bazán y Meli, 2004).

En el noroeste de México, existe una gran actividad sísmica que se produce entre las placas tectónicas del Pacífico y la de Norteamérica. Algunas de estas fallas activas se muestran en la figura 1, por lo cual, el diseño sísmico es una preocupación importante para cualquier proyecto estructural en esa región (Sánchez, 2007). La mayoría de las fallas identificadas en esa

zona, llegan a los Estados Unidos de América, compartiendo eventos en ambos lados de la frontera internacional (Flores, 2017).

Una de las formas efectivas de reducir la demanda sísmica en la construcción se basa en el control estructural mediante la aplicación de nuevas tecnologías de aislamiento de base (Deringöl, 2018). El uso de ciertos tipos de dispositivos que mejoran la forma en que un sistema estructural libera energía inducida a partir de eventos sísmicos, es de gran interés hoy en día entre Ingenieros Estructurales. El objetivo principal con el uso de aisladores sísmicos es evitar daños estructurales severos manteniendo los daños y los desplazamientos laterales a niveles bajos (Lluhen, 2011). Los aisladores de base son dispositivos que están colocados entre la cimentación y la super-estructura de una edificación, estos absorben las excitaciones inducidas del suelo y restringe los desplazamientos entre pisos en el caso de estructuras de edificios (Masoud, 2020).



Figura 1. Algunas fallas en el noroeste de México, (Grupo RESNOM, 2003)

Los aisladores sísmicos de base fabricados de elastómero están formados por capas de hule intercaladas entre placas de acero. El espesor total del caucho provee la rigidez horizontal baja necesaria para lograr el cambio de período, mientras que el espaciado de las placas de ajuste de acero controla la rigidez vertical del rodamiento para un módulo de corte y un área de caucho adherida a los dados (Eddin, 2015). En ocasiones, se le agrega al dispositivo un corazón de plomo para incrementar su capacidad de disipar energía. En la tapa y base del aislador se colocan placas de acero que permiten conectar el aislador al edificio y la cimentación. Debido al efecto confinante de las placas de acero, un aislador de hule exhibe una rigidez vertical mucho mayor que la que exhibe en dirección lateral (González y Aguilar 2005).

Trabajo previo

Las investigaciones relacionadas con el cálculo de la respuesta de edificios con aisladores elastoméricos que se han desarrollado previamente son: Ojeda et al. (2012) estudiaron un edificio de 12 pisos donde el sistema estructural se basó en marcos de acero estructural y utilizaron contravientos para el control de desplazamiento lateral. Los aisladores sísmicos elastoméricos con núcleo de plomo en ese caso se consideraron en

la base de la estructura. Se desarrolló un análisis no lineal de historia en el tiempo para un conjunto de registros de movimiento del suelo al que se le aplicó el procedimiento de Somerville (2003), mediante el cual se escalaron para obtener registros a nivel de sismo de diseño y de sismo máximo considerado. De acuerdo con el reporte de resultados, se obtuvo una reducción de hasta un 60% para las distorsiones del edificio aislado con respecto al de base fija. Otros resultados muestran que un comportamiento no lineal extendido se desarrolló en las vigas, sobre toda la estructura para el caso de base rígida.

En el proyecto definido para este trabajo (edificio de 8 pisos) se debe considerar el comportamiento del sistema estructural con marcos resistentes a momento para el control de desplazamiento lateral, sometidos al mismo conjunto de registros sísmicos que en el trabajo anterior.

Descripción del proyecto

Este caso de estudio se ubica dentro del área urbana de Ensenada, Baja California, México. El proyecto está relacionado con un edificio de 8 pisos en el que se designan dos niveles inferiores como estacionamiento y los seis niveles restantes se consideran oficinas, cuatro por cada nivel (ver figuras 2-4).



Figura 2. Perspectiva del edificio de oficinas.

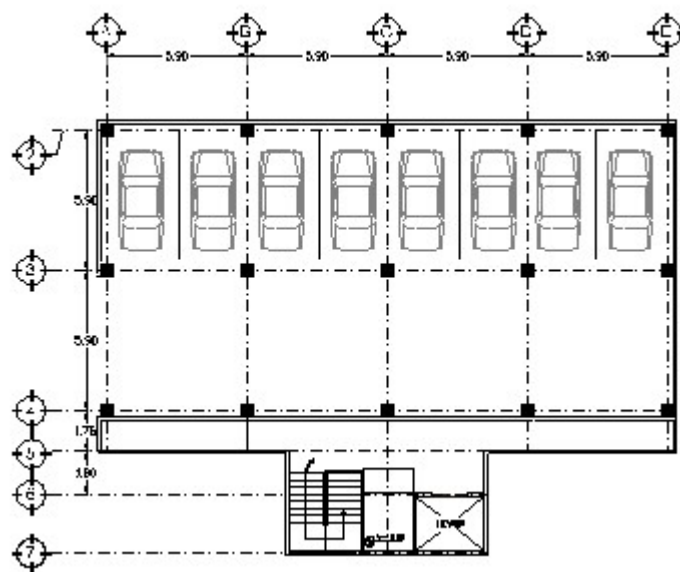


Figura 3. Planta de estacionamiento.

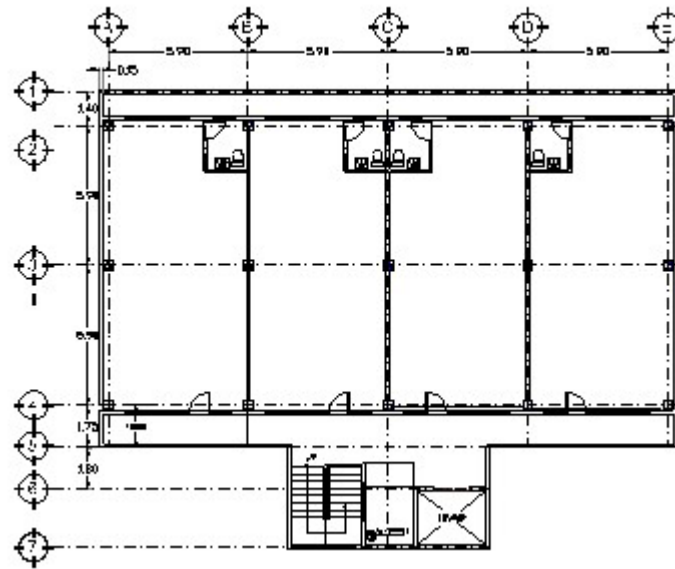


Figura 4. Planta de oficinas (niveles superiores)

El sistema estructural es a base de marcos tridimensionales, donde la rigidez lateral está suministrada únicamente por marcos resistentes a momento; es decir, no hay elementos rigidizantes como contravientos o muros de cortante. Por propósitos constructivos, los niveles de estacionamiento se modelan con estructura de concreto reforzado y los seis niveles superiores a base de marcos de acero estructural. Es entre la estructura de concreto y la de acero donde se propone la interfaz de aisladores de base.

El diseño estructural se lleva a cabo de manera convencional para marcos rígidos, cumpliendo con los requerimientos para ambos materiales, tanto para el concreto reforzado como para el acero estructural. Posteriormente se realiza un análisis no lineal de historia en el tiempo para estudiar la respuesta estructural, primero con los marcos sin los aisladores y después incluyendo la interfaz de aisladores elastoméricos con núcleo de plomo.

Análisis y diseño convencional

El sistema estructural se diseñó a partir de condiciones convencionales. El comportamiento de la estructura se revisó para cumplir con los criterios y requerimientos de diseño establecidos en los códigos estadounidenses, observando disminuciones considerables tanto de desplazamientos, distorsiones y fuerzas cortantes.

Cargas gravitacionales

La definición de las cargas gravitacionales se basa en los requerimientos establecidos en el ASCE 07-10;

además, del peso propio de los elementos estructurales. Las cargas se muestran en la tabla 1.

Análisis de cargas sísmicas

El método de las cargas laterales equivalentes se usó como se describe en la sección 12.8 del ASCE 07-10 para análisis sísmico.

El cortante basal se calculó como:

$$V = C_s W_T = 1007.65 \text{ kN} \quad (1)$$

donde

$$\begin{aligned} V &= \text{Cortante basal} \\ C_s &= \text{Coeficiente sísmico} \\ W_T &= \text{Carga total} \end{aligned}$$

el coeficiente sísmico ($C_s = 0.05626$) se determinó de la siguiente manera:

$$0.044 S_{DS} I_e < \frac{S_{DS}}{\frac{R}{I_e}} < \frac{S_{D1}}{T \left(\frac{R}{I_e} \right)} \quad (2)$$

y de acuerdo con la figura 5 (espectro de diseño):

$$\begin{aligned} S_{DS} &= \text{Aceleración espectral de diseño a periodos cortos con 5\% de amortiguamiento} = 1.00 \text{ g} \\ S_{D1} &= \text{Aceleración espectral de diseño a periodo de 1 s con 5\% de amortiguamiento} = 0.60 \text{ g} \\ I_e &= \text{Factor de importancia de acuerdo a la ocupación de la estructura} = 1.0 \end{aligned}$$

Tabla 1. Cargas gravitacionales por nivel .

Nivel	Carga viva (kN)			Peso propio de elementos (kN)			CM losa (kN)	Muros división (kN)	Barandal o pretil	Muros (kN)		Carga concentrada(kN)
	Azotea	Entrepiso	Pasillo	Losas	Vigas	Columnas				Ligeros	Cancelería	
Azotea	342.106			773.132	116.623	166.261	370.464		110.891			1879.476
6		668.352	298.28	773.132	121.176	166.261	422.884	133.670	28.72	116.744	25.828	2755.049
5		668.352	298.28	773.132	144.394	166.261	422.884	133.670	28.72	116.744	25.828	2778.267
4		668.352	298.28	773.132	144.394	184.496	422.884	133.670	28.72	116.744	25.828	2796.502
3		668.352	298.28	773.132	148.871	202.732	422.884	133.670	28.72	116.744	25.828	2819.214
2		668.352	298.28	773.132	148.871	202.732	422.884	133.670	28.72	116.744	25.828	2819.214
1		668.352	298.28	1259.545	916.78	458.068	422.884	133.670	28.72	116.744	25.828	4328.873
Estac. 2		534.682	203.479	1134.425	793.922	458.068	230.673		350.335			3705.583
$\Sigma =$	342.106	4544.794	1993.162	7032.761	2535.028	2004.88	3138.441	802.022	633.548	700.466	154.97	23882.178

R = Coeficiente de modificación de respuesta de acuerdo al tipo de sistema estructural = 8

T = Periodo fundamental de la estructura calculada de manera preliminar = 1.333 s

El espectro de diseño está basado de acuerdo a la clasificación del suelo en el sitio de construcción, en este caso, se supuso un suelo blando tipo “D”, de acuerdo a la sección 11.4 del ASCE 07-10. El coeficiente sísmico C_s es ligeramente diferente para el análisis en la dirección “X” (dirección longitudinal del edificio) que para la dirección “Y” (dirección transversal del edificio), como resultado de los marcos propuestos en ambas direcciones, pero para propósitos ilustrativos, solo se muestran los resultados en la dirección “X”.

Las cargas laterales equivalentes de entrepiso F_x se calcularon multiplicando el factor de distribución vertical C_{vx} por el cortante basal V , y se localizaron en el centro de masas de cada entrepiso. El factor de

distribución vertical está en función de los pesos de entrepiso W_x y de la altura de entrepiso h_x/k donde k es un exponente relacionado con el periodo de la estructura.

$$F_x = C_{vx} V \quad (3)$$

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad (4)$$

Resultados de las cargas laterales equivalentes para la estructura con la base rígida

De acuerdo al ASCE 07-10, los desplazamientos debidos a las cargas laterales aplicadas deben ser revisados en términos de distorsiones de entrepiso. Se utilizó el software ETABS para obtener los desplazamientos elásticos en el centro de masas de cada entrepiso para un modelo tridimensional. A partir de esos resultados, las deflexiones de entrepiso se calcu-

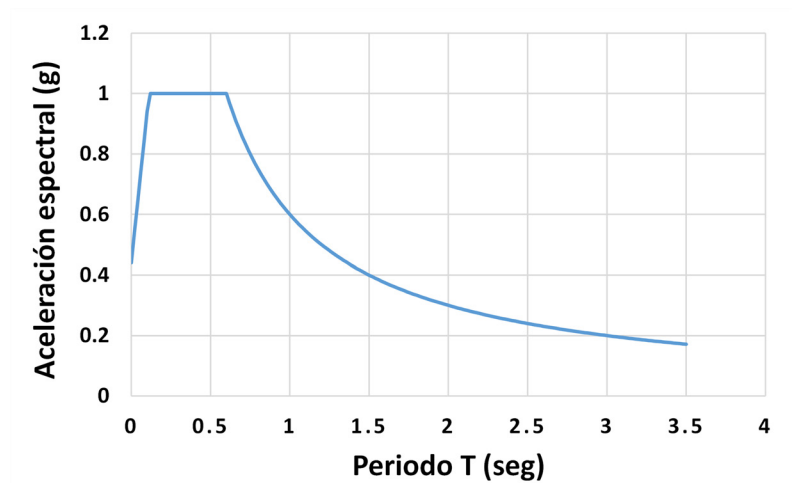


Figura 5. Espectro de diseño de acuerdo al ASCE 07-10.

laron según los requerimientos de la sección 12.8.6 del ASCE 07-10.

Las distorsiones δ_x que se calcularon siguiendo los lineamientos anteriormente mencionados son las siguientes:

Tabla 2 Distribución de cargas laterales equivalentes por nivel.

Nivel	Wi (kN)	hi (m)	Wi hi	Cvx	Fx (kN)	Vx (kN)
8	1454.24	28.8	169771.71	0.2	200.522	200.522
7	1955.5	25.2	188948.2	0.22	223.172	423.695
6	1978.72	21.6	153687.54	0.18	181.525	605.22
5	1987.84	18	119254.56	0.14	140.855	746.075
4	2010.55	14.4	87929.74	0.1	103.856	849.931
3	2019.67	10.8	58765.86	0.07	69.41	919.342
2	3401.66	7.2	55731.72	0.07	65.826	985.168
1	3101.09	3.6	19033.44	0.02	22.481	1007.649

$\Sigma =$ 17909.28 853122.76

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{I_e} \quad (5)$$

$$\delta_{xe} = \delta_{x2} - \delta_{x1} \quad (6)$$

donde

5.5 C_d = Factor de amplificación de la deflexión =

δ_{xe} = Deflexión por análisis elástico en cada entrepiso

I_e = Factor de importancia = 1.25

La distorsión de entrepiso se calcula a partir de los desplazamientos obtenidos de un análisis elástico y se compara con la distorsión máxima admisible de entrepiso dada en la sección 12.8.6 del ASCE 07-10, la cual en este caso es:

$$\Delta_a = 0.020 h_{sx} = 72.00 \text{ mm} \quad (7)$$

donde

Δ_a = Distorsión máxima admisible de entrepiso

h_{sx} = Altura de entrepiso

Los resultados de distorsiones de entrepisos se muestran en la figura 6 (línea azul). En esa misma gráfica se compara con el límite admisible (línea naranja), lo que indica que podría proponerse una estructura un poco más flexible.

Como parte del procedimiento de diseño convencional para el caso de la estructura rígida, también se verificó que se cumpla con los requerimientos de columna fuerte-viga débil, siendo este concepto junto con el control de desplazamientos los que rigen las dimensiones de los elementos estructurales y no la demanda por resistencia. De acuerdo con estos resultados, no fue necesario tomar en cuenta los efectos P- Δ .

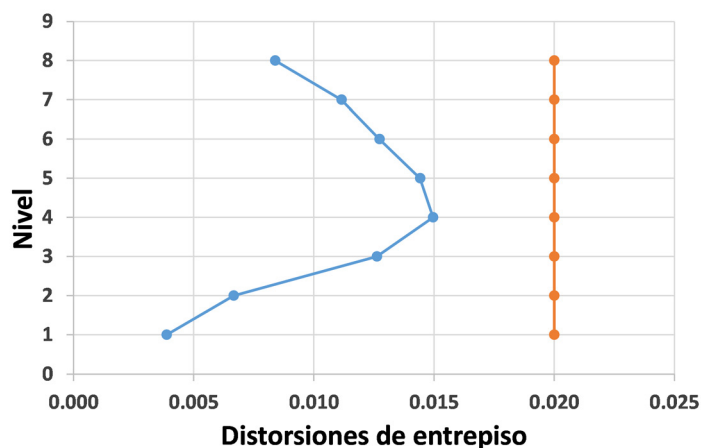


Figura 6. Perfil de distorsiones de entrepiso para estructura sin aisladores.

ANÁLISIS NO LINEAL PARA LA ESTRUCTURA SIN LOS DISPOSITIVOS AISLADORES

Para el análisis no lineal del concreto reforzado y del acero, se utilizó un modelo histerético bilineal con articulaciones plásticas considerado dentro de las opciones a elegir en el software ETABS (CSI Analysis Reference Manual, 2016).

Se efectuaron dos tipos de análisis no lineal para estudiar la respuesta del caso sin aisladores de base. Primero se realizó un análisis no lineal estático para identificar cualquier zona débil de la estructura que pudiera desarrollar articulaciones plásticas. El segundo procedimiento, un análisis de la historia en el tiempo para un conjunto de cinco registros escalados con el método de Somerville (2003), a nivel de sismo de diseño y de sismo máximo considerado. Ambos

análisis se llevaron a cabo con el software comercial ETABS. Los registros utilizados y sus factores de escala se muestran en la tabla 3, mientras que en la figura 7 se ilustra el espectro de diseño y los espectros de respuesta para sismo de diseño.

Se seleccionó el programa de cómputo ETABS ya que es considerado uno de los mejores programas de cálculo estructural de edificios existente. Existen muchos trabajos que lo usan y otros buscando explicar y validar sus resultados y de otros programas de diseño estructural [CSI (2016), Mrugesh y Sumant (2011), Saravia (2013)]; sin embargo, estos programas están basados en teorías y métodos numéricos con suposiciones y aproximaciones que requieren a juicio de los autores validarse para aplicar adecuadamente el software.

Tabla 3. Registros utilizados para análisis sísmico no lineal y sus factores de escala (columnas 2 y 3).

Registro (Lugar, Año, Estacion)	Factor de escala del sismo de diseño	Factor de escala del sismo máximo considerado
Loma Prieta, 1989, G03090	1.496	2.244
Loma Prieta, 1989, HSP000	0.947	1.421
Loma Prieta, 1989, CNP196	1.276	1.913
Northridge, 1994, STC180	0.888	1.331
Northridge, 1994, TAR360	1.091	1.637

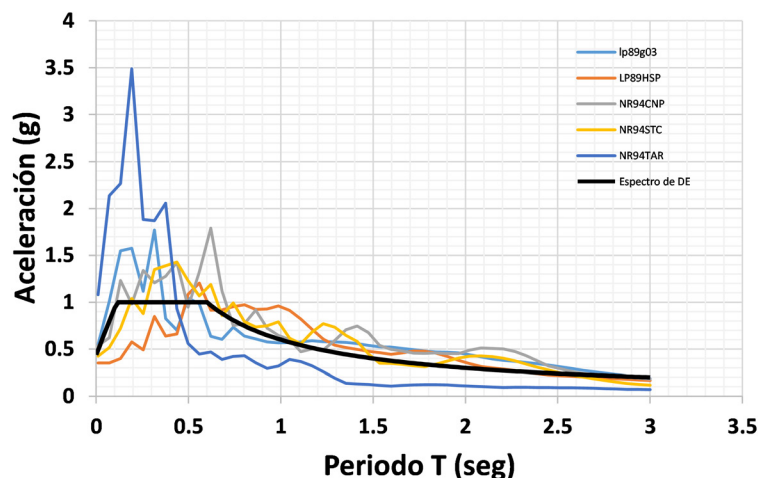


Figura 7. Espectro de Diseño y Espectros de Respuesta.

En el primer método de análisis, el patrón de cargas laterales se definió de acuerdo a la configuración del primer modo de vibración. Los parámetros en el modelo de articulación plástica y su localización se tomaron de acuerdo a lo establecido en el ASCE 41-13. El modelo de una articulación utilizada se muestra en la figura 8.

La primera articulación se desarrolla cuando el porcentaje de distorsión en la azotea es de 1.24% y el cortante en la base de 6,989.22 kN (figura 9, curva de capacidad). De la misma forma, se obtuvieron diferentes escenarios debido al incremento monotoní-

co de la carga aplicada, determinando una capacidad máxima de la estructura de 12,149.96 kN de cortante en la base, lo cual corresponde a una distorsión en la azotea de 4.69%. Todas las articulaciones plásticas fueron desarrolladas en las vigas de acero estructural, ninguna columna de acero mostró comportamiento no lineal. Los elementos de concreto reforzado del primer y segundo nivel se mantuvieron en niveles elásticos. El último paso en este procedimiento de análisis fue establecido cuando apareció la primera articulación plástica y empezó a mostrar degradación de la capacidad.

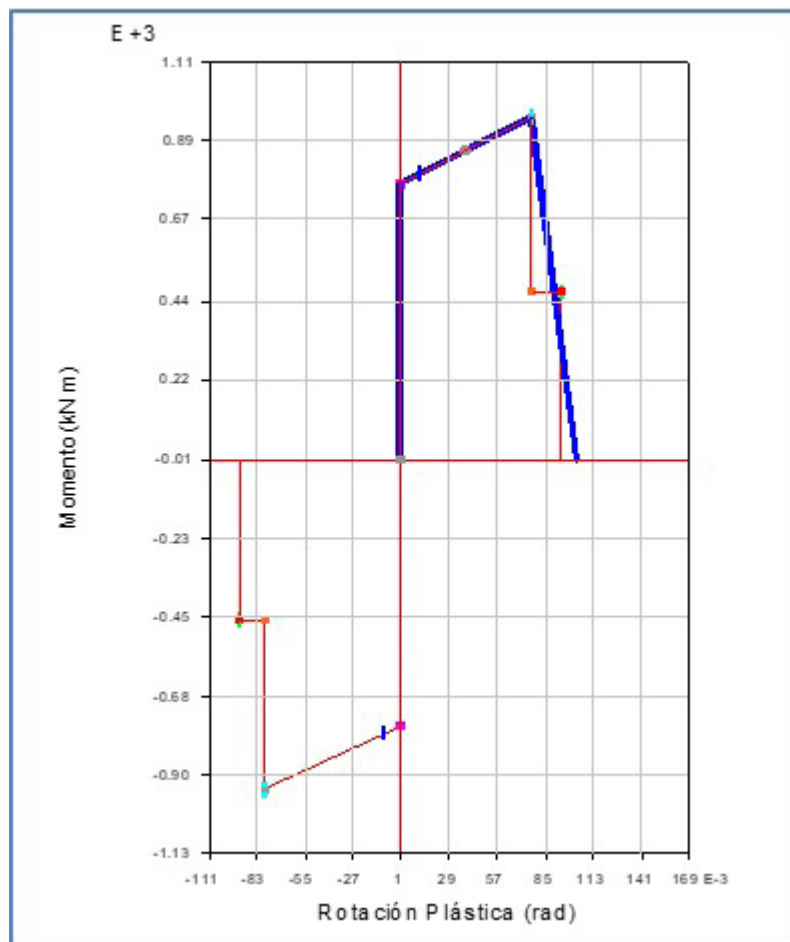


Figura 8. Modelo de articulación plástica.

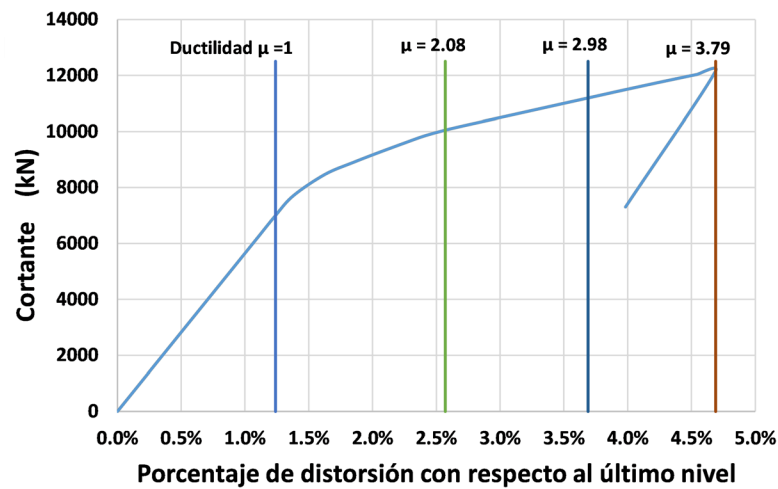


Figura 9. Curva de capacidad del sistema estructural convencional.

Al igual que en análisis previo, se utilizó el mismo software ETABS para llevar a cabo el análisis no lineal de la historia en el tiempo, primero en la estructura rígida. Los resultados de las distorsiones para el edificio tradicional sin aisladores de base se muestran en la figura 10. Estos resultados se ilustran de manera

estadística, donde están consideradas la media, la media más media desviación estándar y la media menos media desviación estándar, tanto para sismo de diseño como para sismo máximo considerado. Se observan demandas de distorsiones medias bastante similares a la distorsión objetivo de diseño.

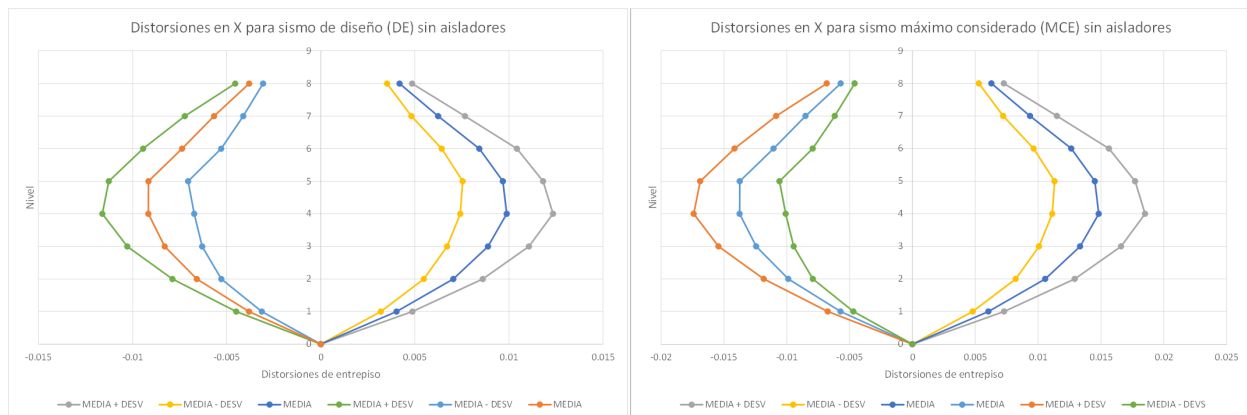


Figura 10. Distorsiones de entrepiso obtenidas del análisis sísmico no lineal para el edificio convencional.

Como parte de los resultados del análisis, la representación para la demanda de cortante está mostrada en la figura 11. Estos resultados se ilustran al igual que en la figura anterior de manera estadística, donde están consideradas la media, la media más media desviación estándar y la media menos media desviación estándar, tanto para sismo de diseño como para sismo máximo considerado. La distribución del cortante de diseño se muestra con una línea punteada. Las mayores demandas de cortante se observan en los resultados a nivel de sismo máximo considerado.

SISTEMA ESTRUCTURAL CON INTERFAZ DE AISLADORES

En este análisis se considera la incorporación de una interfaz de aisladores de base elastoméricos con núcleo de plomo entre la estructura de concreto reforzado y la de acero; es decir, entre el segundo y el tercer nivel. Para la obtención de las propiedades mecánicas de los aisladores se utilizó un modelo histerético bilineal de acuerdo a lo recomendado por Lluhen (2011).

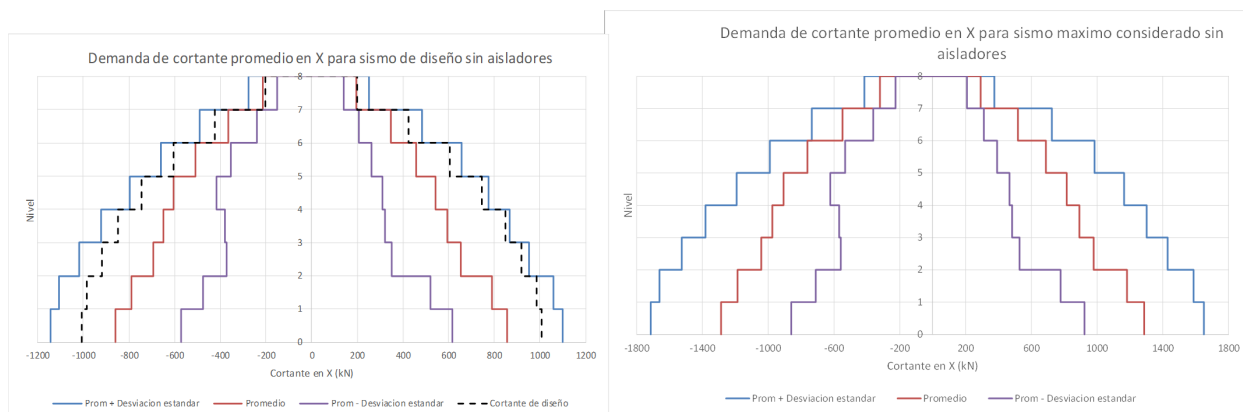


Figura 11. Demandas de cortante de entrepiso obtenidas del análisis sísmico no lineal del edificio tradicional.

Al igual que en los resultados anteriores, los valores de las distorsiones se muestran de manera estadística y se presentan en las gráficas de la figura 12. Las distorsiones de la interfaz de aisladores no se muestran. Los valores más grandes de distorsión se obser-

van para sismo máximo considerado comparados con los obtenidos a nivel de sismo de diseño. Es importante resaltar que todas las distorsiones son menores a las obtenidas en la estructura sin los aisladores de base.

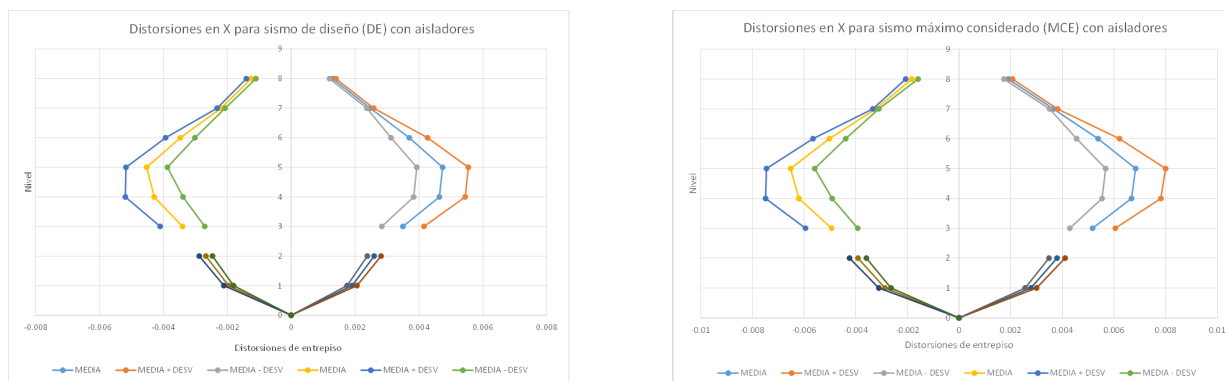


Figura 12. Distorsiones de entrepiso del análisis no lineal de la historia en el tiempo para el edificio con aisladores.

La figura 13 compara de manera estadística las fuerzas cortantes para la estructura sin aisladores de base y con aisladores de base, donde la distribución de la fuerza cortante de diseño se dibuja con línea punteada. Se observa una disminución significativa de demanda de fuerzas cortantes en la estructura con la interfaz de dispositivos aisladores de base con respecto a la estructura convencional.

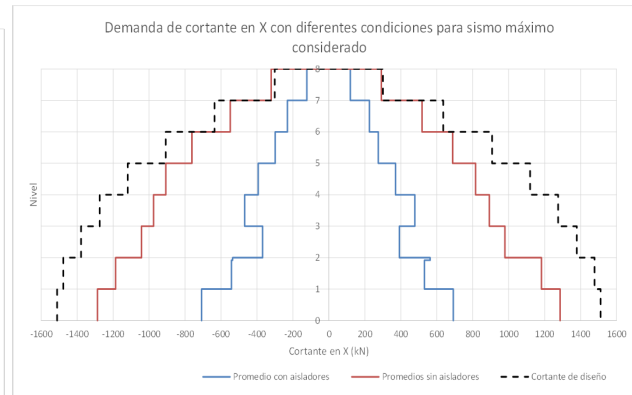
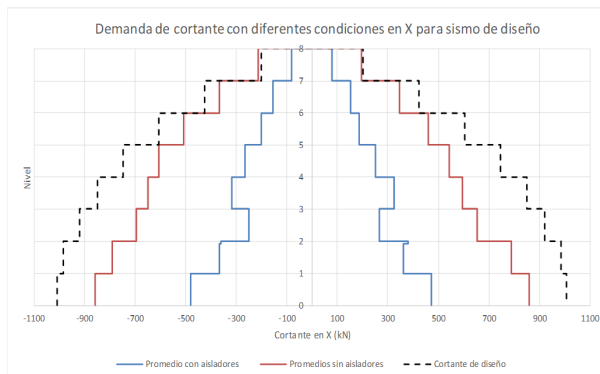


Figura 13. Comparación de la demanda de cortante de entrepiso del sistema tradicional y con aisladores de base.

una notable reducción en la magnitud de los parámetros de demanda sísmica utilizados para la comparación entre ambas condiciones.

Los parámetros para llevar a cabo la comparación de manera congruente del modelo con y sin aisladores fueron las distorsiones y cortante de entrepiso. Con base en los resultados se hacen las siguientes conclusiones y observaciones para los siguientes parámetros:

a) Distorsiones de entrepiso: la reducción fue de 69.08% y 34.20% para sismo de diseño con y sin aisladores, respectivamente, mientras que la reducción fue de 70.19% y 33.89% para sismo máximo considerado con y sin aisladores.

b) Fuerzas cortantes: la reducción fue de 52.10% y 14.88% para sismo de diseño con y sin aisladores, respectivamente, y en el caso del sismo máximo considerado con y sin aisladores la reducción fue de 53.15% y 14.89%.

CONCLUSIONES

Se compara la respuesta sísmica de un edificio convencional y con aisladores de base. El desarrollo del análisis para el modelo que incluye la interfaz de aisladores, se realizó tomando en cuenta las mismas condiciones que para la estructura sin aisladores, siendo la única diferencia en el modelado la inclusión de los dispositivos. Se observa que en la respuesta existe

En general, se concluye que utilizar aisladores de base en edificaciones permite reducir de manera considerable las demandas sísmicas de edificios.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló gracias al apoyo recibido por parte de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño de la Universidad Autónoma de Baja California y del comité tutorial de Maestría del primer autor. Finalmente, se agradece el apoyo económico brindado por la SEP por medio de la convocatoria Fortalecimiento de CAEF al Cuerpo Académico Ingeniería de Estructura (CA-UABC-329), así como la beca por parte de CONACYT para uno de los autores.

REFERENCIAS

ASCE/SEI Standard 7 (2010), "Minimum Design Loads for Building and Other Structures", USA, ASCE.

ASCE/SEI Standard 41 (2013), "Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings", USA, ASCE.

Bazán Enrique, Meli Roberto (2002), "Diseño Sísmico de Edificios", D.F., México, Editorial Limusa.

Computers and Structures Inc. (2016), "Analysis Reference Manual", Berkeley, California USA.

Deringöl, A.H. y Bilgin, H. (2018). "Effects of the isolation parameters on the seismic response of steel frames". Department of Civil Engineering, Gaziantep University, Gaziantep, Turkey.

Eddin, D. y Wassef, M. (2015). "Seismic Base Isolation in Reinforced Concrete Structures". Department of Civil Engineering, Hasan Kalyoncu University, Gaziantep, Turkey.

Flores Aburto Carlos (2017), "Reducción de Solicitaciones Sísmicas mediante el uso de Aisladores de Base Elastoméricos con Núcleo de plomo en una Estructura de 8 Niveles", Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C., México.

González, R. y Aguilar J. (2005). "Dificultades para la implementación de dispositivos de aislamiento sísmico en la base en Latinoamérica", Universidad Autónoma de Chiapas.

Grupo RESNOM (2003), "Procesamiento de Datos y Sismicidad Registrada por RESNOM durante el periodo enero a junio de 2003", GEOS 2003, Vol. 23, No. 1, pp 37-41, UGM México.

Lluhen Ortiz Ernesto (2011), "Evaluación de la Respuesta Estructural de un Edificio Utilizando Dispositivos

de Aislamiento de Base", Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C., México.

Masoud, M., James, B.P., Hajirasouliha, I. y McCrum, D. (2020). "Multi-Directional Base Isolation System for Coupled Horizontal and Vertical Seismic Excitations". Department of Civil and Environmental Engineering, University of Auckland, New Zealand.

Mrugesh D. Shah, Sumant B. Patel (2011), "Nonlinear Static Analysis of R.C.C. Frames (Software Implementation ETABS 9.7)", National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology, May 2011, Nagar, Gujarat, India.

Ojeda J., Lluhen E., Sanchez R., Parra M. (2012), "Response analysis of a 12-story structural steel building with isolated base subjected to ground motion excitation", Proceedings of the 7th International Specialty Conference on Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, University of Chile and University of Naples - Federico II, STESSA 2012. Santiago de Chile.

Sánchez Vergara Ricardo (2007), "Análisis y Diseño No Lineal de Edificio de Tres Niveles con Estructura de Concreto para 12 Aulas", Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C., México.

Saravia Ramírez Luis Estuardo (2013), "Análisis y diseño con ETABS, su aplicación adecuada y comprobación de resultados, aplicado a edificios de concreto armado", Tesis de Maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, Guatemala.

Somerville Paul G. (2003), "Magnitude Scaling of the Near Fault Rupture Directivity Pulse", Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol 137, pp 201-212, Elsevier USA.

SURSUM VERSUS

