



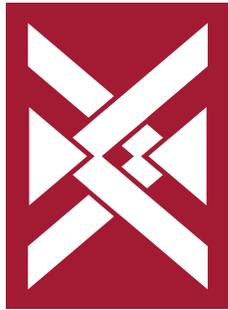
PERSPECTIVAS DE LA CIENCIA Y LA INGENIERÍA



AÑO 3 NUMERO 4



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA



PERSPECTIVAS DE LA CIENCIA Y LA INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

DIRECTORIO

Dra. Margarita Teresa de Jesús García Gasca
Rectora

Dr. Aurelio Domínguez González
Secretario Académico

MAP. José Alejandro Ramírez Reséndiz
Secretario de la Contraloría

MSP. Sergio Pacheco Hernández
Secretario Administrativo

M. en I. Alejandro Jáuregui Sánchez
Secretario de Finanzas

Dra. María Teresa García Besné
Secretaria de Extensión Universitaria

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

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

Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad de Ingeniería

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

Perspectivas de la Ciencia y la Ingeniería

Año 3. No. 4, diciembre de 2019, *Perspectivas de la Ciencia y la Ingeniería* es una publicación semestral editada y publicada por la **Universidad Autónoma de Querétaro, División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería**.
Centro Universitario, Cerro de las Campanas s/n, Col. Las Campanas, C.P. 76010, Tel. (442) 192-12-00, ext. 7035.

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo

No. 04-2017-032412430300-203

ISSN: En trámite

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

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

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

DIRECCIÓN

Dr. Manuel Toledano Ayala

EDITORES RESPONSABLES

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa
MC. Christopher Alexis Cedillo Jiménez
MC. Stephanie Virginia Camacho Gutiérrez

EDITORES ASOCIADOS

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

COMITÉ EDITORIAL

DISEÑO EDITORIAL

Alejandro Zamorano Gómez
Jorge Javier Cruz Florín
COORDINACIÓN DE DISEÑO E IMAGEN
FACULTAD DE INGENIERÍA

PORTADA

Alejandro Martínez Aguilar

CUIDADO DE LA EDICIÓN

Daniela Pérez
Soid Lazlo Ruiz
María Fernanda Hernández
DISEÑO EDITORIAL
FACULTAD DE INGENIERÍA

10. ANÁLISIS FORENSE DE LA TORMENTA DEL 27 DE SEPTIEMBRE DE 2017 EN LA ZONA METROPOLITANA DE QUERÉTARO UTILIZANDO IMÁGENES INFRARROJAS

Forensic analysis of the storm of September 27, 2017 in the metropolitan area of Querétaro using infrared images

JUAN PABLO MOLINA-AGUILAR, M. ALFONSO GUTIÉRREZ-LÓPEZ

28. ANÁLISIS DE UN PUENTE PEATONAL CONFORMADO POR UNA ESTRUCTURA SOPORTANTE EN FORMA DE TRIDITRABE Y ACOPLADA A MÓDULOS PRESFORZADOS TIPO TENSEGRITY

Analysis of a pedestrian bridge formed by a spatial double layer grid supporting structure and coupled to tensegrity prestressed modules

ÁNGEL OTONIEL GONZÁLEZ MARTÍNEZ, JAIME MOISÉS HORTA RANGEL, GUADALUPE MOISÉS ARROYO CONTRERAS, MIGUEL ÁNGEL PÉREZ LARA Y HERNÁNDEZ

52. DISMINUCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA POR MEDIO DE UNA SÍLICE CON POROSIDAD JERÁRQUICA IMPREGNADA CON NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO FÉRRICO

Arsenic decrease in water using a hierarchical porous silica impregnated with iron oxide nanoparticles

VIVIANA PALOS BARBA, RUFINO NAVA

62. EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN ENTRE DOS CONFIGURACIONES VEHICULARES EN UN TRAMO CARRETERO ASCENDENTE

Operational speed evaluation between two vehicle configurations in a positive slope road section

JOSÉ JACOB DURÁN CASILLAS

72. MATERIAL MESOPOROSO CON ARREGLO CÚBICO DE POROS SBA-16 FUNCIONALIZADO CON GRUPOS AMINO PARA LA ADSORCIÓN DE IONES DE CR (VI) DE SOLUCIONES ACUOSAS

SBA-16 cage-like mesoporous material functionalized by amino groups as an adsorbent for Cr (VI) ions removal from aqueous solution

IRERI SEGURA, RUFINO NAVA

80. EL ENDURECIMIENTO ANISOTRÓPICO EN LA SUPERFICIE DE FLUENCIA DE MODELOS CONSTITUTIVOS PARA SUELOS NO SATURADOS

Anisotropic hardening in the yield surface on constitutive models for unsaturated soils

EDUARDO DANIEL PÉREZ GARCÍA, EDUARDO ROJAS GONZÁLEZ

94. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE GOX INMOVILIZADA CON FCME2-LPEI PARA SU USO POTENCIAL APLICACIÓN EN UN BIOSENSOR DE GLUCOSA TIPO PARCHÉ

Behavior analysis of GOx immobilized with FcMe₂-LPEI for potential application in a glucose patch biosensor

DULCE VICTORIA ESTRADA OSORIO, RICARDO ESCALONA VILLALPANDO, JANET LEDESMA GARCÍA

ANÁLISIS FORENSE DE LA TORMENTA DEL 27 DE SEPTIEMBRE DE 2017 EN LA ZONA METROPOLITANA DE QUERÉTARO UTILIZANDO IMÁGENES INFRARROJAS

Forensic analysis of the storm of September 27, 2017
in the metropolitan area of Querétaro using infrared images

Juan Pablo Molina Aguilar^{1*}, M. Alfonso Gutiérrez López¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro

*Autor de correspondencia
valnaha@hotmail.com

RESUMEN

En los últimos años la sociedad queretana ha sido afectada de manera recurrente durante la temporada de lluvia debido a fenómenos hidrometeorológicos extremos. El presente trabajo analiza lo acontecido en el territorio estatal por la tormenta del 27 de septiembre del 2017 que dio origen a afectaciones importantes. La lectura del nivel digital en píxeles referenciados con la posición geográfica de las estaciones meteorológicas automáticas en imágenes infrarrojas permitió pronosticar la intensidad de lluvia por medio de la técnica Hidroestimador y de mapas de la evolución mediante la técnica de Kriging. Como resultado se determinó la precipitación en zonas sin instrumentación y se observó que la tormenta mostró un desarrollo espacial uniforme, mientras que en su evolución temporal se distinguen dos etapas claras de intensificación de lluvia en la zona metropolitana, así como en el centro y noreste del territorio estatal. Con base en el análisis de las lluvias determinadas mediante el Hidroestimador y la lectura de imágenes infrarrojas, se concluye que las precipitaciones antecedentes disminuyeron la capacidad de infiltración por la saturación del terreno y se incrementaron los coeficientes de escurrimiento aumentando significativamente los volúmenes de agua producto del escurrimiento superficial en las zonas de incidencia de la tormenta y colapsando la red hidrológica y el sistema de drenaje pluvial.

Palabras clave: Hidroestimador, percepción remota, tormenta, pronóstico, escurrimiento superficial

ABSTRACT

In recent years the queretana society has been affected repeatedly during the rainy season due to the presence of extreme hydrometeorological phenomena. The present work analyzes what happened in the state territory due to the storm of September 27,

2017 that gave rise to important affectations. The reading of the digital level in pixels referenced with the geographical position of the automatic meteorological stations in infrared images allowed us to forecast the intensity of rainfall using the Hydrostatimator technique, elaborating evolution maps using the Kriging technique. As a result, precipitation was determined in areas without instrumentation and it was observed that the storm presented a uniform spatial development, while in its temporal evolution there are two clear stages of rainfall intensification, in the metropolitan area as well as in the center and northeast of the state territory. It is concluded based on the analysis of the rainfall determined by the Hydroestimador based on the reading of infrared images that the previous rainfall decreased the infiltration capacity due to the saturation of the soil, the runoff coefficients were increased, significantly increasing the water volumes produced by the surface runoff in the areas affected by the storm, collapsing the hydrological network and the storm drainage system.

Keywords: Hydroestimador, remote sensing, storm, forecasting, surface runoff.

INTRODUCCIÓN

Los vientos de gran intensidad sobre la superficie terrestre representan una característica importante de las tormentas severas y las precipitaciones torrenciales, que muestran intensa actividad eléctrica y granizo [1]. Por las inundaciones asociadas a lo anterior, se derivan afectaciones a mediano y largo plazo particularmente, las cuales son causantes de pérdidas materiales, daños a infraestructura, decesos en la población y la aparición de enfermedades vinculadas con el estancamiento del agua.

La importancia de dichos daños se cuantifica en el porcentaje del PIB del país, que representan un mayor impacto para países en vías de desarrollo o bien para las zonas urbanas con tendencia creciente de concen-



tración poblacional [2]. Esto último se observa en el estado de Querétaro, México, y en particular en su zona metropolitana (ZMQ).

Estas tormentas severas son producto del choque de masas de aire, que presentan un gradiente importante de temperatura que llega a causar inestabilidad ambiental y a caracterizarse por una circulación del aire con vientos del orden de 23 m/s a 26 m/s [3]. Al respecto, los meses de junio a octubre comprenden el periodo de mayor intensidad para México por la época de ciclones tropicales tanto en el Océano Pacífico como en el Atlántico [4]. A lo anterior se suma la incidencia del cambio climático derivada de causas naturales o antrópicas que inciden en el calentamiento global, detonan en manifestaciones atmosféricas extremas [5] y causan preocupación y alarma por sus características y consecuencias.

El riesgo de éstas está en función de los contextos físico, social y económico en conjunto con el grado de exposición a la amenaza, lo que potencializa la vulnerabilidad de la sociedad, los recursos ambientales, la infraestructura, los servicios básicos y de salud [6]. Por ello la construcción de instrumentos como matrices de daño, índices de vulnerabilidad, funciones y curvas de pérdida asociados al régimen pluviométrico (magnitud y frecuencia de la precipitación) permiten una adecuada estimación de los escenarios para revisar pérdidas potenciales [7].

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) refiere que las secuelas crecen en sectores de población con carentes condiciones sociales y económicas que son características de distintas regiones en el país [2]. Ante dichos escenarios la información meteorológica es trascendental para analizar el tiempo presente y elaborar pronósticos hidrometeorológicos con el fin de establecer alertas y acciones de mitigación, trabajos en construcción, operación de puertos marítimos y aeropuertos [8] [9], así como para determinar políticas de operación en presas de almacenamiento e implementar acciones de protección civil.

Los recientes avances tecnológicos han permitido la construcción de satélites geoespaciales ambientales y estaciones meteorológicas automáticas (EMA), instrumentados con sensores para la medición de variables en escala temporal y espacial durante la formación, evolución y disipación de los fenómenos naturales, recolectando gran cantidad de información de todas las latitudes en grandes centros mundiales donde se decodifica, gráfica y publica [10].

Las aplicaciones meteorológicas de estos sensores no sólo sirven para observar las nubes, captar radiaciones no visibles provenientes de la tierra y su atmósfera al detectar la presencia y movimiento de fenómenos climatológicos, frentes fríos, ciclones tropicales, ondas tropicales y zonas de convergencia causantes de tormentas severas, sino auxilian adicionalmente en la estimación de su impacto y daños [11].

Hoy día los satélites meteorológicos son herramientas fundamentales para el pronóstico atmosférico y estudios meteorológicos, cuya mayor ventaja es el uso de la teledetección en la cobertura espacio-temporal, la cual no se consigue con las redes pluviométricas instaladas actualmente [12].

La teledetección tiene su origen en la representación de la energía electromagnética acorde con la física de la teoría ondulatoria, la cual observa y mide propiedades sin contacto físico directo en objetos, áreas o fenómenos. La información captada por medio de los sensores describe cambios en el entorno respecto del campo electromagnético emitido o reflejado según la longitud o frecuencia de ondas llamadas bandas espectrales (rayos X, luz visible, infrarrojo o microondas) del espectro electromagnético [13].

Los componentes de un sistema de teledetección de superficie terrestre son la fuente de radiación, la interacción con la superficie, la atmósfera y los receptores generándose radiación incidente, radiación reflejada y radiación emitida [14]. Los conceptos más importantes son la imagen captada que recibe el nombre de imagen satelital digital (ISD) y

el método de obtención. Los sensores están integrados por detectores pequeños que captan el espectro de radiación reflejada por la superficie terrestre y transforman las lecturas en valor digital para formar una matriz en escala de grises o colores, que representan una imagen similar a una fotografía [15].

Las imágenes infrarrojas (IR) permiten definir la forma, estructura y características de los sistemas convectivos [16], frentes fríos y zonas de convergencia al utilizar el reflejo de umbrales de temperatura aun cuando las nubes altas no están muy bien relacionadas con el desarrollo físico de la tormenta y la lluvia asociada a la temperatura captada [17]. Su estructura irregular y caótica de rápida evolución se deriva de gradientes térmicos anormales aunado con núcleos de variación barométrica [18].

Algunos estudios espacio-temporal han sido desarrollados para la ZMQ empleando el análisis de frecuencias y la técnica de kriging [19], la cual ha mostrado la posibilidad de interpretar información proveniente de imágenes satelitales empleando variogramas direccionales y determinando los patrones de lluvia de la región. De manera particular la distribución espacial de tormentas en el estado de Querétaro, utilizando información registrada en pluviómetros contrastada con el pronóstico de la técnica Hidroestimador (HE) basada en la temperatura tope de nubes a partir de valores de nivel digital, mostró diferencias en los registros, lo anterior obedece a que no precipita toda la nubosidad observada en la imagen y existe una disminución de lluvia por evaporación producto de su fricción con la atmósfera sin ser registrada en superficie [20].

El presente trabajo tiene por objetivo analizar el desarrollo temporal y espacial de la tormenta causante de importantes afectaciones en la ZMQ y el territorio estatal, registrada el 27 de septiembre del 2017, utilizando el HE para el pronóstico de intensidad de lluvia, en la posición geográfica de las EMA de la Red del Centro de Investigaciones del Agua-Querétaro (RED CIAQ), imágenes IR y

el método geoestadístico Kriging para identificar su origen y evolución.

METODOLOGÍA

Antecedentes

En el recuento de daños a causa de la tormenta sucedida durante la noche del martes 26 y la madrugada del miércoles 27 de septiembre del 2017 se puso en evidencia las afectaciones en gran parte del territorio del estado de Querétaro. Santiago de Querétaro, San Juan del Río, El Marqués y Corregidora fueron los municipios con mayor afectación.

A consecuencia de esta tormenta y la inundación resultante, se mostró un deceso en el Parque Industrial Benito Juárez y la movilización a distintos albergues de 200 personas en la capital del estado, 350 en Corregidora y 198 en San Juan del Río, debido a los desbordamientos, así como por la aparición de 2 socavones sobre Paseo de la República.

Se generaron inundaciones y encharcamientos en al menos 50 colonias de la ZMQ. Entre las más afectadas están el Centro Histórico, Santa María Magdalena, El Tintero, Carrillo, Jurica Pueblo, Jurica Campestre, Santa Rosa Jáuregui, Bosques del Cimatario, Obrera, Satélite, Pie de la Cuesta, Parque Industrial Benito Juárez, San Francisquito y Plaza de las Américas (Figura 1).

También distintas vialidades se vieron afectadas como el libramiento Sur Poniente a la altura del puente de Tec Milenio y la incorporación a Vista Real, la lateral de Constituyentes de Plaza Constituyentes al puente Santa Bárbara, la lateral de Bernardo Quintana frente al Parque Querétaro 2000, la avenida 5 de Febrero desde avenida Universidad hasta Jurica, en el sentido a San Luis Potosí. Además de la avenida Zaragoza desde Allende hasta Corregidora, las cuales sufrieron inundaciones en el transcurso de la lluvia y una vez que ésta cesó (Figura 1).



Figura 1. Zonas inundadas (azul) y vialidades afectadas (rojo) durante la tormenta del 27 de septiembre del 2017

La cantidad de volumen precipitado ocasionó también el desbordamiento de los drenes Jurica, El Arenal y Tlacote los cuales llegaron al límite de su capacidad ocasionando tirantes de agua de hasta 1 m de altura.

Materiales

Imágenes satelitales

Las imágenes digitales, comúnmente llamadas imágenes satelitales, obtenidas por teledetección están conformadas de píxeles asociándose cada uno de ellos con un número llamado nivel digital (DN) o valor de brillo (VB) que se localizan en la intersección de cada fila i y cada columna j en las K bandas de la ISD [21]. Desde el enfoque computacional las imágenes son matrices de valores digitales de tipo byte, por ello la rasterización de la misma se caracteriza por contar con un número acotado de filas y columnas generando un número total de píxeles producto de ambos [14].

Las imágenes monocromáticas fijas son una función bidimensional de coordenadas espaciales (x, y) que representa la luminancia (z) de la ISD en el punto de coordenadas $f(x, y)$. Las variables x, y, z son valores numéricos reales, z es univaluada positiva

normalizada entre los valores 0 a 1 que corresponden a los colores negro y blanco respectivamente, siendo entonces que z representa un valor en la escala de grises [14].

Al interpretarse imágenes satelitales se dio inicio a un proceso de análisis manual de los fenómenos atmosféricos sujetos a una evaluación subjetiva, no obstante, la interpretación ha evolucionado con el uso de equipo de cómputo, generándose distintas técnicas para el análisis de imágenes satelitales digitales [22].

Las imágenes satelitales utilizadas en el estudio son proporcionadas por el área de Percepción Remota del Sistema Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), las cuales carecen de tratamiento, tienen formato raw con compresión BZ2 de extensión PCX (Figura 2), la nomenclatura asignada para su control utiliza la fecha y hora de captura con el formato año mes día hora minuto.pcx [19].

Dichas imágenes son generadas por la suite Yosemite de la compañía Marta utilizando la proyección WGS84 con origen en la posición de coordenadas 0°N , -75°W y altura aproximada de 36,000 km que corresponden a los parámetros orbitales del satélite GOES-13. La proyección con dichas características se denomina "Marta Software Projection".

Las imágenes dan cobertura al territorio nacional con resolución temporal de 15 minutos, referenciadas con las coordenadas 36.4768°N , $-122.2590^{\circ}\text{W}$ en la esquina superior izquierda y 14.1118°N , -79.0817°W en la esquina inferior derecha, con resolución de 8 bits y valores de brillo que van de 0 a 255 de acuerdo con su nivel digital, delimitadas por 1280 píxeles de longitud y 817 píxeles de latitud de tamaño 2.36 km por lado [20].

Para realizar el estudio de la tormenta del 27 de septiembre que afectó el estado de Querétaro, se seleccionaron 57 imágenes satelitales con resolución temporal de 15 min que corresponden al periodo de las 2:15 a.m. (201709270215.pcx) y hasta las 06:15 p.m.

(201709271815.pcx) de dicho día. Al revisar la información de 24 h previas a la misma no se cuenta con información del satélite que muestre precipitación, por lo que el periodo de análisis corresponde a 16 h.

Red CIAQ

En el estado de Querétaro y la ZMQ, el CIAQ opera y mantiene EMA, como actividad sustantiva atiende requerimientos tecnológicos del sector agua en el país. De la misma manera, forma parte actualmente de la Red de Caracterización de Riesgos Hidrometeorológicos, Fluviales y Costeros.

La red CIAQ empezó a operar a partir del mes de junio del 2012. Actualmente cuenta con 34 EMA (Tabla 1), las cuales realizan el monitoreo en tiempo real del territorio Queretano, permitiendo acceso a la información registrada a los sectores académico,

productivo, gubernamental y a la sociedad en general a través de la página web <https://hidroinformatica.uaq.mx> y respalda una aplicación de alerta para fines de protección a la ciudadanía.

Derivado de la importancia en las actividades académicas, económicas y sociales en el estado de Querétaro se ha incrementado el monitoreo en la ZMQ conformada por los municipios de Santiago de Querétaro, Corregidora, Juriquilla y El Marqués, sin dejar de lado regiones trascendentales y en búsqueda de incrementar la cobertura del estado.

La posición geográfica de las EMA en la red CIAQ (Figura 3) permite establecer la relación con los pixeles de las imágenes IR utilizadas en el presente estudio, permitiendo la lectura del nivel digital a partir de la cual se puede pronosticar la intensidad de precipitación con el HE.

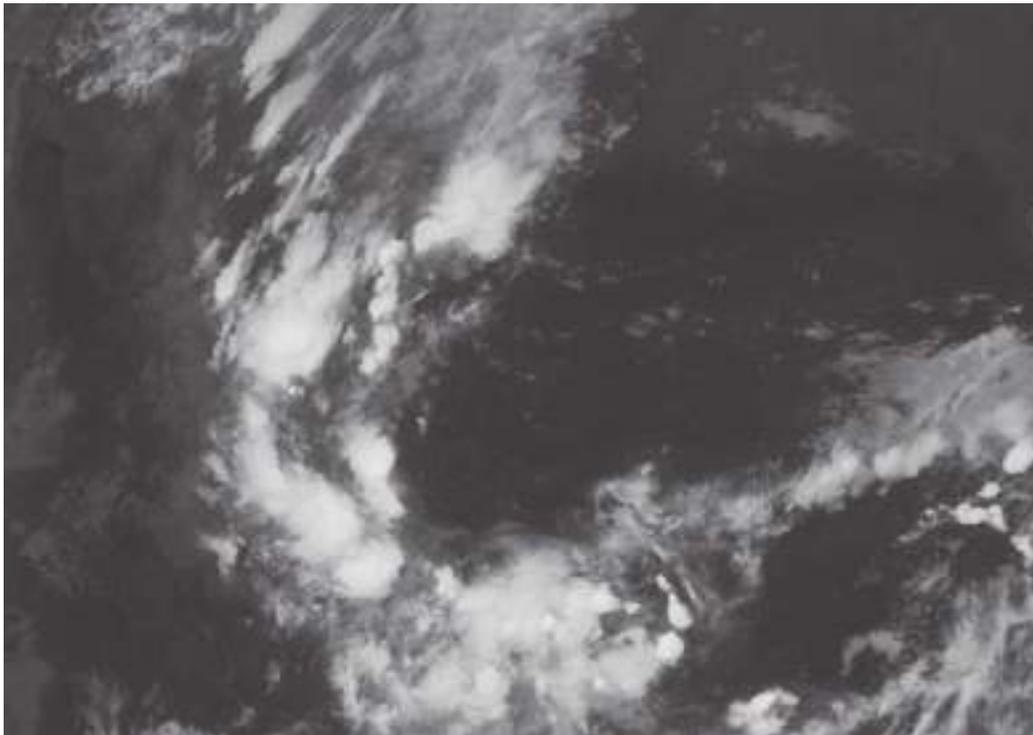


Figura 2. Imagen 201709270215.pcx de la tormenta del 27 de septiembre del 2017 sobre la ZMQ.



Tabla 1. Posición geográfica de EMAS de la Red CIAQ ubicadas en la ZMQ y el estado de Querétaro.

Estación	Nombre	Longitud ° W	Latitud ° N	Estación	Nombre	Longitud ° W	Latitud ° N
1	Chulavista	-100.470	20.631	18	Ezequiel Montes	-99.901	20.673
2	Belén	-100.408	20.653	19	Huimilpan	-100.273	20.374
3	Real del Parque	-100.404	20.611	20	Landa de Matamoros	-99.320	21.183
4	Candiles	-100.401	20.547	21	Pedro Escobedo	-100.139	20.501
5	Cimatario	-100.376	20.559	22	San Joaquín	-100.008	20.383
6	Centro Histórico	-100.388	20.594	23	San Juan del Río	-99.973	20.389
7	Milenio III	-100.346	20.595	24	Tequisquiapan	-99.915	20.611
8	San Gil	-100.444	20.701	25	Tolimán	-99.931	20.904
9	El refugio	-100.352	20.654	26	Viñedos	-100.489	20.608
10	COTAS Amazcala	-100.338	20.710	27	El esparrago	-100.008	20.383
11	Cerro de las Campanas	-100.412	20.590	28	Santa Rosa Jáuregui	-100.447	20.742
12	Amealco de Bonfil	-100.144	20.186	29	Unión de Ejidos Graciano Sánchez	-100.235	20.652
13	Pinal de Amoles	-99.628	21.135	30	Joaquín Herrera	-99.566	20.916
14	Arroyo seco	-99.688	21.547	31	Juriquilla	-100.453	20.722
15	Cadereyta de Montes	-99.812	20.701	32	UAQ Aeropuerto	-100.371	20.625
16	Colón	-100.052	20.782	33	Pasteur y 57	-100.383	20.578
17	Corregidora	-100.432	20.547	34	CICATA QRO IPN	-100.371	20.574

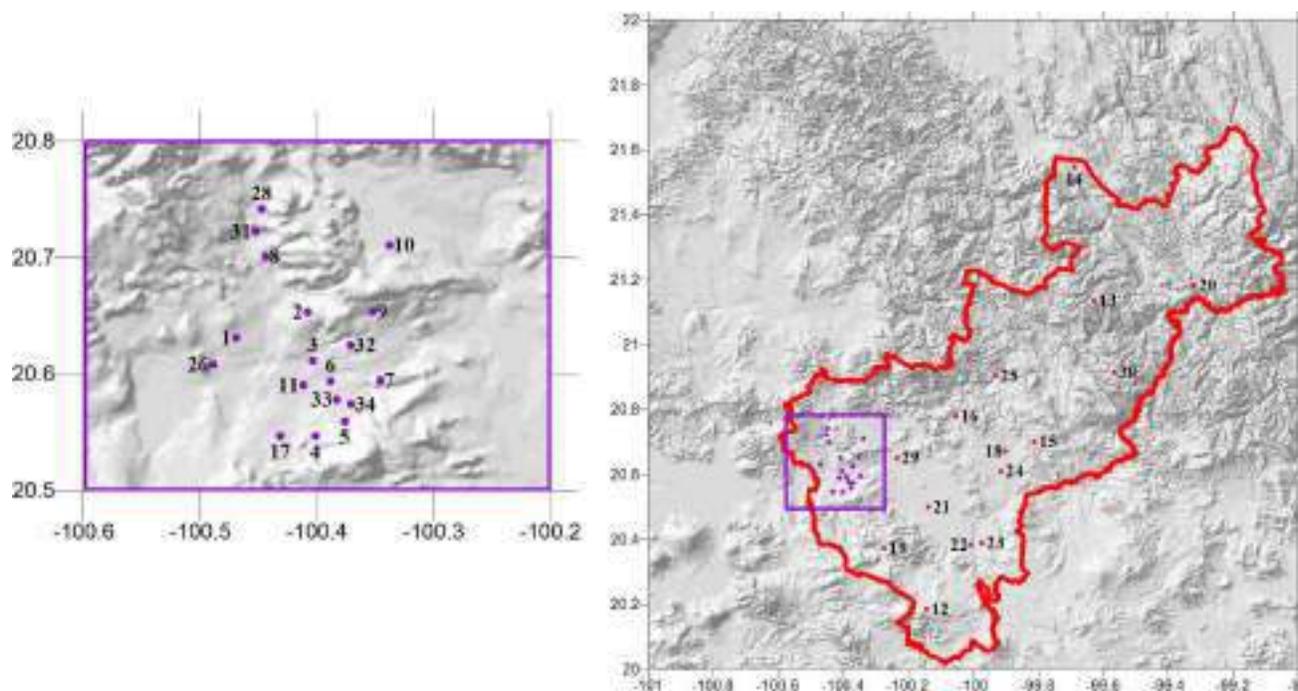


Figura 3. Posición geográfica de las EMA operando de la red CIAQ en la zona metropolitana (Morado) y el estado de Querétaro.

Método

Hidroestimador

La estimación de la intensidad de precipitación se realizó empleando la técnica Auto Estimador también denominada HE, basada en una ley de regresión que requiere correcciones para un mejor ajuste utilizando la humedad, el crecimiento y gradiente de temperatura de las nubes [23], la cual determina la razón de lluvia (R) en mm/h a partir de la temperatura tope de nube (T) en K , como función del brillo de pixel (B) en nivel digital.

$$R = 1.1183 * 10^{11} e^{-0.036382T^{1.2}} \quad (1)$$

$$T = \begin{cases} 418 - B & \text{para } B > 176 \\ 330 - \frac{B}{2} & \text{para } B \leq 176 \end{cases} \quad (2)$$

2.3.2 Escala de nivel digital

Para observar la evolución temporal y espacial de la tormenta se estableció una escala de valores de nivel digital que ayudó a definir 7 zonas de intensidad de precipitación, que van desde 0.00 mm/h hasta valores mayores de 711.81 mm/h al emplear las Ecuaciones 1 y 2. Lo anterior se detalla en la Tabla 2.

Automatización en lenguaje R

La sistematización de la lectura de información para la tormenta se realizó mediante dos códigos desarrollados en lenguaje R . El primero "pcx_to_jpg.sh" extrae las imágenes satelitales con formato pcx de su encriptado original para posteriormente cambiarla a formato jpg. El segundo "Get_info.R" lee la ISD como una matriz de pixeles, en la que se asocian las coordenadas geográficas de las EMA de la red CIAQ (Tabla 1) por medio de la corrección por curvatura y origen de toma del sensor para leer el valor de nivel digital correspondiente.

Posteriormente se calcula para cada uno de los pixeles la temperatura tope de nube (T) y con ello se determina la intensidad pronosticada (R) con el HE, guardándolos en archivos de registros cuya estructura matricial contempla n filas asociadas a la cantidad de imágenes satelitales que dan cobertura al fenómeno meteorológico y p columnas que son los pixeles acorde con las EMA de estudio (Figura 4).



Figura 4. Diagrama de flujo para la lectura de imágenes satelitales correspondiente a un fenómeno hidrometeorológico registrado en territorio nacional.

Tabla 2. Escala de nivel digital propuesta para la interpretación de las imágenes satelitales

Zona geométrica	Z6	Z5	Z4	Z3	Z2	Z1	Z0
Brillo (ND)	(100,125)	(126,150)	(151,175)	(176,200)	(201,225)	(226,235)	(236,255)
Intensidad (mm/h)	(0.00,0.01)	(0.01,0.07)	(0.08,0.36)	(0.39,8.65)	(9.83,205.12)	(232.44,711.81)	> 711.81



Una vez realizado el total de la lectura de los archivos de registro se generan con formato de datos separados por coma (csv), que ayudan a utilizar la información en Excel de manera que facilita el análisis cualitativo y cuantitativo. Esto permitió incorporar a este análisis herramientas geoestadísticas mediante el programa Surfer, lo cual dio los elementos necesarios para establecer el patrón de la tormenta y conocer espacialmente los antecedentes que dieron pie al comportamiento hidrológico en la ZMQ.

Método de Kriging

Kriging es un estimador insesgado de funciones lineales aleatorias de una región tomando la variabilidad espacial mediante la covarianza o el semivariograma de observaciones $Z(k)$, optimizando la variancia estimada [24] así como los valores puntuales y proporcionando una medida precisa de dichos valores. Esto permite diseñar mallas de medición [25]. Dichas mallas son denominadas retículas geoestadísticas que son aplicables a múltiples campos de conocimiento por su capacidad de generar mapas de tendencias en la información a partir de datos espaciales irregularmente, se caracterizan por su flexibilidad, precisión y adaptación a datos empleando la anisotropía y las tendencias subyacentes [26].

Es una metodología de medias ponderadas con asignación de pesos en la posición de $Z(k)$ que minimiza la variancia de la estimación calculada como función del variograma y las distancias relativas entre posiciones de observación, obteniéndose una estimación lineal no sesgada óptima [27]. Esta se fundamenta en describir mediante superficies estocásticas la variación espacial irregular de la variable ante la imposibilidad de modelarla matemáticamente por medio de funciones, para ello se deben identificar la tendencia o valor medio $m(k)$ llamada componente estructural, ε' que representa la componente aleatoria y el ruido ε'' que considera el error residual Gaussiano de media cero.

$$Z(k) = m(k) + \varepsilon'(k) + \varepsilon'' \quad (3)$$

La función que define $m(k)$ es el valor medio, de tal forma que la diferencia esperada de dos posiciones separadas por el vector de distancia h se define como:

$$E[Z(k) - Z(k + h)] \quad (4)$$

Así la variancia se limita únicamente a la distancia

$$E\{[Z(k) - Z(k + h)]^2\} = E\{[\varepsilon'(k) - \varepsilon'(k + h)]^2\} = 2\gamma(h) \quad (5)$$

En la Ecuación 5, $\gamma(h)$ representa la semivarianza obtenida mediante la construcción isotrópica o anisotropía del semivariograma de las posiciones muestreadas. Para ello se identifica la cantidad de combinaciones n con posiciones i y j separadas una distancia h , el primer tipo de semivariograma sería independiente de la dirección no así el segundo tipo.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum \{Z(i) - Z(j)\}^2 \quad (6)$$

La semivarianza presenta crecimiento en su valor al incrementarse la distancia hasta alcanzar una tendencia constante. Este comportamiento es representado por una curva que sigue una función comúnmente de tipo esférico, exponencial, gaussiano o lineal. Su representación gráfica tiene tres elementos el primero refiere a que puede iniciar en cero o en un valor denominado efecto nugget, el segundo es la tendencia que establece el valor máximo para grandes distancias y el tercero define la distancia a la cual se mantiene el valor máximo denominado umbral de autocorrección.

Para desarrollar la interpolación utilizando kriging se consideran las combinaciones ponderadas de las n posiciones muestradas, donde la suma de los pesos w_i es la unidad.

$$Z^* = \sum_{i=1}^n w_i Z_i \quad (7)$$

Su determinación involucra las covarianzas espaciales entre las posiciones muestreadas i, j (C_{ij}) y la posición i respecto del sitio de interés θ ($C_{i\theta}$) que son medidas de correlación espacial evaluadas mediante la función definida por el variograma para la distancia indicada, además de la varianza del error por medio del multiplicador de Lagrange (λ), a partir del sistema

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} & 1 \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{10} \\ d_{20} \\ \vdots \\ d_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$C * W = D \quad (9)$$

Dado que se requiere la repetición de la interpolación para m sitios de interés se pre-multiplica la Ecuación 9 por la matriz inversa de C .

$$C^{-1} * C * W = C^{-1} * D \quad (10)$$

$$W = C^{-1} * D \quad (11)$$

Su principal ventaja es de tipo estocástico por el hecho de determinar para cada estimación la varianza esperada del error.

$$\gamma^* = \mu + \sum_{i=1}^n w_i \gamma_i \quad (12)$$

De acuerdo con la modelación de la componente estructural $m(k)$ existen variantes. Para el Kriging simple se adopta el valor cero, en el Kriging ordinario no se conoce y requiere un atributo adicional para filtrar el valor medio en el sistema de ecuaciones. Por su parte en el Kriging de factor externo se implementa una función externa para definirla [27].

La implementación de la interpolación espacial se realizó con el software Surfer 8.0 a partir de la base de datos generada con las intensidades pronosticadas en el pixel que corresponde a la posición geográfica de las EMA mediante el HE.

DISCUSIÓN Y RESULTADOS.

Una vez realizada la lectura de las 57 imágenes que registraron la tormenta que afectó la ZMQ y el estado, se obtuvieron los datos del nivel digital de brillo en cada pixel que corresponde a la posición geográfica de las EMA de la red CIAQ. A continuación, se verificó la temperatura tope de nube fría a partir de los umbrales especificados en el HE. Finalmente, mediante la escala propuesta (Tabla 2), se calculó la intensidad de lluvia pronosticada para construir el registro temporal y espacial de la tormenta.

La implementación del rango de lectura de valores de nivel digital de brillo 100 a 255 permitió observar el origen y evolución acorde con la dinámica atmosférica de 7 zonas que afectaron territorio nacional y de manera particular el centro de México. Esto facilitó la identificación del patrón y el análisis temporal correspondiente (Figura 5). En la parte señalada se aprecian en color negro la posición de las EMA de la red CIAQ dentro del territorio del estado de Querétaro.

Establecida la correlación espacial de la ubicación de las EMA de la red CIAQ respecto a los pixeles que conforman la ISD, se realizó la lectura con la escala de nivel digital, generando para cada una de las EMA su serie temporal de intensidad de lluvia pronosticada (mm/h) y aplicando el HE.

Con ello se facilitó la identificación de las EMA que registraron la tormenta y verificó la intensidad del evento en las áreas de la ZMQ y los municipios del estado (Figuras de la 6-9). El t_0 corresponde al 27 de septiembre desde las 02:15 a.m. con una diferencia temporal de 15 minutos hasta llegar a t_{50} asociado al 27 de septiembre a las 18:15 p.m.

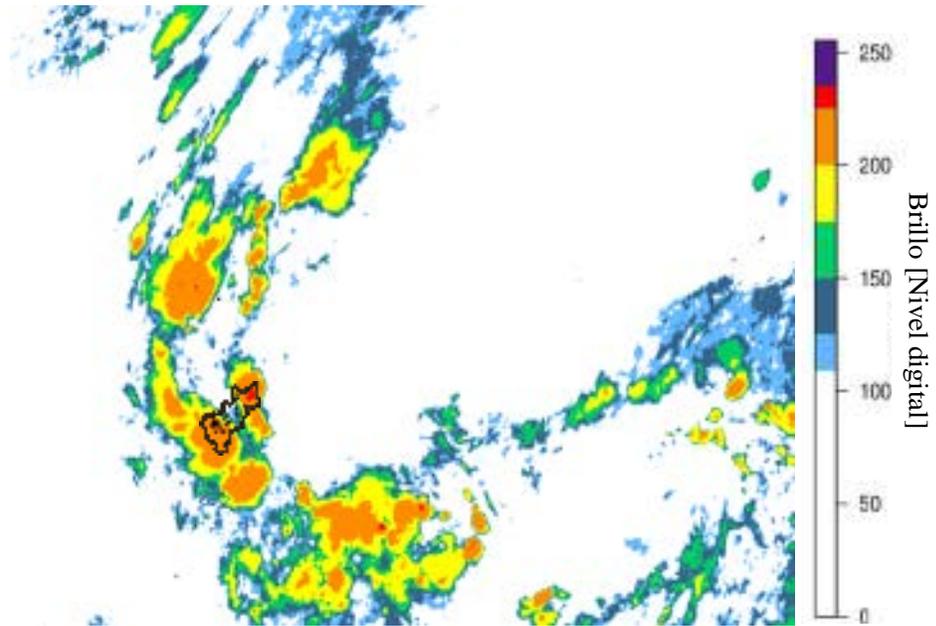


Figura 5. ISD 201709270215 interpretada con la escala propuesta sobre el territorio de Querétaro.

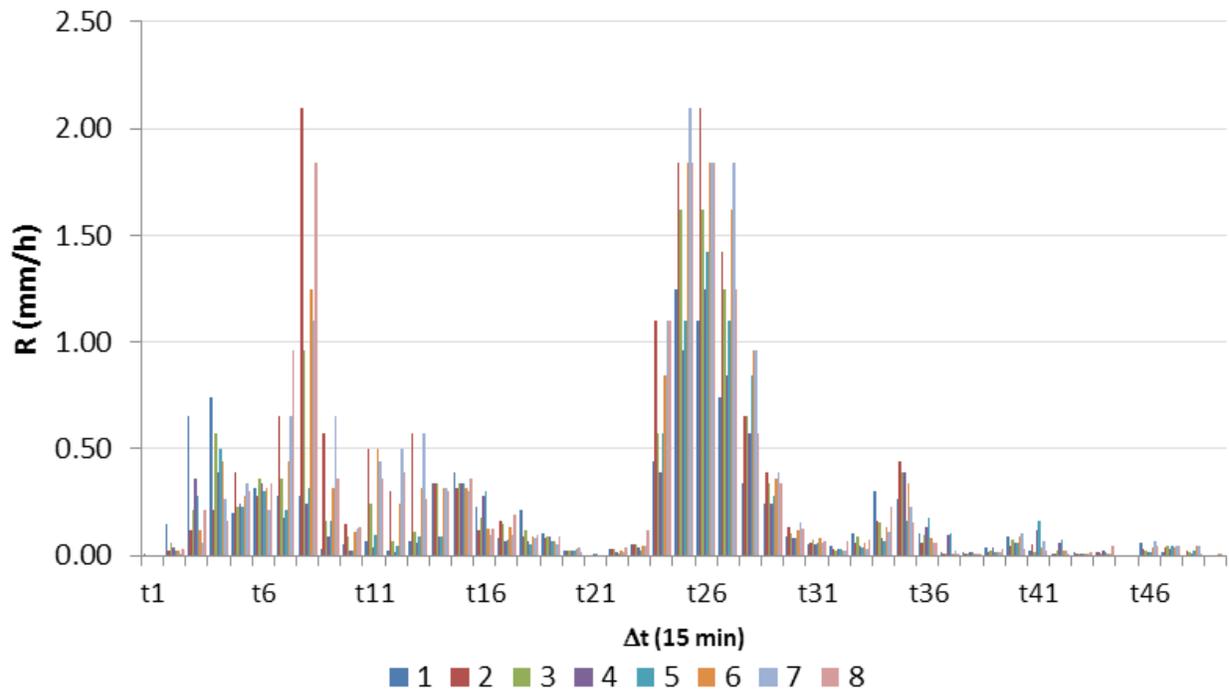


Figura 6. Intensidad pronosticada (R) mediante el HE para las estaciones Chulavista (1), Belén (2), Real del Parque (3), Candiles (4), Cimatarío (5), Centro Histórico (6), Milenio III (7) y San Gil (8).

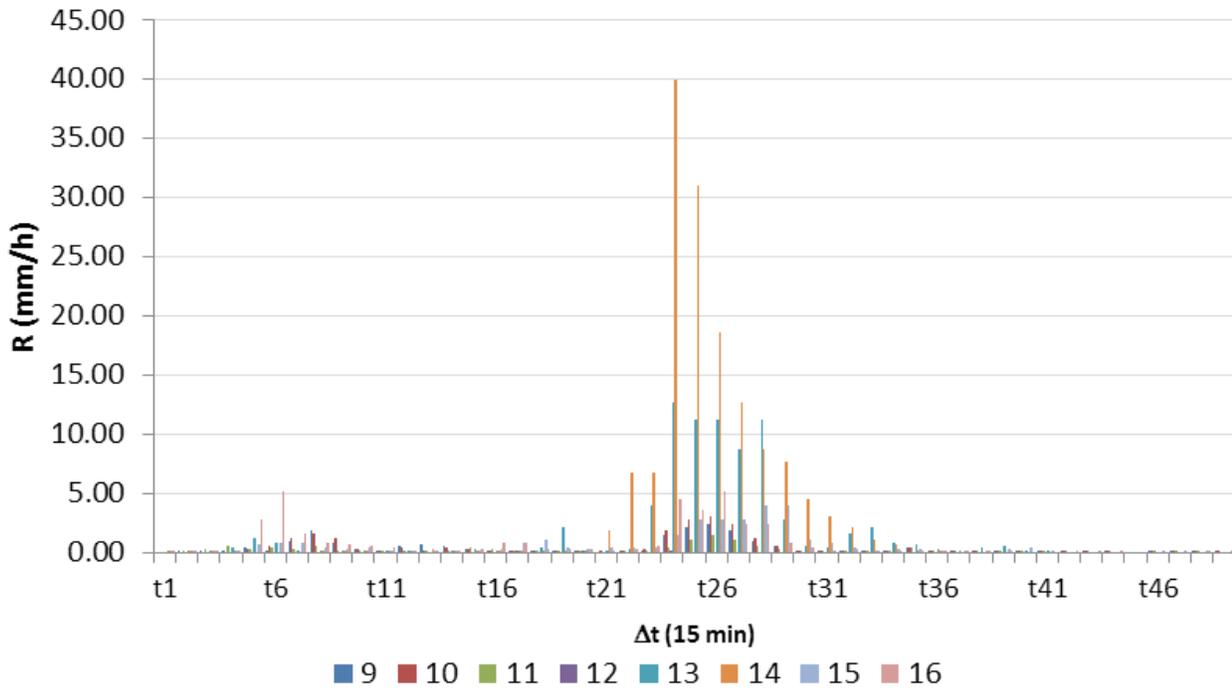


Figura 7. Intensidad pronosticada (R) mediante el HE para las estaciones El Refugio (9), COTAS Amazcala (10), Cerro de las Campanas (11), Amealco de Bonfil (12), Pinal de Amoles (13), Arroyo Seco (14), Cadereyta de Montes (15) y Colón (16).

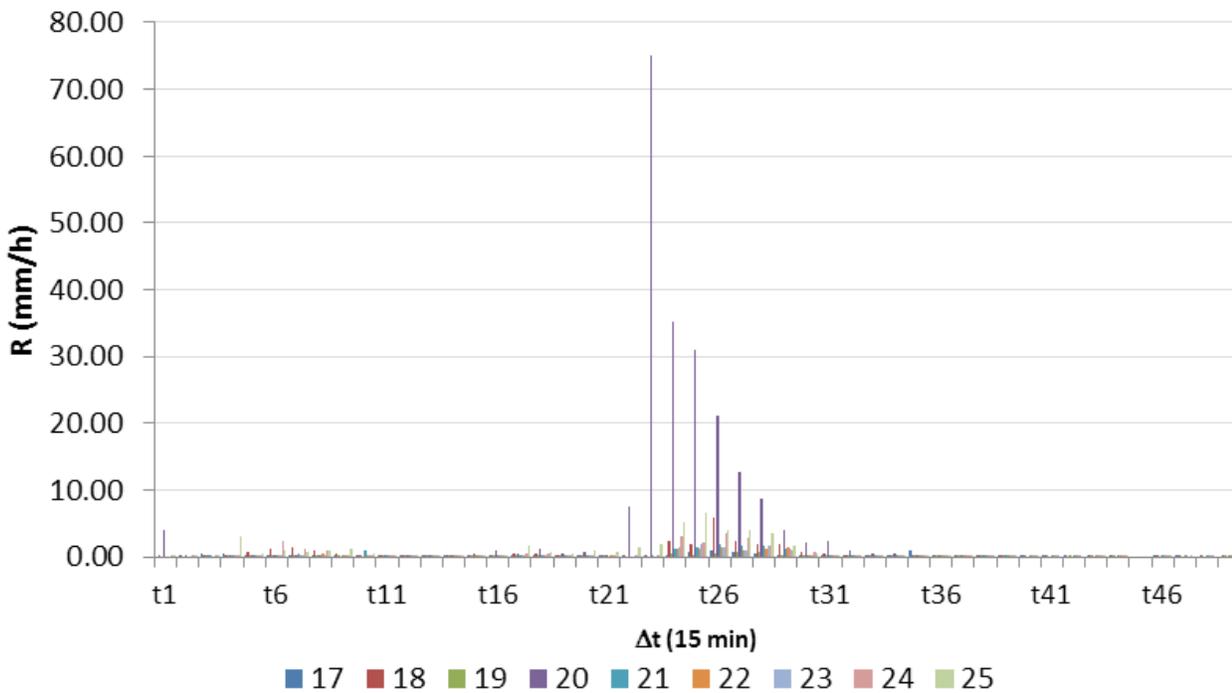


Figura 8. Intensidad pronosticada (R) mediante el HE para las estaciones Corregidora (17), Ezequiel Montes (18), Huimilpan (19), Landa de Matamoros (20), Pedro Escobedo (21), San Joaquín (22), San Juan del Río (23), Tequisquiapan (24) y Tolimán (25).

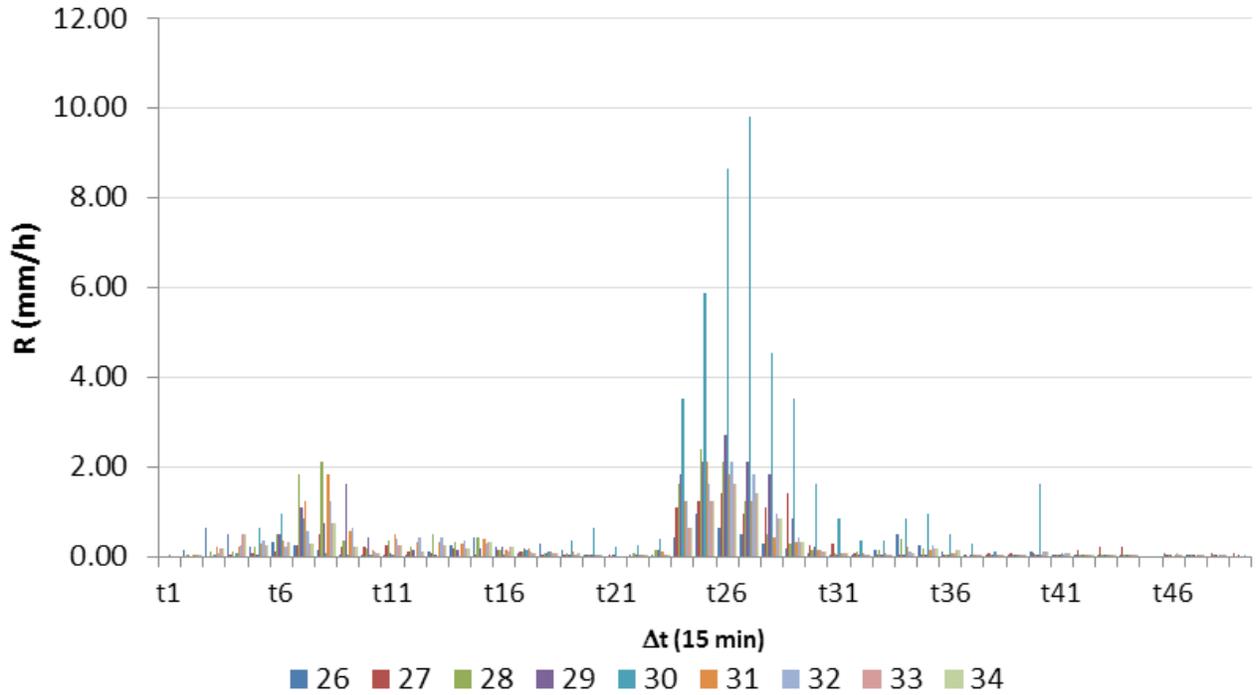
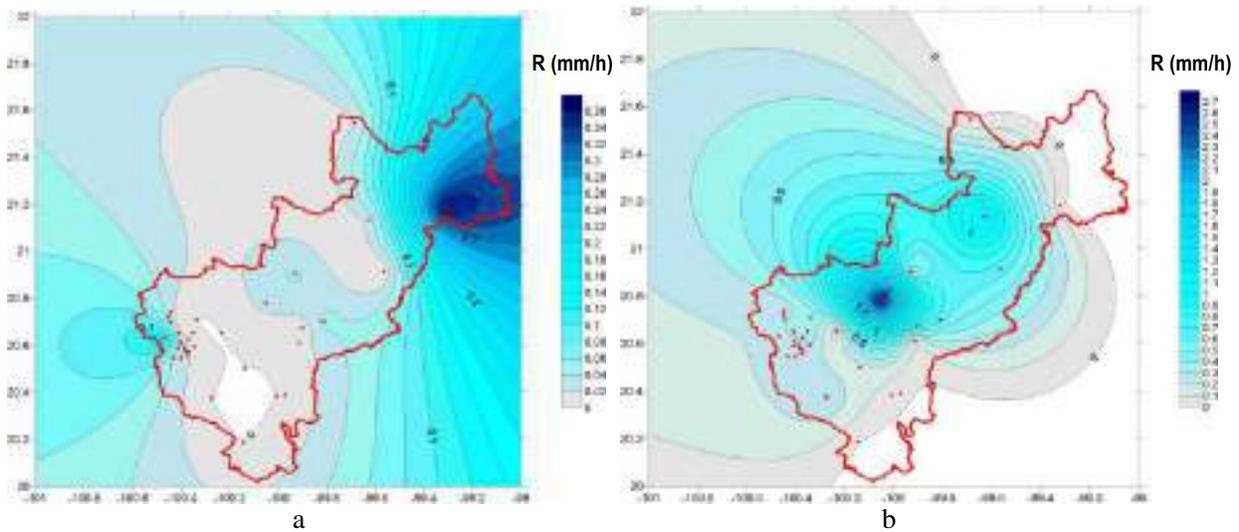


Figura 9. Intensidad pronosticada (R) mediante el HE para las estaciones Viñedos (26), El Esparrago (27), Santa Rosa Jáuregui (28), Unión de Ejidos Graciano Sánchez (29), Joaquín Herrera (30), Juriquilla (31), UAQ Aeropuerto (32), Pasteur y 57 (33) y CICATA IPN (34).

Una vez identificado el pronóstico mediante el HE en la posición geográfica de las EMA de la red CIAQ se procedió a realizar el mapeado de la intensidad (R), aplicando la in-

terpolación por Kriging ordinario sobre territorio queretano para cada hora durante el transcurso de la tormenta (Figuras 10-16).



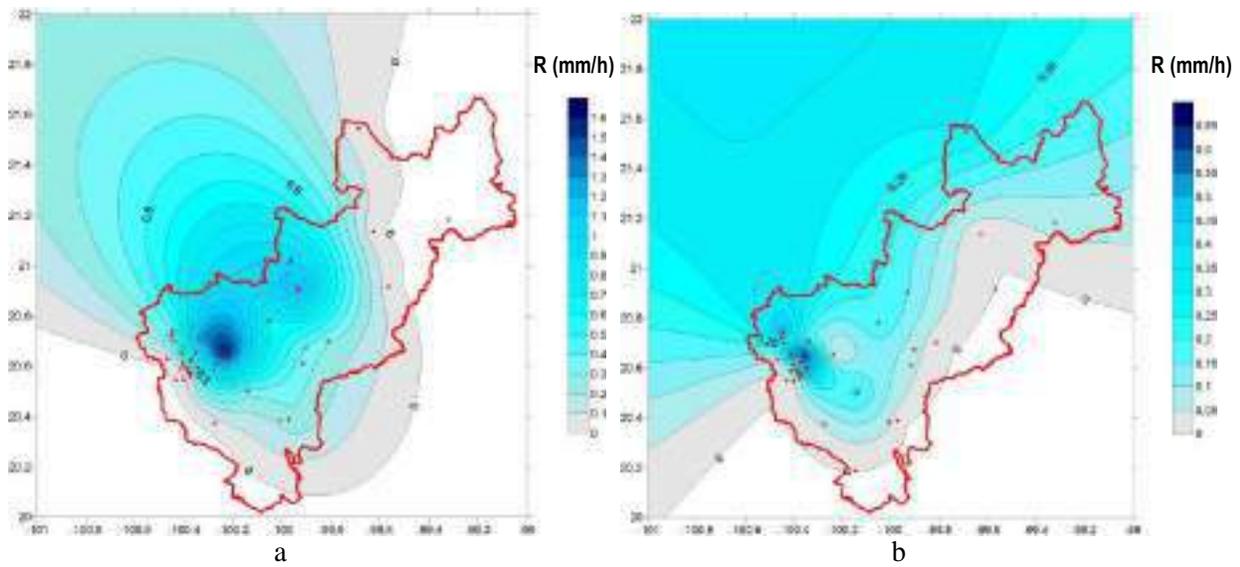


Figura 11. Distribución espacial de la tormenta el 27 de septiembre a las 04:15 am (a) y a las 05:15 am (b).

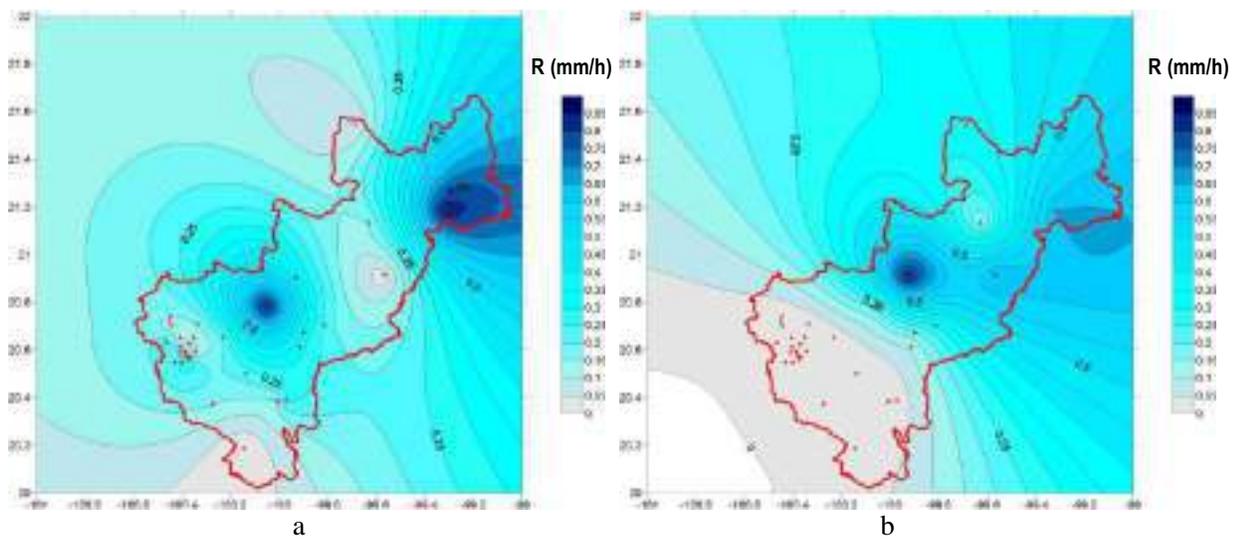


Figura 12. Distribución espacial de la tormenta el 27 de septiembre a las 06:15 am (a) y a las 07:15 am (b).

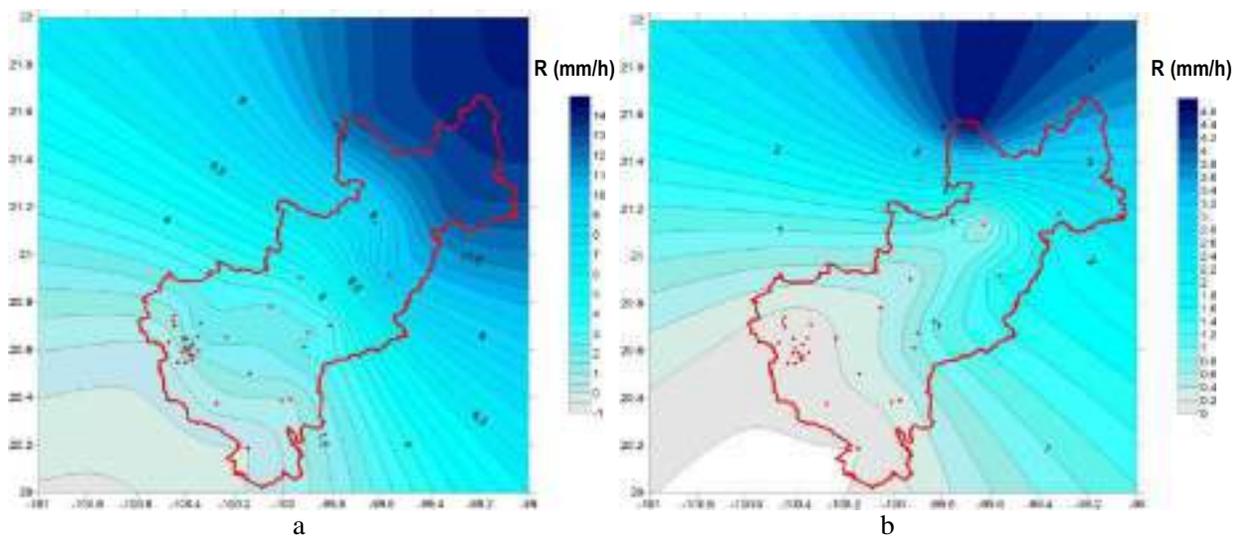


Figura 13. Distribución espacial de la tormenta el 27 de septiembre a las 10:15 am (a) y a las 12:15 pm (b).

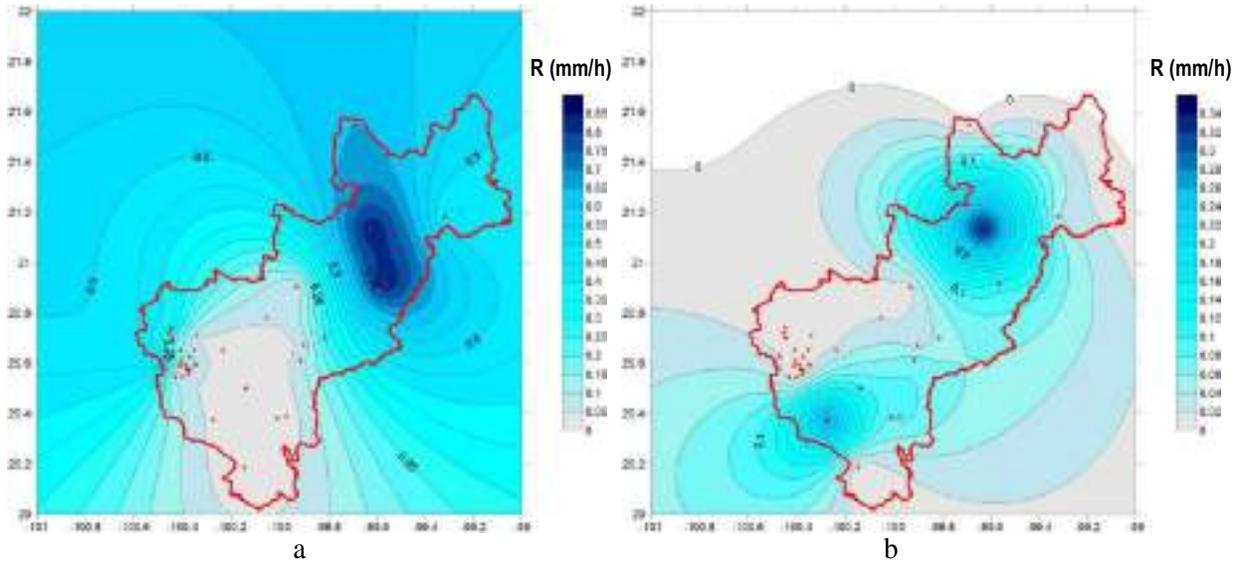


Figura 14. Distribución espacial de la tormenta el 27 de septiembre a las 13:15 am (a) y a las 14:15 pm (b).

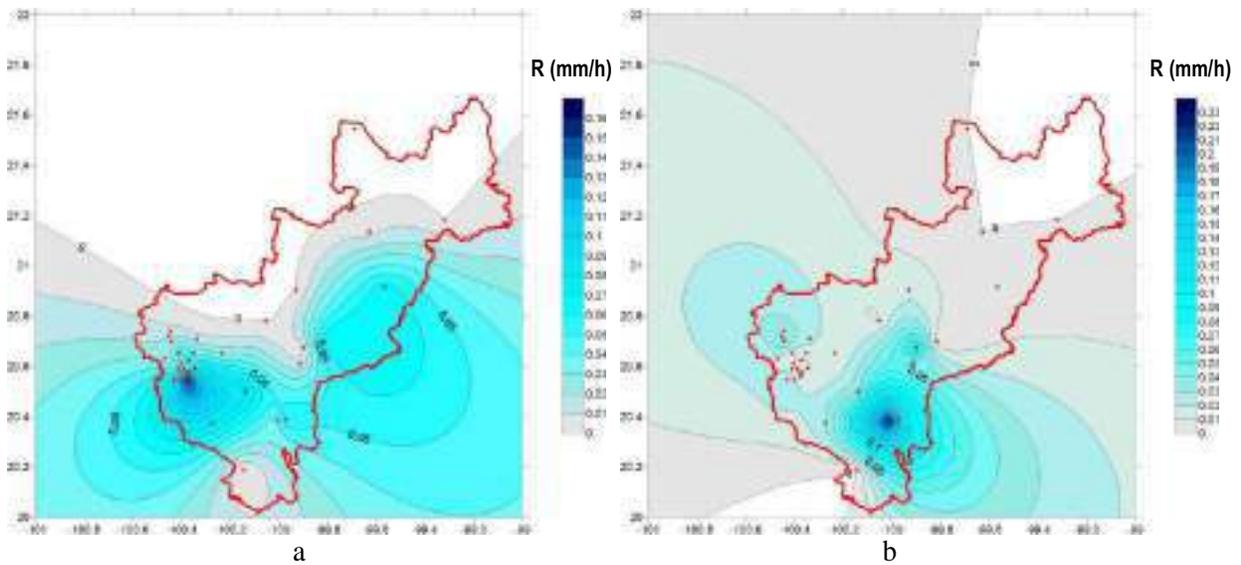


Figura 15. Distribución espacial de la tormenta el 27 de septiembre a las 15:15 am (a) y a las 16:15 pm (b).

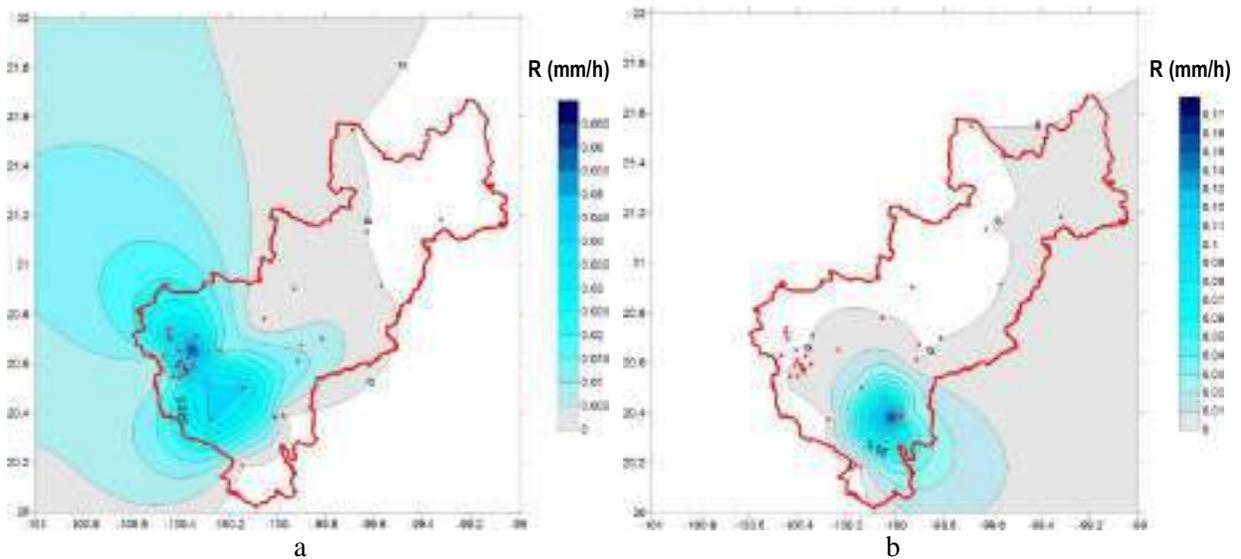


Figura 16. Distribución espacial de la tormenta el 27 de septiembre a las 17:15 am (a) y a las 18:15 pm (b).

Se puede apreciar en los hietogramas pronosticados de intensidad de lluvia (Figura 6) que toda la ZMQ estuvo afectada de manera constante por la tormenta del día 27 de septiembre con una primera secuencia lluviosa que alcanzó un máximo de 2 mm/h en la zona de Belén, parte alta al NNE del centro de la ciudad caracterizada por contar con vialidades de mucha pendiente, así como una media aproximada de 0.50 mm/h en el resto de ciudad. Además una segunda secuencia lluviosa homogénea de intensidad 2.00 mm/h ocurrió 5 horas después que cubrió la ZMQ, ocasionando que las zonas de mayor elevación que rodean el centro de la ciudad captaran lluvia de manera rápida y que derivado de la topografía urbana ocasionó una rápida acumulación de flujo superficial que se dirigió a la red de drenaje hidrológica conformada por el río Querétaro y los drenes el arenal y Cimatarío. Esto generó que se saturaran y al perder la capacidad hidráulica derivó en inundaciones súbitas a lo largo de la ciudad.

Ante la primera secuencia lluviosa (10 a 121) y debido a los caudales en la red de drenaje hidrológica, producto de las lluvias que antecedieron las del día 27, el escurrimiento en la zona urbana concluyó con el llenado y, al presentarse la segunda secuencia lluviosa, el agua ocupó espacios topográficos de cotas bajas iniciándose durante la madrugada las inundaciones a lo largo de la ZMQ e incrementándose los niveles por el tiempo de retraso en la cuenca para los flujos superficiales, aunado a que se mantuvo una lluvia ligera durante las siguientes 5 horas contribuyendo al volumen precipitado.

En la Figura 7 pueden observarse ambas secuencias lluviosas en las EMA El Refugio y la zona universitaria en el Cerro de las Campanas, pero se distingue de manera importante una fase de lluvia intensa para 126 que coincide con la segunda secuencia en la zona urbana, pero ésta fue 4 veces más intensa y se localizó en la región NE del estado que conforma la zona montañosa alcanzando intensidades de 40 mm/h particularmente en Arroyo Seco y 30 mm/h en Colón.

Como puede apreciarse, se trató de una lluvia de corta duración pero gran intensidad, lo cual ocasionó una acumulación inmediata de escurrimiento superficial, que generó problemas inundaciones y deslaves en la zona, potenciado con un remanente de lluvia de aproximadamente tres horas con un promedio de 5.00 mm/h en la madrugada.

De manera similar fue el comportamiento de la lluvia hacia la zona E del territorio Queretano al mantenerse una segunda secuencia lluviosa que osciló entre 5 y 10 mm/h con una intensificación puntual que alcanzó los 75 mm/h en Landa de Matamoros, como se aprecia en la Figura 8, se presentó la misma secuencia inicial de precipitación de intensidad ligera pero con un marcado incremento desde 120 y manteniéndose la intensidad de fuerte a moderada las 3 horas posteriores de alcanzado el máximo de lluvia.

La Figura 10 expone que la lluvia mostró dos zonas de desarrollo: una en la ZMQ de baja intensidad y otra de mayor magnitud hacia el NE. Ambas cubrieron en aproximadamente un 85% el territorio estatal. Una hora después la precipitación empezó a acumularse en la zona centro del estado intensificando en la ZMQ, tendencia que se mantuvo desde las 3:15 hasta las 6:15 a.m. (Figuras 11 y 12).

Al mismo tiempo se aprecia un centro de intensificación al NE, el cual se desarrolló con dirección NW sobre la región montañosa, lo que ocasionó las fuertes intensidades descritas en las localidades Arroyo seco, Colón y Landa de Matamoros, así como en las localidades vecinas para finalmente volver a concentrar la evolución de la tormenta en la región de los municipios de Santiago de Querétaro, San Juan del Río, El Marqués y Corregidora.

Por su origen, el HE muestra diferencia en la intensidad pronosticada respecto de la intensidad medida en las EMA, por ello se requiere en trabajos posteriores calibrar los parámetros con los registros de la ZMQ, para optimizar los pronósticos al emplear las imágenes satelitales IR.



CONCLUSIÓN

Las ISD IR permiten el monitoreo climático de los municipios del estado de Querétaro, incluyendo algunos de ellos que carece de EMA, permite la reconstrucción temporal y espacial de eventos meteorológicos para conocer su desarrollo y establecer acciones de prevención social o trabajos de resiliencia en zonas afectadas.

La interpolación espacial realizada a partir de la lectura de nivel digital en los píxeles de las imágenes IR en escala horaria reconstruye adecuadamente la tormenta. Adicionalmente es posible acceder a ISD con resolución temporal de 15 minutos incrementando significativamente el conocimiento de su evolución temporal y espacial mediante la metodología descrita.

La tormenta del 27 de septiembre del 2017 se trató de un evento hidrometeorológico extremo, que cubrió prácticamente todo el territorio estatal, aunado con las lluvias ordinarias registradas en días previos se generaron escurrimientos superficiales iniciales que se concentraron en la red de drenaje hidrológica y saturaron el terreno. Ambos factores potenciaron nuevos escurrimientos y con ello la insuficiencia de la red presentándose inundaciones súbitas a lo largo de la ZMQ y municipios del centro del estado.

La topografía jugó un papel trascendental en las inundaciones al tenerse urbanizadas las zonas de mayor pendiente, siendo un factor detonante ante la falta de zonas de infiltración, lo cual ha incrementado significativamente el coeficiente de escurrimiento de la ZMQ. Por otro lado, el tiempo de concentración de la lluvia disminuye considerablemente por el desnivel que incrementa la velocidad, con la cual los escurrimientos se trasladan hacia las zonas bajas de la ciudad que se encontraban saturadas por su aportación propia.

El hidrograma de esta lluvia fue de duración muy corta con un gasto pico muy elevado para lo cual la infraestructura hidráulica se colapsó, a causa de la invasión de los drenajes naturales en aras de urbanizar con

finés comerciales y de vivienda. Ello representa un riesgo adicional ante la presencia de estas lluvias intensas que generan elevados volúmenes precipitados y ocasionan el reconocimiento nativo de los arroyos y ríos aun con estructuras, lo que llevará a fuertes erosiones, socavones, fisuras, hundimientos en perjuicio de la ciudadanía con los daños económicos, sociales y de salud que representa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al área de Percepción Remota del Servicio Meteorológico Nacional por el acceso a las imágenes satelitales. De igual manera a los revisores por los comentarios y sugerencias realizadas para el enriquecimiento del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] S. D. Espín and D. A. Romero, "Génesis de tormentas severas y su incidencia en la región de Murcia". *Investigaciones Geográficas*, no. 62, pp. 67-81. Jul-Dic, 2014.
- [2] Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). Estudio de la OCDE sobre el sistema nacional de protección civil en México, Resumen Ejecutivo, OECD Publishing, 2013.
- [3] Organización Meteorológica Mundial, Glosario Hidrológico Internacional, Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial. Ginebra, Suiza. Primera edición, 2012, WMO/OMM/BMO – No 385.
- [4] Centro Nacional de Prevención de Desastres, Serie fascículos: Inundaciones. Secretaría de Gobernación. México, 2014
- [5] J. R. M. Rodríguez, C. A. Benito and L. A. Portela, *Meteorología y climatología: Unidad didáctica*. Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, 2004.
- [6] A. V. García, *Estrategias adaptativas y amenazas climáticas. Más allá del cambio*

climático. Las dimensiones sociales del cambio ambiental global. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Psicología, 2006.

[7] O. D. Cardona, *The need for Rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: a necessary review and criticism for effective risk management. Mapping Vulnerability*. Londres: Earthscan Publisher, 2013.

[8] C. M. Rebella and R. Díaz, "Tendencia de lluvias y rendimiento de maíz en el área maicera típica argentina", III Congreso Nacional del Maíz, Pergamino, 1984.

[9] C. Rebella, S. Carballo, T. Hartmann and P. Mercuri, "Evento NIÑO 1997-98: Utilización de información satelital en la evaluación del impacto de las inundaciones sobre las producciones agropecuarias y forestales", *La CONAE y el aprovechamiento de la información espacial*, 1999.

[10] S. R. Kalsi, *Satellite based weather forecasting, Satellite remote sensing and GIS applications in meteorology*. Dehra Dun, India: World Meteorological Organization, 2004.

[11] C. M. Kishtawal, *Meteorological satellites. Satellite remote sensing and GIS applications in meteorology*. Dehra Dun, India: World Meteorological Organization, 2004.

[12] R. A. Rozumalski, "A quantitative assessment of NESDIS AutoEstimator", *Weather and Forecasting*, Vol. 15, pp. 397-415, 2000.

[13] W. G. Rees, *Physical principles of remote sensing*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.

[14] V. S. Ormeño, *Teledetección Fundamental*. Madrid: Universidad Politécnica, 2006.

[15] M. J. Martínez, *Percepción Remota: Fundamentos de Teledetección Espacial*. México: Comisión Nacional del Agua, 2005.

[16] R. Houze, *Cloud dynamics*. San Diego, California: Academic press, 1993.

[17] S. Nesbitt, E. Zipser and D. Cecil. "A census of precipitation features in the tropics using TRMM: radar, ice scattering, and lightning observations", *Journal of climate*, pp. 4087-4106.

[18] A. D. F. Campos, *Procesos del ciclo hidrológico*, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 1998.

[19] M. A. Gutiérrez, L. F. Arellano, "Estudio de tormentas tipo en la ciudad de Querétaro". *ciencia@uaq*, vol. 3, no. 1, pp. 62-79, 2010.

[20] R. M. Meza, H. L. Curiel, T. D. González and M. C. Álvarez, "Imágenes satelitales y distribución espacial de la lluvia en el estado de Querétaro. Caso: Tormenta del 18 de agosto de 2014", Red universitaria de caracterización de riesgos Hidrometeorológicos, fluviales y costeros. Nthe. *Revista eléctrica de difusión científica, tecnológica y de información del estado de Querétaro*, no. 14. pp. 21-29, 2016.

[21] M. Kumar, "Digital image processing". *Satellite remote sensing and GIS applications in meteorology*. Dehra Dun, India: World Meteorological Organization, 2004.

[22] M. J. Badder, G. S. Forbes, J. R. Grant, R. B. E. Lilley and A. J. Waters, *Images in weather forecasting: A practical guide for interpreting satellite and radar imagery*, N.Y.: Cambridge University Press, 1995.

[23] G. A. Vicente, R. A. Scofield and W. P. Menzel, "The operational GOES infrared rainfall estimation technique". *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 79, pp. 1883-1898, 1998.

[24] P. K. Kitadinis, *Introduction to Geostatistics. Applications in Hydrogeology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

[25] G. Herrera-Zamarrón, "Aplicación al acuífero del Valle de Querétaro de una metodología nueva para el diseño de redes de monitoreo de la calidad del agua subterránea". Informe interno. Proyecto TH-2006. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2000.

[26] A. G. Journel, *Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons*. Washington D.C.: American Geophysical Union, 1989.

[27] E. H. Issaks, R. M. Srivastava, *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford: Oxford University Press Inc., 1989.

ANÁLISIS DE UN PUENTE PEATONAL CONFORMADO POR UNA ESTRUCTURA SOPORTANTE EN FORMA DE TRIDITRABE Y ACOPLADA A MÓDULOS PRESFORZADOS TIPO TENSEGRITY

Analysis of a pedestrian bridge formed by a spatial double layer grid supporting structure and coupled to tensegrity prestressed modules

Ángel Otoniel González Martínez^{1*}, Jaime Moisés Horta Rangel¹,
Guadalupe Moisés Arroyo Contreras¹, Miguel Ángel Pérez Lara Y Hernández¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro

*Autor de correspondencia
agonzalez188@alumnos.uaq.mx

RESUMEN

En este trabajo se estudia el comportamiento mecánico de un sistema tensegrity, empleando el método de doble descomposición de valores singulares, el cual consiste en encontrar los valores y vectores singulares del sistema de ecuaciones de equilibrio, y mediante su combinación lineal, determinar las coordenadas y las fuerzas axiales internas, bajo las cuales, el sistema tensegrity alcanza el equilibrio estático. Dicho estudio tiene un carácter no-lineal. A la vez, la estructura soportante del puente peatonal se estudia de acuerdo con la teoría de barras articuladas en el espacio. Las condiciones de frontera incluyen tanto los apoyos de la estructura soportante como de la propia estructura tensegrity. Los resultados obtenidos establecen el nivel de presfuerzo de las barras y tensores del sistema, así como las secciones correspondientes. Se muestran las características del análisis de dichos sistemas estructurales, así como diversas etapas del análisis no-lineal hasta obtener la forma estable que cumpla los requerimientos normativos en la materia.

Palabras clave: Análisis no-lineal, módulo Tensegrity, presfuerzo, estructura metálica, sistema estable.

ABSTRACT

In this paper, a novel configuration of a tensegrity system it is studied. The DSVD form-finding method is applied to obtain the numerical solution of the equilibrium equations. The nodal coordinates and the internal forces that allows the self-equilibrium of the tensegrity system are obtained. The nonlinear structural analysis of the tensegrity assemble is presented. At the same time, the supporting structure of the pedestrian bridge is studied according to the theory of spatial pin-jointed truss structures. Two boundary conditions cases that includes both the supports of the pedestrian bridge supportant structure and the ten-

segrity structure are analyzed, and there are determined the optimal boundary conditions that allows the desired mechanical behavior. The results obtained establish the prestress level of bars and cables elements, as well as the cross-section dimensions required. The characteristics of the analysis of both structural systems are described, as well as various stages of their equilibrium forms until obtaining the stable form that complies with the regulatory requirements in the matter.

Keywords: Non-linear analysis, tensegrity module, prestress, metallic structure, stable system.

INTRODUCCIÓN

La competitividad de los productos de la industria de la construcción (viviendas, edificios, cubiertas, naves industriales, vialidades, puentes vehiculares, puentes peatonales, etc.) es afectada por una gran cantidad de factores, que influyen en la toma de decisiones del cliente o usuario al momento de elegir un proyecto sobre otros. Algunos de estos factores son el monto total de la inversión, la relación costo-beneficio, la ubicación del proyecto, funcionalidad, innovación, atractivo visual, el impacto ambiental y social, entre otros. A través del diseño arquitectónico, es posible controlar muchos de los factores mencionados previamente y de esta manera brindar cualidades a los proyectos de construcción para que resulten atractivos a los usuarios y satisfagan sus necesidades.

Una solución alternativa para atender estas necesidades ha sido la implementación de los sistemas *tensegrity* en estructuras civiles, ya que además de ser atractivos para los usuarios poseen características mecánicas que, a comparación con los sistemas convencionales, incrementan su eficiencia estructural (relación entre carga sobre peso propio) [1]. Además, dada su composición, estos sistemas permiten el uso de materiales sustentables y la implementación de procesos constructivos eficaces, ya que gran porcen-



taje de la estructura se elabora en taller y, en campo, únicamente se realiza el montaje de la superestructura y la construcción de la cimentación.

Las estructuras *tensegrity* (ET) son sistemas compuestos por una red continua de cables bajo fuerzas de tensión, en la cual se encuentran elementos barra aislados, los cuales trabajan ante fuerzas de compresión [2]. Su nombre fue propuesto por R. B. Fuller como una contracción de *tensional integrity*.

Existen tantas definiciones de ET como autores e investigadores en este campo, pero las características de los sistemas considerados en esta investigación son las siguientes [3]:

Los elementos de la estructura son recto

Los elementos cable sólo trabajan a tensión, mientras que los elementos barra únicamente trabajan a compresión

El sistema es auto-equilibrante y

El presfuerzo es necesario para alcanzar el equilibrio estático.

Las ET surgieron a inicios de 1950 del trabajo de K. G. Snelson, R. B. Fuller y D. G. Emmerich. Desde entonces, la investigación en este tipo de sistemas ha crecido y se ha expandido desde las áreas del arte y la arquitectura a campos como las matemáticas, mecánica, ingeniería civil, robótica y nanotecnología [4].

En el campo de la ingeniería civil, la principal aplicación de las ET es como domos o cubiertas. La primera obra de este tipo llevada a la práctica fue la Arena de Gimnasia Olímpica (Figura 1), ubicada en Seúl, Corea del Sur, en el año 1986. Posteriormente surgieron obras con este principio de estructuración como la arena Red bird (EUA), el domo Sun Coast Dome (EUA), Georgia Dome (EUA), la cubierta del estadio La Plata (Argentina), Bifid Tension Dome (España), entre algunos otros.



Figura 1. Arena de Gimnasia Olímpica, Seúl, Corea del Sur (1986) [5].

Sin embargo, la gama de aplicaciones de las ET en la ingeniería civil es reducida, ya que la segunda aplicación con mayor número de obras llevadas a la práctica son las pasarelas o puentes peatonales. De acuerdo con Jan De Boek [6], a nivel mundial, sólo existen 2 puentes peatonales construidos e inspirados en las características geométricas y en los principios estructurales de las ET. El registro del primer puente tipo *tensegrity* lo tiene la obra Bridge of Sticks (Figura 2), ubicada en Purmerend, Holanda, construida en el año 2001 y cubre un claro de 128 m. El segundo puente peatonal construido del que se tiene registro es el puente Kurilpa (Figura 3), ubicado en Brisbane, Australia. Tiene una longitud total de 470 m, con un claro máximo de 120 m y con 6.5 m de ancho [6].

Con respecto a las investigaciones documentadas sobre aplicación de las estructuras *tensegrity* en puentes peatonales, se han reportado las siguientes conclusiones:

Rhode-Barbarigos [9] presenta el diseño de un puente *tensegrity* adaptando la normativa estructural Suiza a las necesidades del proyecto. Este puente se diseñó ensamblando módulos *tensegrity* elementales. Diferentes configuraciones del puente fueron evaluadas para un mismo claro a cubrir, y mediante un estudio paramétrico se identificaron los factores que afectan en mayor medida el comportamiento de cada puente.



Figura 2. Puente de palitos (Bridge of Sticks), Purmerend, Holanda (2001) [7].



Figura 3. Puente Kurilpa, Brisbane, Australia (2009) [8].

Se definió un módulo pentagonal como la topología óptima en dicho caso de análisis. Adicionalmente, Rhode-Barbarigos [10] realizó un estudio de un puente peatonal basado en módulos *tensegrity* de "sección hueca", donde se compararon los resultados de dos metodologías empleadas para obtener la solución económica. Posteriormente, Rhode-Barbarigos [11] presenta un estudio de optimización aplicando algoritmos genéticos, con el objetivo de encontrar una solución de diseño eficiente, y sugiere algunas especificaciones de diseño en ausencia de normativas específicas para estructuras *tensegrity*.

Jan de Boek [6] realizó un estudio sobre diversas propuestas topológicas para establecer un puente basado en el principio *tensegrity*, mediante la unión de diversos

módulos básicos. Una de sus principales contribuciones trata de que a menor cantidad de módulos se incrementa la eficiencia del sistema, ya que se reducen los efectos de pandeo en los elementos. Sugiere que las superestructuras de los puentes peatonales basadas en los principios *tensegrity* deberán incluir amortiguadores, ya que aún no se cuenta con suficiente información sobre los efectos que provocarían las vibraciones inducidas cuando un usuario camine por dicho sistema.

Recientemente, Cobos [12] presenta el diseño estructural de un puente tipo *tensegrity*, donde realiza el análisis estático y el diseño estructural del sistema. El puente está compuesto por dos módulos básicos simétricos que cargan un sistema de vigas a flexión, sobre las cuales se desplanta la losa de piso.



Los sistemas tridilosa se componen por una estructura de acero tridimensional y un tablero mixto, mediante los cuales se combina la zona a compresión de los elementos de concreto con la zona a tensión de elementos de acero. Este sistema fue inventado por el ingeniero mexicano Heberto Castillo en 1966. En este sistema de estructuración se logra un alto grado de eficiencia (en algunos casos se alcanza hasta el 90% de eficiencia), que permite elaborar estructuras de bajo peso con resistencias altas a una inversión económica baja. Una de las características de este sistema es que permite reducir un 66% el consumo de concreto y hasta un 40% el uso de acero, de acuerdo con Lorenzo et al [13].

En este documento se presenta el procedimiento de búsqueda de forma en equilibrio y el análisis estático no lineal de un módulo *tensegrity* que se acoplará a un sistema de tridilosa. Dicho acoplamiento formará la superestructura de un puente peatonal.

DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

La superestructura del puente peatonal se compone de dos sistemas: el módulo *tensegrity* y el sistema tridilosa.

Descripción del módulo Tensegrity

El módulo *tensegrity* desarrollado en este trabajo se denominará "Módulo X-T", únicamente por simplicidad. Se concibe que el módulo "X-T" es una adaptación al espacio tridimensional del módulo denominado "X-Cross", el cual se considera el sistema *tensegrity* más simple en un espacio geométrico bidimensional [14]. Esta adaptación al espacio 3D tiene el fin de generar un sistema *tensegrity* con características geométricas y arquitectónicas que ayuden a implementarlo en una pasarela peatonal.

La topología del módulo "X-T" se describe en la Tabla 1, y en la Figura 4 se muestra la numeración de los nodos.

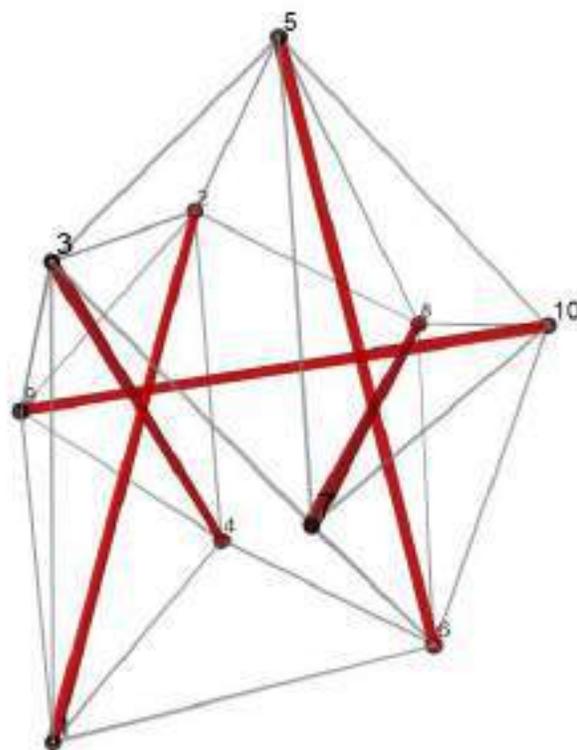


Figura 4. Numeración de nodos del módulo "

El espacio libre interior del módulo "X-T" para la circulación de los peatones (Figuras 5.a y 5.b) es de 2.70 m de ancho y de 2.80 m de altura, mientras que el ancho total es de 4.90 m y la altura total es de 5.45 m. El módulo "X-T" se compone de 27 elementos, de los cuales 5 elementos son tipo barra y los 22 elementos restantes son tipo cable que convergen a 10 nodos.

Descripción de la triditrabe

La pasarela del puente peatonal se compone por un módulo de tridilosa unifilar, la cual será denominada como triditrabe y cuya longitud total es de 28.0 m. El ancho de la tridilosa es de 2.80 m y tiene 1.50 m de altura. Se propone un sistema de piso con paneles "W", con un peso de 1960 N/m². En la Figura 6 se muestra la vista en planta y la vista longitudinal del sistema tridilosa empleado. La carga viva actuante, de acuerdo con la normativa [15], es de 4310 N/m².

Tabla 1. Conectividad del módulo "X-T".

Número de elemento	Nodo inicial	Nodo final	Número de elemento	Nodo inicial	Nodo final	Número de elemento	Nodo inicial	Nodo final
1	1	2	11	7	6	21	10	8
2	3	4	12	6	8	22	3	7
3	5	6	13	8	5	23	2	8
4	7	8	14	1	9	24	2	5
5	9	10	15	9	2	25	5	3
6	1	4	16	3	9	26	1	6
7	4	2	17	9	4	27	6	4
8	2	3	18	5	10	-	-	-
9	3	1	19	10	6	-	-	-
10	5	7	20	7	10	-	-	-

Las coordenadas resultantes del diseño arquitectónico del módulo "X-T" son las siguientes:

Tabla 2. Coordenadas nodales

Número de nodo	Coordenadas			Número de nodo	Coordenadas		
	X (m)	Y(m)	Z(m)		X(m)	Y(m)	Z(m)
1	0.000	0.000	0.000	6	2.800	2.300	0.000
2	0.000	3.800	3.800	7	3.000	0.800	2.500
3	0.200	0.000	3.900	8	3.000	4.800	2.500
4	0.200	4.000	0.000	9	-1.300	2.200	2.000
5	2.800	2.000	5.400	10	3.700	2.200	2.000

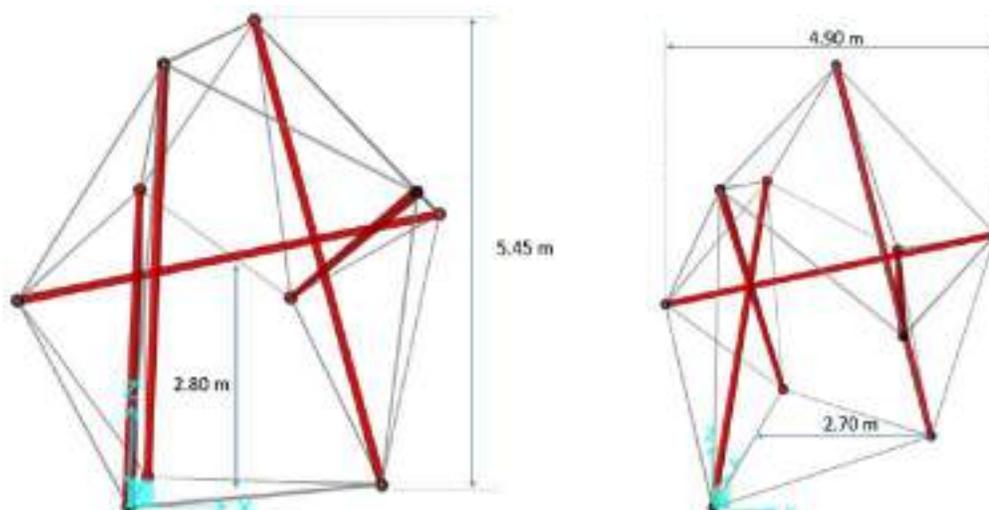


Figura 5. Dimensiones del espacio interior libre para la circulación peatonal del módulo "X-T".

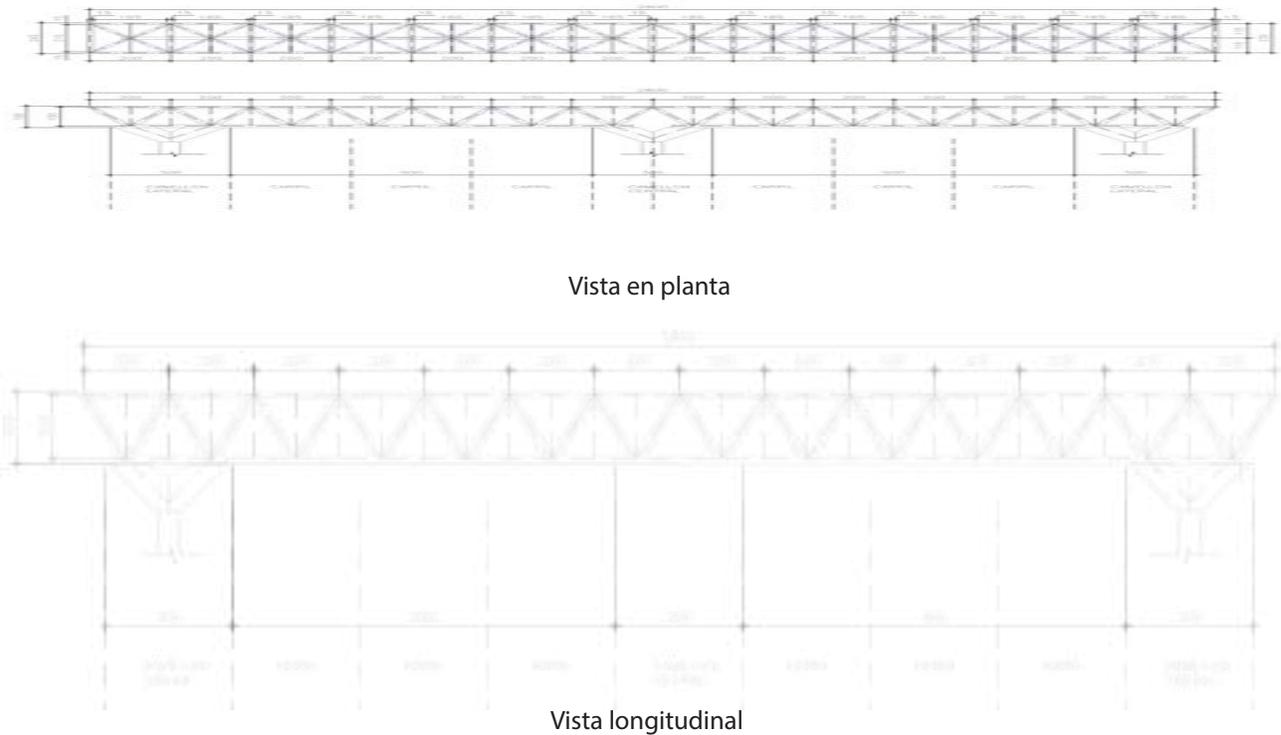


Figura 6. Vista en planta y vista longitudinal del sistema tridilosa.

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LAS ESTRUCTURAS TENSEGRITY

La solución del problema mecánico-estructural de las ET implica el análisis de tres principios mecánicos a satisfacer [16]:

1. El equilibrio entre las fuerzas internas $\{t\}$ con las fuerzas externas del sistema $\{f\}$,
2. La compatibilidad entre los desplazamientos externos (nodales) $\{u\}$ con las deformaciones internas (elongaciones o acortamientos) $\{e\}$, y,
3. La relación entre las fuerzas internas $\{t\}$ con las deformaciones internas $\{e\}$, o de manera análoga, la relación entre las fuerzas externas $\{f\}$ con los desplazamientos $\{u\}$.

Estos principios mecánicos pueden sistematizarse a manera de ecuaciones en términos matriciales y vectoriales como:

1. Ecuaciones de equilibrio

$$[A] * \{t\} = \{f\} \quad (1)$$

Donde a la matriz $[A]$ se le denomina matriz de equilibrio.

2. Ecuaciones de compatibilidad

$$\{e\} = [H] * \{u\} \quad (2)$$

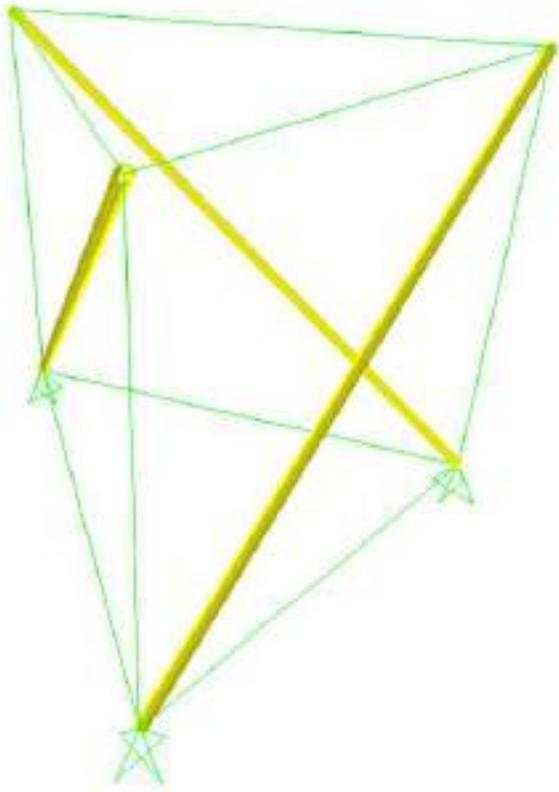
Donde a la matriz $[H]$ se le denomina matriz de compatibilidad.

3. Ecuaciones de rigidez

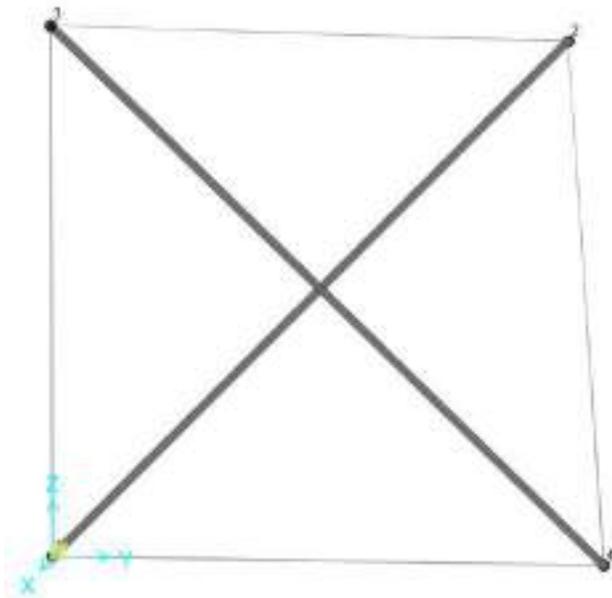
$$[K] * \{u\} = \{f\} \quad (3)$$

Donde a la matriz $[K]$ se le denomina matriz de rigidez.

Para comprender el comportamiento mecánico de las ET es importante analizar los principios mencionados previamente. Consideremos los sistemas *tensegrity* más simples tanto para el caso 2-D ("X-Cross") como para el caso 3D ("Simplex" o "3-plex") de las Figuras 7.a y 7.b, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 7. Sistemas tensegrity más simples para el espacio 2-D (a), denominado "X-Cross", y para el espacio 3-D (b), denominado "3-plex".

Dado que los sistemas *tensegrity* trabajan únicamente ante fuerzas axiales, al plantear las ecuaciones de equilibrio para el sistema 2-D (Figura 7.a) tendremos un sistema de dos ecuaciones de equilibrio: una para la sumatoria de fuerzas en la dirección X y otra para la dirección Y, con 3 variables incógnitas relacionadas a las fuerzas internas de cada elemento que se conectan a cada uno de los nodos. De manera equivalente, para el sistema 3-D (Figura 7.b) tendremos un sistema de 3 ecuaciones: cada uno correspondiente a las direcciones X, Y y Z, con 4 variables incógnitas relacionadas a cada uno de los elementos que se conectan a cada nodo.

La indeterminación estática de una estructura ocurre cuando las ecuaciones de equilibrio no son suficientes para determinar las fuerzas internas de sus componentes que, en términos matemáticos, se define como un sistema linealmente dependiente. Esta característica puede traducirse en que el sistema tiene más elementos de los mínimos necesarios para garantizar el equilibrio estático en el respectivo espacio dimensional del sistema. La indeterminación estática (dependencia lineal) es la característica que brinda la propiedad a las ET de lograr el equilibrio estático a través de la inducción del presfuerzo.

Al evaluar el rango de la matriz $[A]$ es posible conocer el número máximo de columnas o filas que son linealmente independientes y, de acuerdo con Pellegrino y Calladine [17], se asocian a los estados de presfuerzo independientes que permiten el equilibrio del sistema, es decir, si el espacio nulo de $[A]$ tiene dimensión $s=0$, el ensamble es estáticamente determinado, por lo que no requiere efectos de presfuerzo para lograr el equilibrio estático. Sin embargo, si $s > 0$, el ensamble es estáticamente indeterminado y el número de estados independientes de presfuerzo se determina mediante

$$s = b - r^A \quad (4)$$



Donde b es el número de elementos del ensamble y r^A es el rango de la matriz de equilibrio.

En términos similares, una estructura es cinemáticamente determinada, si la posición espacial de un nodo en un ensamble se determina únicamente por la longitud de los elementos que se conectan en dicho nodo. Por otro lado, se dice que una estructura es cinemáticamente indeterminada, si la ubicación espacial de un nodo no se determina únicamente por la longitud de los elementos que convergen en dicho nodo [18]. En otras palabras, y citando a Sergio Pellegrino [17]: "Un marco es cinemáticamente determinado, si cualesquier desplazamiento de un nodo, desde su posición inicial a otra posición diferente, causa un cambio de longitud en los elementos" que se conectan al nodo o pertenecen al ensamble. Además, menciona que "un marco es cinemáticamente indeterminado, si el desplazamiento de un nodo, no cambia la longitud de los elementos del ensamble". El movimiento nodal de un marco cinemáticamente indeterminado se denomina mecanismo, el cual puede clasificarse como mecanismo infinitesimal o como mecanismo finito. El mecanismo infinitesimal hace referencia a un desplazamiento nodal pequeño, mientras que el mecanismo finito alude a desplazamientos nodales grandes.

Para determinar el grado de indeterminación cinemática, se analizará el sistema de ecuaciones de compatibilidad (Ecuación 2), el cual relaciona los desplazamientos nodales $\{u\}$ con las deformaciones $\{e\}$, mediante la matriz de compatibilidad $[H]$. Del principio del trabajo virtual, sabemos que en un sistema en equilibrio el trabajo virtual realizado por las cargas externas $\{f\}$ es igual al trabajo virtual hecho por las cargas internas $\{t\}$. Por lo tanto, para los desplazamientos virtuales $\{\delta u\}$, los cuales pueden ser de valor arbitrario, y las correspondientes elongaciones virtuales $\{\delta e\}$, tenemos que [14]:

$$\{f\}^T \{\delta u\} = \{t\}^T \{\delta e\} \quad (5)$$

Sustituyendo la Ecuación 2 en la Ecuación 5, tenemos:

$$\{f\}^T \{\delta u\} = \{t\}^T [H] \{\delta u\} \quad (6)$$

Ya que los desplazamientos virtuales son valores arbitrarios, simplificamos como:

$$\{f\}^T = \{t\}^T [H] \quad (7)$$

De la relación entre las cargas externas $\{f\}$ y las fuerzas internas $\{t\}$ de las ecuaciones de equilibrio (Ecuación 1), obtenemos que:

$$\{f\}^T = \{t\}^T [H] = \{t\}^T [A]^T$$

Por lo tanto:

$$[H] = [A]^T \quad (8)$$

Y la relación cinemática puede expresarse como:

$$\{e\} = [A]^T * \{u\} \quad (9)$$

El número total de grados de libertad de una estructura es igual a:

$$GLT = d * n \quad (10)$$

Donde d corresponde a la dimensión del espacio geométrico y n al número total de nodos. Ya que los movimientos de cuerpo rígido no generan deformaciones en los elementos (elongaciones o extensiones), podemos excluirlos de este análisis cinemático de la siguiente manera:

$$GL = (d * n) - n^{cr} \quad (11)$$

Donde n^{cr} es el número de movimientos de cuerpo rígido del sistema. Por lo tanto, si un desplazamiento nodal $\{u\}$ (libre de los movimientos de cuerpo rígido), no provoca una deformación (cambio de la longitud de los elementos), es decir:

$$[A]^T * \{u\} = \{0\} \quad (12)$$

Entonces $\{u\}$ es un mecanismo, el cual identificaremos como $\{um\}$. Por lo tanto, el número de mecanismos independientes, o bien, el grado de indeterminación cinemática (m) de una estructura auto equilibrante es:

$$m = (d * n) - n^{cr} - r^A \quad (13)$$

Donde $rA = \text{rango } [A] = \text{rango } [A]T$.

De esta manera, identificamos que el primer procedimiento para resolver un problema mecánico relacionado a una ET se enfocará en estabilizar los mecanismos internos, identificando el presfuerzo adecuado para alcanzar el equilibrio estático. Dicho procedimiento es denominado búsqueda de forma (*form-finding*) o búsqueda de fuerzas en equilibrio (*force-finding*). La clasificación del grado de indeterminación estática y cinemática de estructuras libres de apoyos fijo puede consultarse en la referencia [17], donde se modifica la regla de Maxwell y se adapta a las características de las estructuras auto equilibrantes.

BÚSQUEDA DE FORMA Y FUERZAS EN EQUILIBRIO

El análisis de las ET requiere implementar un procedimiento inicial de búsqueda de forma (*form-finding*) y del nivel de presfuerzo (*force-finding*) requerido para alcanzar el estado de equilibrio (BFF) [19]. Este procedimiento consiste en calcular parámetros que se asocian al equilibrio estático del sistema como ángulos de giro, la relación entre las longitudes cable-barra o la relación entre la fuerza axial y la longitud. Este último parámetro es conocido como coeficiente de densidad de fuerza.

Los métodos de BFF para las ET han sido investigados por una gran cantidad de autores [20] y pueden clasificarse de acuerdo con el enfoque en el que brinden la solución al problema. De manera general, se pueden identificar dos grupos de metodologías: las

cinemáticas y las estáticas. Los métodos cinemáticos asocian la solución de una ET predeterminada, maximizando la longitud de los elementos barra y manteniendo constante la longitud de los cables. La solución de este grupo de métodos se expresa en función de ángulos de rotación de algunos de los elementos con respecto al sistema completo o directamente mediante la relación entre la longitud de los elementos cable entre la longitud de los elementos barra. Los métodos estáticos proveen la solución del sistema de ecuaciones de equilibrio de una ET con topología definida, mediante una relación entre la fuerza de cada elemento y las configuraciones en equilibrio de la estructura.

Para el análisis de la forma en equilibrio y de los valores de presfuerzo de la estructura propuesta, se aplicará el método estático conocido como densidades de fuerza [21] para la formulación del sistema de ecuaciones, mientras que para la resolución de dicho sistema se empleará el método algebraico desarrollado por Yuan *et al.* [22], denominado "Doble Descomposición de Valores Singulares" (DDVS).

Método de las densidades de fuerza: Formulación de las ecuaciones de equilibrio

Consideremos el nodo i que se conecta a los nodos j y k por los elementos ij y por ik , respectivamente (Figura 8). Las ecuaciones de equilibrio están dadas por:

$$(x_i - x_j) \frac{t_{i,j}}{l_{i,i}} + (x_i - x_k) \frac{t_{i,k}}{l_{i,k}} = f_{i,x}^{ext} \quad (14.a)$$

$$(y_i - y_j) \frac{t_{i,j}}{l_{i,i}} + (y_i - y_k) \frac{t_{i,k}}{l_{i,k}} = f_{i,y}^{ext} \quad (14.b)$$

$$(z_i - z_j) \frac{t_{i,j}}{l_{i,i}} + (z_i - z_k) \frac{t_{i,k}}{l_{i,k}} = f_{i,z}^{ext} \quad (14.c)$$



Donde $f_{a,b}$ y $l_{a,b}$ son la fuerza interna y la longitud del elemento AB que conecta los nodos A con B. Este sistema de ecuaciones puede simplificarse y linealizarse empleando la notación de densidades de fuerza donde $q_{a,b} = t_{a,b}/l_{a,b}$.

$$(x_i - x_j)q_{i,j} + (x_i - x_k)q_{i,k} = f_{i,x}^{ext} \quad (15.a)$$

$$(y_i - y_j)q_{i,j} + (y_i - y_k)q_{i,k} = f_{i,y}^{ext} \quad (15.b)$$

$$(z_i - z_j)q_{i,j} + (z_i - z_k)q_{i,k} = f_{i,z}^{ext} \quad (15.c)$$

Las ecuaciones 15.a, 15.b, y 15.c pueden reescribirse como:

$$(q_{i,j} + q_{i,k})x_i - q_{i,k}x_j - q_{i,k}x_k = f_{i,x}^{ext} \quad (16.a)$$

$$(q_{i,j} + q_{i,k})y_i - q_{i,k}y_j - q_{i,k}y_k = f_{i,y}^{ext} \quad (16.b)$$

$$(q_{i,j} + q_{i,k})z_i - q_{i,k}z_j - q_{i,k}z_k = f_{i,z}^{ext} \quad (16.c)$$

Para expresar de manera matricial el sistema de ecuaciones 16.a, 16.b, y 16.c, se requerirá emplear la matriz de conectividad [C], en la cual cada fila corresponde a un elemento de la estructura y cada columna corresponde a un nodo. Por ejemplo, para el elemento AB se colocará el valor 1 en el nodo inicial (nodo A), y el valor de -1 en el nodo final (nodo B), mientras que en los demás nodos se asignará el valor 0. Además, las coordenadas de los nodos se expresarán de manera vectorial, es decir, $\{X\} = \{x_1 \dots x_n\}^T$ corresponde a las coordenadas nodales en el eje X, y de manera análoga para los vectores $\{Y\} = \{y_1 \dots y_n\}^T$ y $\{Z\} = \{z_1 \dots z_n\}^T$. El vector de los coeficientes de densidades de fuerza será $\{q\} = \{q_1 \dots q_n\}^T$. Finalmente el sistema se expresará como:

$$[A]\{q\} = \begin{pmatrix} [C]^T \text{diag}([C]\{X\}) \\ [C]^T \text{diag}([C]\{Y\}) \\ [C]^T \text{diag}([C]\{Z\}) \end{pmatrix} \{q\} = 0 \quad (17)$$

Donde la matriz [A] es la matriz de equilibrio [19].

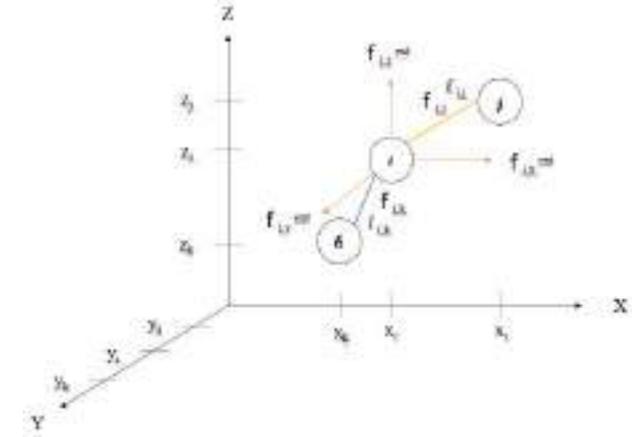


Figura 8. Equilibrio de un nodo libre [19] (Figura adaptada [23])

Descomposición de valores singulares

La descomposición de valores singulares (DVS), propuesta por Pellegrino [24], ha resultado en un método eficaz para encontrar el vector $\{q\}$ y establecer una solución no trivial de la ecuación (17). Este método consiste en que una matriz [A] de dimensiones $3n * b$, donde n es el número de nodos y b el número de elementos, contiene rA valores singulares v_i , distintos de cero, ordenados de manera decreciente que a su vez son las raíces cuadradas de los eigenvalores λ_i del producto matricial $[A]^T[A]$.

La factorización DVS de la matriz [A] se da de la siguiente manera:

$$[A] = [U][V][W]^T \quad (18)$$

Donde $[U] = [u_1 \dots u_{3n}]$ es una matriz ortogonal de dimensiones $3n * 3n$, con vectores u_i ortonormales. $[W] = [w_1 \dots w_b]$ es una matriz ortogonal de dimensiones $b * b$. La matriz ortogonal [V] de dimensiones $3n * b$ contiene rA elementos distintos de cero en la diagonal principal, cuyas columnas corresponden

a los vectores singulares del lado derecho de A , y elementos cero en los demás componentes de la matriz (Figura 9). Los vectores u_i y w_i corresponden a los vectores singulares del lado izquierdo y del lado derecho. Además a partir de esta factorización Pellegrino [24] plantea las siguientes ecuaciones:

$$[A]\{w_i\} = \begin{cases} v_{ii}u_i & i = 1, \dots, r^A \\ 0 & i = r^A + 1, \dots, 3n \end{cases} \quad (19)$$

$$[A]\{u_i\} = \begin{cases} v_{ii}w_i & i = 1, \dots, r^A \\ 0 & i = r^A + 1, \dots, b \end{cases} \quad (20)$$

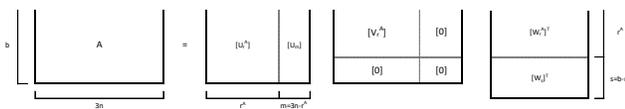


Figura 9. Ilustración gráfica de la DVS de la matriz $[A]$ (Figura adaptada [25]).

La interpretación física que propone Pellegrino de la Ecuación 19, orientada a la parte estática del problema mecánico, es [17]: "De la ecuación 1 a la r^A , se tiene que los primeros r^A vectores singulares izquierdos son las cargas del sistema en equilibrio con los esfuerzos del sistema correspondientes a los vectores singulares del lado derecho, multiplicados por los valores singulares correspondientes". Así resulta en r^A conjuntos ortogonales de carga y sus correspondientes esfuerzos ortogonales. Sin embargo, las $s=3n-r^A$ ecuaciones restantes establecen que los últimos $s=3n-r^A$ vectores singulares derechos corresponden a las fuerzas internas equilibrantes del sistema.

Para la Ecuación 20, Pellegrino brinda la siguiente interpretación [17]: "Las primeras r^A ecuaciones, [sic] establecen que los primeros r^A vectores izquierdos, [sic] son los desplazamientos del sistema compatibles, con las deformaciones del sistema, correspondientes a los vectores del lado derecho, divididos por sus respectivos valores singulares". Las últimas $m=b-r^A$ ecuaciones establecen que los

últimos $m=b-r^A$ vectores singulares del lado izquierdo son libres de deformación, o modos de desplazamiento de energía cero.

Sin embargo, ya que los sistemas tensegrity pueden tener más de un modo de presfuerzo independiente, resulta conveniente determinar el modo de presfuerzo óptimo del sistema, para lo cual se empleará la técnica de doble descomposición de valores singulares, propuesta por Yuan et al. [22].

Doble descomposición de valores singulares

La técnica denominada "Doble Descomposición de Valores Singulares" (DDVS) fue propuesta por Yuan et al. [22] para determinar el nivel de presfuerzo óptimo de domos tensegrity, sin embargo, su eficacia no se limita únicamente a este tipo de estructuras, ya que en investigaciones como la de Ochoa [26] y en Cobos [12] se demostró su efectividad en aplicaciones distintas a las propuestas por Yuan et al.

Este método se basa en encontrar los siguientes modos de pretensado [22]:

Modo de pretensado independiente (MPI). Este modo se obtiene directamente de la DVS de la matriz de equilibrio $[A]$ y satisface únicamente la condición de equilibrio de la ecuación (17). A este modo de presfuerzo se le designará como $[T]$.

Modo de pretensado integral (MPIN). Es la combinación lineal del MPI, que además de satisfacer la condición de equilibrio toma en cuenta la simetría de la estructura. A este modo de presfuerzo se le designará como $[TP]$.

Modo factible de pretensado integral (MFPI). Es la combinación lineal del MPIN, que cumple con la condición de rigidez unilateral de los elementos. Este modo de presfuerzo satisface la condición de que los elementos barra trabajan a compresión y los cables trabajan bajo tensión. A este modo se le designará como $[TF]$. En caso que exista más de un MFPI, se generará un modo adicional denominado modo de pretensado óptimo (MPO), y será representado por el vector $[TO]$.



El procedimiento de optimización se describe a continuación. Posteriormente de aplicar la DVS de la matriz [A] y determinar el o los MPI, procederemos a determinar el MPIN. Se designará a los "s" últimos vectores de la matriz [W] como los modos de pretensado independientes [T].

El MPIN puede expresarse como la combinación lineal de los diversos MPI, es decir:

$$G = \alpha_1 T_1 + \alpha_2 T_2 + \dots + \alpha_s T_s \quad (21)$$

Donde α_i es una constante denominada coeficiente de participación de los modos de presfuerzo.

Para considerar las características geométricas de simetría del ensamble, los elementos con posición similar (simétrica) se agruparán en un mismo conjunto y tendrán el mismo nivel de presfuerzo. Para una estructura con g grupos de simetría, el modo de pretensado es:

$$G_{bx1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} G_1 \\ \vdots \\ G_i \\ \vdots \\ G_g \end{Bmatrix} \quad (23)$$

Se puede expresarse empleando los vectores bases de fuerzas internas (vectores canónicos) e_i , de valor unitario en la posición i, y con valores de cero en las demás posiciones de la siguiente manera:

$$G_{bx1} = \{e_1 \quad \dots \quad e_i \quad \dots \quad e_g\} \begin{Bmatrix} G_1 \\ \vdots \\ G_i \\ \vdots \\ G_g \end{Bmatrix} \quad (24)$$

Igualando las Ecuaciones 21 y 24, tenemos:

$$\alpha_1 T_1 + \alpha_2 T_2 + \dots + \alpha_s T_s = e_1 g_1 + e_2 g_2 + \dots + e_g g_g \quad (25)$$

$$\alpha_1 T_1 + \alpha_2 T_2 + \dots + \alpha_s T_s + (-e_1 g_1) + (-e_2 g_2) + \dots + (-e_g g_g) = 0 \quad (26)$$

La Ecuación 25 puede expresarse de manera matricial como:

$$[P]\{\omega\} = 0 \quad (27)$$

Donde [P] es una matriz de dimensiones $b \times (s+g)$ que se compone como:

$$[P] = [T_1 \ T_2 \ \dots \ T_i \ \dots \ T_s \ -e_1 \ -e_2 \ \dots \ -e_g] \quad (28)$$

y $\{\omega\}$ es un vector de dimensión $(s+g)$ compuesto de la siguiente manera:

$$\{\omega\} = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_i \ \dots \ \alpha_s \ g_1 \ g_2 \ \dots \ g_g]^T \quad (29)$$

Al aplicar la descomposición de valores singulares a la matriz [P], tenemos que la factorización es de la forma:

$$G = \{G_1 \ G_1 \ G_1 \ \dots \ G_i \ G_i \ G_i \ \dots \ G_g \ G_g \ G_g\}^T$$

$$[P] = [U'][V'][W']^T \quad (30)$$

Las matrices [U'], [V'] y [W'] tienen las mismas características y el mismo significado que las descritas previamente. El rango de la matriz [P] será rP . Los vectores $\{w_i\}$ con $rP + 1 < i < (s + g)$ corresponden al llamado MPIN, los cuales conducen a la siguiente ecuación:

$$[P]\{w_i\} = 0 \quad (31)$$

De la Ecuación 30, tenemos que los vectores $\{w_i\}$ son la solución de $\{w\}$. La cantidad de MPIN del ensamble corresponde a:

$$s' = s + g - rP \quad (32)$$

De acuerdo con el valor de s' , las posibles respuestas son:

$s'=1$, si sólo existe un MPIN y si cumple con las condiciones de unilateralidad de los elementos cable y los elementos barra. Este

modo corresponde al MFPI. Directamente el vector $\{w_i\}$ que cumpla la condición correspondiente a $\{w_i\}=\{G\}=\{TF\}$. En caso de que no se cumpla la condición de rigidez unilateral, se considera que el ensamble no es presforzable, ya que no existe ningún MFPI, por lo que es necesario modificar la configuración del sistema (coordenadas de los nodos, la longitud de los elementos o la conectividad).

$s'=0$. En este caso no existe un MFPI, por lo que se tienen que modificar la configuración del sistema (coordenadas de los nodos, la longitud de los elementos o la conectividad).

$s' > 1$. Existen múltiples MFPI, es decir, $\{G_1\}$, ..., $\{G_{s'}\}$. Para determinar el MFPI que cumpla con las condiciones establecidas, se empleará:

$$[TF] = \{TF_1\}\beta_1 + \dots + \{TF_{s'}\}\beta_{s'} \quad (33)$$

Donde b es el coeficiente de participación de los MFPI. Aquel vector que cumpla con las condiciones de unilateralidad de los elementos tipo barra y tipo cable, respectivamente, se denominará Modo de pretensado óptimo (MPO) y se representará con el vector $\{TO\}$.

El procedimiento de búsqueda de forma y de fuerzas en equilibrio se llevó a cabo mediante algoritmos desarrollados en el *software Matlab*.

MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO

Las ET presentan un comportamiento no lineal ante cargas externas, debido a que tanto la rigidez del sistema como las cargas están en función de los desplazamientos y/o las deformaciones. Adicionalmente, el presfuerzo de sus elementos es un efecto de origen geométrico no lineal que brinda el equilibrio del sistema [27]. En este trabajo se considerarán únicamente los efectos de origen geométrico en el rango elástico del material.

El método del elemento finito (MEF) es un procedimiento numérico empleado para encontrar la solución aproximada de las ecuaciones diferenciales parciales que permiten modelar un sistema físico. El modelo matemático asociado al funcional optimizado de la energía de deformación es el siguiente:

$$\frac{\partial \phi(x)}{\partial (u)} = 0 = \int_V [B]^T [D] [B] dV + \int_V [G]^T [MF] [G] dV \{U\} = \int_V [N]^T \begin{Bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{Bmatrix} dV + \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} \quad (34)$$

Donde $[B]$ es la matriz de derivadas de funciones de forma, $[D]$ es la matriz de constantes elásticas del material, $[G]$ es la matriz de derivadas parciales de funciones de forma, $[MF]$ es la matriz de fuerzas de membrana, $\{U\}$ es el vector de desplazamientos nodales, $[N]$ es la matriz de funciones de forma, $\{b_x \ b_y \ b_z\}^T$ es el vector de fuerzas de cuerpo y $\{F_x \ F_y \ F_z\}^T$ es el vector de fuerzas externas nodales [28].

En el caso de las estructuras tensegrity, los miembros estructurales son representados mediante elementos tipo barra, a los cuales se asocian las siguientes funciones de forma:

$$N_1(x) = 1 - \frac{x}{l} \quad (35)$$

$$N_2(x) = \frac{x}{l} \quad (36)$$

Estas funciones son los componentes de la matriz $[N]$. La estructura de cada una de las matrices previamente mencionadas puede ser consultada en [28].

El modelo matemático de la Ecuación 34 puede representarse de manera simplificada como:

$$[K_t]\{U\} = \{[K] + [K_G]\}\{U\} = \begin{Bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} \quad (37)$$

Donde $[K_t]$ es la matriz tangente de rigidez, $[K]$ es matriz de rigidez elástica, $[K_G]$ es la matriz de rigidez geométrica y $\{W_x \ W_y \ W_z\}^T$ es el vector de fuerzas asociadas al peso propio de cada elemento.



Análisis estático no-lineal

La solución de la Ecuación 37 se llevará a cabo empleando un método iterativo-incremental, denominado Newton-Raphson. El sistema de la Ecuación 37 se expresará como:

$$[K_t]\Delta\{U\}^j = \begin{Bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} \quad (38)$$

Donde Δ simboliza el cambio en la iteración "j" del vector de desplazamientos $\{U\}$.

Para elementos barra, donde únicamente obran efectos axiales, las matrices de rigidez tienen la siguiente estructura:

$$[K] = \left(\frac{EA}{L}\right) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$[K_G] = \left(\frac{T}{L}\right) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (40)$$

Donde E es el módulo de elasticidad del material, A es el área de la sección transversal del cada elemento, L es la longitud del elemento y T es la fuerza axial interna, valor que se asocia naturalmente al presfuerzo del sistema. La fuerza interna T corresponde al presfuerzo de los elementos cable y su valor inicial, en el elemento i, corresponde directamente con el componente i del vector $\{TF\}$, obtenido en el proceso de búsqueda de forma en equilibrio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Forma y fuerzas en equilibrio

Una vez definida la conectividad del sistema tensegrity (sección 2.1) se elaboró la matriz de equilibrio [A] mediante la Ecuación 17. Se evaluó la cantidad de estados de presfuerzo independientes con la Ecuación 4 que para este caso corresponde a $s=3$. Posteriormente se realizó la primera DVS a la matriz de equilibrio y se designó a los últimos 3 vectores de la matriz [W] como la matriz de MPI [T]. Al agrupar los elementos de simetría equivalentes y reexpresar el sistema de acuerdo con las Ecuaciones 22 a 26, se obtiene la matriz [P], la cual se factorizará con la técnica DVS. El número de modos de pretensado integral, evaluado con la Ecuación 32, es igual a $s'=3$. Lo que sugiere la existencia de 3 modos de pretensado integral. Las 3 últimas columnas de la matriz [W'] se denominarán como la matriz [TP]. Mediante la combinación lineal de los de la matriz [TP] con una matriz canónica, de acuerdo con lo establecido en la Ecuación 33, se obtienen 3 vectores (matriz [TF]), de los cuales el primer vector cumple con las condiciones de unilateralidad. Este vector corresponde al MPO.

Los resultados obtenidos de cada uno de los modos de pretensado del sistema tensegrity en estudio se muestran en la Tabla 3. El proceso anterior se llevó a cabo de manera iterativa modificando las coordenadas nodales hasta que cumplieran las condiciones de equilibrio, simetría y unilateralidad, requeridas por el procedimiento de BFF.

Las coordenadas resultantes se muestran en la Tabla 4.

Ya que un valor singular corresponde a la raíz cuadrada de un valor característico, es necesario calcular la norma del primer vector de la matriz [TF], la cual corresponde al MPO. Este vector normalizado corresponde a los valores de presfuerzo resultantes del proceso de BFF y se muestra en la Tabla 5.

Tabla 3. Modos de pretensado del módulo "X-T"

Modos de pretensado independiente [T]			Modos de pretensado integral [TP]			Modos factibles de pretensado integral [TF]		
0.000	0.000	-0.566	-0.407	-0.485	0.315	-0.327	0.198	-0.118
-0.012	0.025	-0.449	-0.012	-0.378	-0.598	-0.264	0.160	-0.075
-0.534	0.052	-0.062	-0.578	0.349	-0.209	-0.252	-0.218	0.186
-0.483	-0.238	-0.001	0.327	-0.198	0.118	-0.200	-0.324	0.010
-0.197	0.394	-0.096	0.264	-0.160	0.075	-0.130	0.087	0.277
-0.075	0.149	0.306	0.252	0.218	-0.186	0.148	-0.087	0.176
-0.057	0.114	0.330	0.200	0.324	-0.010	0.169	-0.100	0.155
-0.109	0.218	0.320	0.130	-0.087	-0.277	0.143	-0.082	0.231
-0.043	0.085	0.326	-0.148	0.087	-0.176	0.172	-0.103	0.133
0.231	0.234	-0.023	-0.169	0.100	-0.155	0.084	0.208	0.062
0.316	0.196	-0.007	-0.143	0.082	-0.231	0.127	0.230	0.016
0.312	0.205	-0.010	-0.172	0.103	-0.133	0.124	0.232	0.023
0.255	0.275	-0.029	-0.084	-0.208	-0.062	0.090	0.237	0.078
0.069	-0.138	0.121	-0.127	-0.230	-0.016	0.096	-0.061	-0.079
0.122	-0.245	0.140	-0.124	-0.232	-0.023	0.128	-0.082	-0.156
0.124	-0.248	-0.021	-0.090	-0.237	-0.078	0.035	-0.026	-0.192
0.100	-0.201	-0.025	-0.096	0.061	0.079	0.024	-0.019	-0.157
0.131	-0.353	0.081	-0.128	0.082	0.156	0.096	-0.098	-0.235
0.106	-0.325	0.074	-0.035	0.026	0.192	0.082	-0.097	-0.212
0.082	-0.057	0.019	-0.024	0.019	0.157	0.044	0.012	-0.056
0.090	-0.072	0.023	-0.096	0.098	0.235	0.049	0.009	-0.067
0.031	-0.061	0.015	-0.082	0.097	0.212	0.020	-0.014	-0.043
0.038	-0.077	0.019	-0.044	-0.012	0.056	0.026	-0.017	-0.054
0.075	-0.150	0.036	-0.049	-0.009	0.067	0.050	-0.033	-0.105
0.061	-0.122	0.030	-0.020	0.014	0.043	0.040	-0.027	-0.086
0.043	-0.087	0.021	-0.026	0.017	0.054	0.029	-0.019	-0.061
0.050	-0.101	0.025	-0.050	0.033	0.105	0.033	-0.022	-0.071
-	-	-	-0.040	0.027	0.086	-	-	-
-	-	-	-0.029	0.019	0.061	-	-	-
-	-	-	-0.033	0.022	0.071	-	-	-

Dada la indeterminación estática de los sistemas tensegrity, al formular la matriz de equilibrio [A], se obtiene como resultado una matriz rectangular, por lo que no es posible obtener una solución directa al aplicar técnicas convencionales, tales como la generación del polinomio característico para la obtención de los valores y vectores característicos.



Tabla 4. Coordenadas nodales resultantes del procedimiento de búsqueda de forma.

NÚMERO DE NODO	COORDENADAS			NÚMERO DE NODO	COORDENADAS		
	X	Y	Z		X	Y	Z
1	0.000	0.000	0.000	6	2.800	2.300	0.000
2	0.000	3.800	3.800	7	2.261	-0.829	2.500
3	0.200	0.000	3.900	8	2.261	4.829	2.500
4	0.200	4.000	0.000	9	-1.300	2.200	2.000
5	1.336	2.000	5.464	10	3.613	2.200	3.146

Tabla 5. Coeficientes de presfuerzo resultantes del proceso de búsqueda de forma.

NÚMERO DE ELEMENTO	PRESFUERZO (KN)										
1	-9.807	6	4.440	11	3.791	16	1.052	21	1.470	26	0.864
2	-7.918	7	5.074	12	3.712	17	0.720	22	0.609	27	1.002
3	-7.563	8	4.291	13	2.709	18	2.875	23	0.764	-	-
4	-5.991	9	5.166	14	2.880	19	2.449	24	1.487	-	-
5	-3.908	10	2.508	15	3.830	20	1.312	25	1.210	-	-

Sin embargo, mediante la aplicación de la técnica DDVS se obtiene una solución numérica (aproximada) del sistema de ecuaciones

de equilibrio. La Figura 10 muestra un esquema de los resultados del proceso de BFF del módulo "X-T".

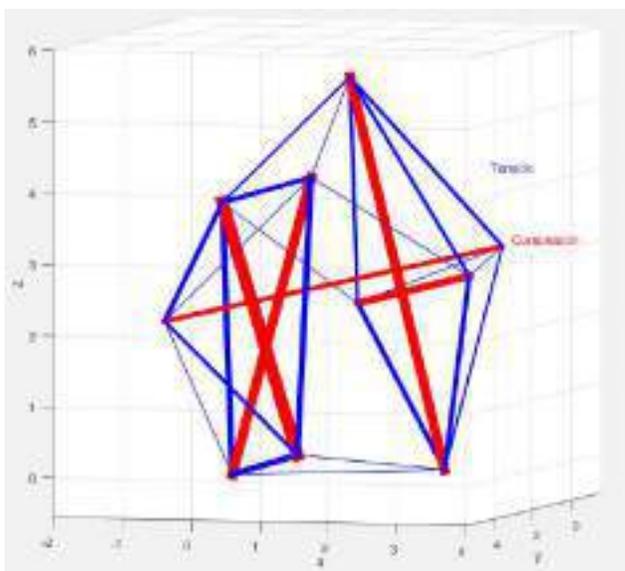


Figura 10. Esquema del presfuerzo resultante del proceso de búsqueda de forma y fuerzas del módulo "X-T"

Análisis estático no lineal

La configuración espacial del módulo "X-T" y el valor de presfuerzo inicial obtenidos del proceso de búsqueda de forma son los parámetros iniciales para realizar el análisis estático no lineal.

Las características mecánicas de los materiales empleados para el análisis estructural se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Características mecánicas de los materiales.

PROPIEDADES	ELEMENTOS BARRA	ELEMENTOS CABLE
NORMATIVA ASTM	A500 GR 42	A586 CLASE A
MÓDULO DE ELASTICIDAD (MPa)	200 000	165474.2
ESFUERZO DE FLUENCIA (MPa)	289	7129
ESFUERZO PROMEDIO DE RUPTURA (MPa)	400	10458

Empleando el programa computacional SAP2000 que aplica el método de elementos finitos (ver sección 5), se analizaron 2 combinaciones diferentes de las condiciones de apoyo del sistema para los nodos 1, 4 y 6. Los grados de libertad (GL) de los 3 nodos asociados a los giros se mantuvieron libres en todos los casos. Para el nodo 1 se restringieron los GL asociados a los desplazamientos tanto para el caso 1 como para el caso 2. La Tabla 7 muestra las condiciones de apoyo de los nodos, donde u_x , u_y y u_z son los desplazamientos en las direcciones X, Y y Z, respectivamente.

Tabla 7. Combinaciones de las condiciones de apoyo.

Nodo	Caso 1			Caso 2		
	u_x	u_y	u_z	u_x	u_y	u_z
1	Restringido	Restringido	Restringido	Restringido	Restringido	Restringido
4	Libre	Libre	Restringido	Restringido	Libre	Restringido
6	Libre	Libre	Restringido	Restringido	Libre	Restringido

La convergencia del análisis no lineal se obtuvo en un total de 10 pasos o iteraciones. La importancia de la implementación de un

proceso de BFF radica en que se asegura el equilibrio del sistema y la convergencia del análisis no lineal, y además se reduce la cantidad de iteraciones necesarias para encontrar la solución. Los desplazamientos de los nodos de apoyos resultantes para cada uno de los casos se aprecian en la Tabla 8 y en la Figura 11.

Tabla 8. Desplazamiento de los nodos de apoyo

Nodo	Caso 1		Caso 2	
	u_x (m)	u_y (m)	u_x (m)	u_y (m)
4	-4.086	0.2049	0	0.004
6	-2.349	2.860	0	0.003

Figura 11. Desplazamientos nodos, vista en planta.

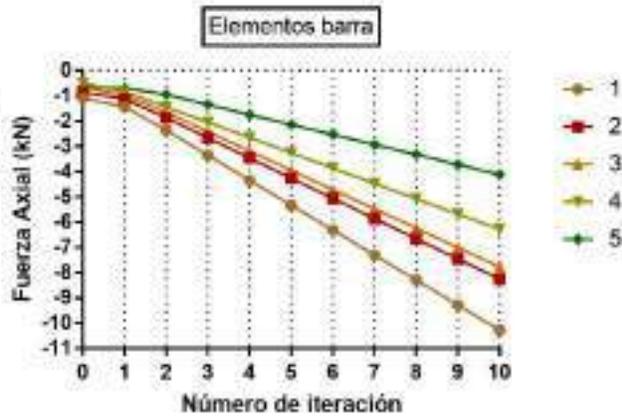
Dado que el módulo va a ser implementado en una pasarela peatonal, se seleccionará la configuración de grados de libertad del caso 2, cuyos desplazamientos son menores a 1 cm. Para el caso 1, los desplazamientos son excesivos y se desfasan del área de la pasarela, por lo que se descartará de este análisis. El desplazamiento máximo para el caso 2 se da en el nodo 7, con un valor de -0.48 cm en la dirección X. Sin embargo, no se altera de manera significativa el área designada para el paso peatonal. Las coordenadas resultantes del análisis no lineal se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Coordenadas nodales resultantes del análisis no lineal. Caso 2.

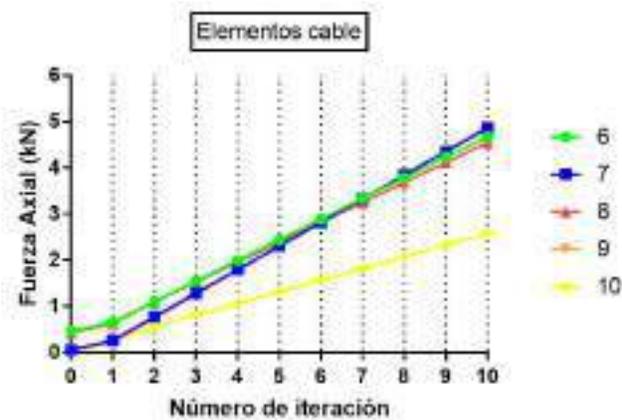
Número de nodo	Coordenadas			Número de nodo	Coordenadas		
	X	Y	X		X	Y	Z
1	0.000	0.000	0.000	6	2.800	2.300	0.000
2	-0.004	3.801	3.799	7	2.256	-0.828	2.498
3	0.196	0.000	3.899	8	2.284	4.877	2.525
4	0.200	4.000	0.000	9	-1.302	2.200	1.998
5	1.332	2.000	5.463	10	3.610	2.200	3.146



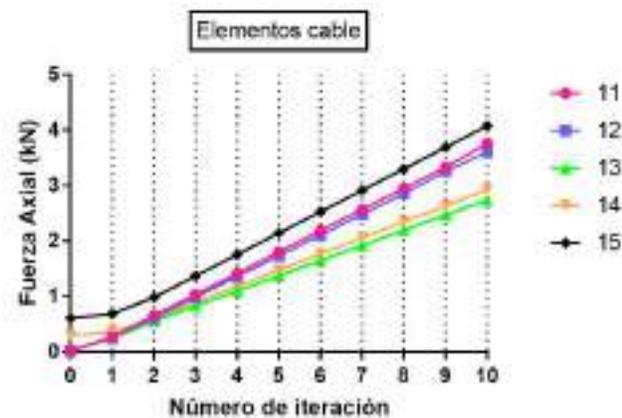
La variación de las fuerzas internas, que se presentan para los elementos del ensamble en cada una de las iteraciones del análisis no lineal, se muestra en las Figuras 12.a, 12.b, 12.c, 12.d y 12.e.



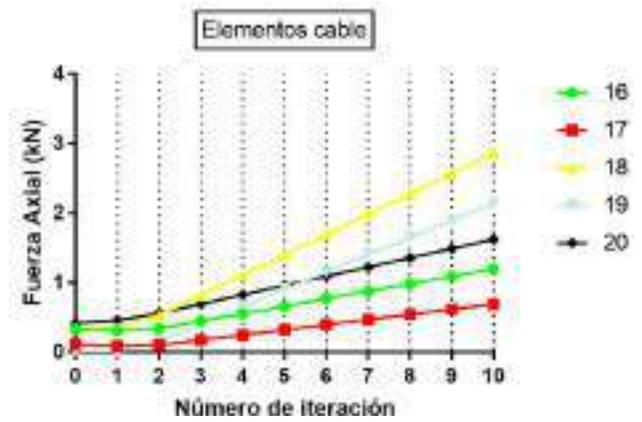
a)



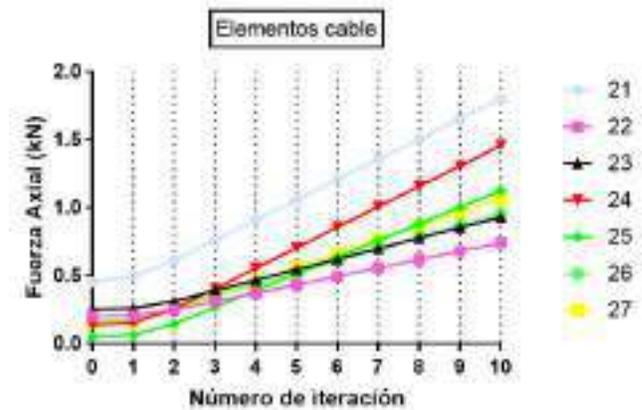
b)



c)



d)



e)

Figura 12. Fuerza axial en elementos barra y cable durante para cada iteración del método Newton-Raphson.

La variación máxima de fuerza axial debido a los efectos del peso propio del sistema para los elementos barra se presenta en el elemento 1, donde se presenta un incremento de 0.462 kN, equivalente a un incremento relativo de 4.71%. En los elementos cable, el incremento máximo ocurre en el elemento 21, con un valor de 0.331 kN, correspondiente a un incremento relativo de 22.52%.

Acoplamiento de sistemas y diseño estructural

El diseño a compresión de los elementos barra se realizó considerando el manual AISC para el diseño y la construcción en acero. La resistencia de diseño de dichos elementos se define como la resistencia nominal reducida por un factor de resistencia (ϕ), cuyo valor es 0.85.

Tabla 10. Coeficientes de presfuerzo resultantes del análisis no lineal.

Número de elemento	Presfuerzo de BFF (kN)	Presfuerzo de ANL (kN)	Número de elemento	Presfuerzo de BFF (kN)	Presfuerzo de ANL (kN)	Número de elemento	Presfuerzo de BFF (kN)	Presfuerzo de ANL (kN)
1	-9.807	-10.269	11	3.791	3.761	21	1.470	1.801
2	-7.918	-8.253	12	3.712	3.606	22	0.609	0.742
3	-7.563	-7.769	13	2.709	2.74	23	0.764	0.931
4	-5.991	-6.281	14	2.880	2.928	24	1.487	1.459
5	-3.908	-4.116	15	3.830	4.078	25	1.210	1.126
6	4.440	4.667	16	1.052	1.198	26	0.864	0.959
7	5.074	4.861	17	0.720	0.692	27	1.002	1.069
8	4.291	4.546	18	2.875	2.862	-	-	-
9	5.166	4.895	19	2.449	2.149	-	-	-
10	2.508	2.583	20	1.312	1.624	-	-	-

Sin embargo, dado que el principio de estructuración de los sistemas tensegrity únicamente considera efectos axiales, se debe asegurar que los elementos mantengan una relación de esbeltez menor a 200 para evitar posibles efectos de flexión en los elementos. Considerando únicamente la resistencia ante cargas axiales, para todos los elementos barra se propone una sección redonda con diámetro de 60 mm, con espesor de pared de 3.9 mm, área de 690.3 mm² y radio de giro de 20.04 mm. Sin embargo, la longitud de esbeltez de estos elementos es mayor que 200. Por lo tanto, se necesita una sección para cumplir esta condición de 88.9 mm, con espesor de pared de 5.5 mm, área de 1438.7 mm² y radio de giro 29.55 mm.

Para el caso presentado en esta investigación, sólo se consideraron los efectos del presfuerzo y del peso propio de los elementos. El diseño a tensión de los elementos cable del módulo "X-T" se llevó a cabo considerando la combinación de carga 1 de la normativa ASCE/SEI 19-10, en la cual se consideran únicamente las cargas originadas por el peso propio y las fuerzas internas generadas por el presfuerzo, incrementadas por un factor de 2.2. La resistencia de diseño de los cables se define como la resistencia nominal del cable, dato proporcionado por el fabricante, reducida, ya sea por el factor de ajuste N_f o por el factor deflector N_d . La

resistencia de diseño debe ser mayor o igual que el esfuerzo generado por la combinación de carga factorizada.

La sección requerida por diseño estructural del módulo "X-T" para los elementos a tensión es un cable de diámetro 9.5 mm, sin embargo, la normativa ASTM A586 define secciones comerciales con diámetro mínimo de 12.7 mm.

El modelado matemático de las estructuras tensegrity, mediante programas computacionales desarrollados para el área de la ingeniería civil estructural, presenta una limitante relacionada al acoplamiento entre las condiciones de frontera de un sistema estructural A, con un sistema B. Específicamente, en el presente caso, las condiciones de frontera de los nodos de apoyo del módulo "X-T", relacionadas con los grados de libertad libres y restringidos al movimiento, no presentan una compatibilidad directa con los nodos de la triditrabe donde se llevará a cabo la unión entre sistemas.

El acoplamiento de dichos sistemas de este trabajo consistió en identificar las reacciones nodales máximas del módulo "X-T", que se transmiten a los nodos de la triditrabe. Dichas reacciones se muestran en la Tabla 11 y en la Figura 13.



Tabla 11. Reacciones en los nodos de apoyo del módulo "X-T" generados por el peso propio y los efectos del presfuerzo.

Nodo	R _x (N)	R _z (N)
1	-82.27	1223.91
4	-111.31	1082.56
6	193.58	1480.35

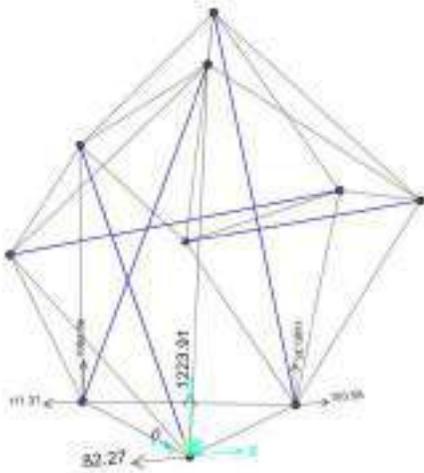


Figura 13. Reacciones en los nodos de apoyo del módulo "X-T" generados por el peso propio y los efectos del presfuerzo (N).

Estas reacciones nodales incluyen el peso de la estructura "X-T" y los efectos asociados a los presfuerzos inducidos en el sistema. En la dirección global Y, no se generaron reacciones, ya que la estructura tiene libertad de movimiento en esta dirección.

Para incluir estos efectos en el modelo de la triditrabe, las reacciones nodales se tradujeron a fuerzas puntuales aplicadas en los nodos de la triditrabe, y en el caso de las reacciones en la dirección vertical (R_z) se llevó a cabo un cambio de sentido en la dirección de la fuerza.

De esta manera, el análisis del sistema triditrabe, se realizó mediante un modelo independiente al del sistema tensegrity, donde se incluyen los efectos producidos por el módulo "X-T". Adicionalmente, se consideraron las cargas mencionados en el apartado 2.2. Para el análisis y diseño se siguió la normativa AASHTO [29] y las "Especificaciones

Guía para el Diseño de Puentes Peatonales LRFD-2009" [15]. La evaluación de deflexiones se realizó con la combinación de servicio 1, donde la deflexión máxima permisible es L/360, que es igual a 0.077 m. La deflexión máxima actuante en el sistema triditrabe es de 0.0189 m (Figura 14), ubicada al centro del claro.

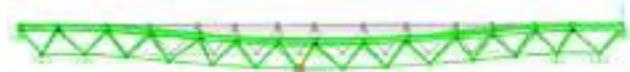


Figura 14. Vista longitudinal del sistema triditrabe de flexión máxima.

El dimensionamiento ante cargas gravitacionales se llevó a cabo considerando la combinación de fuerza 1, de la normativa AASHTO, donde las cargas por peso propio se factorizaron por 1.25, mientras que la carga viva se factorizó por 1.75. La fuerza axial rige el comportamiento del sistema triditrabe y el valor máximo a compresión se dan en los extremos de la cuerda inferior del sistema, con una magnitud de 424 kN, mientras que el valor máximo bajo fuerza axial de tensión se da al centro de la cuerda inferior, cuyo valor es de 275 kN. Los elementos que componen el sistema triditrabe se proponen de sección circular hueca, con un diámetro de 0.1016 m y un espesor de pared de 0.00953 m. Los elementos más esforzados trabajarán a un 80% de su capacidad última. Las fuerzas actuantes se muestran en la Figura 15.



Figura 15. Vista longitudinal del sistema triditrabe, fuerzas axiales actuantes.

El sistema portante de la losa "W" se rige principalmente por esfuerzos de flexo-compresión. La carga axial máxima es de 34 kN a compresión, mientras que el momento flexionante máximo es de 8.92 kN/m. Los elementos propuestos para el sistema portante de la losa son de sección rectangular

hueca, con un ancho y un peralte de 0.1524 m, y un espesor de pared de 0.00953 m. Esta sección trabaja a un 15% de su capacidad, pero se requieren estas dimensiones por cuestiones constructivas.

En las Figuras 16, 17 y 18 se muestra el acoplamiento resultante del sistema de soporte del puente peatonal con 5 módulos tensegrity, separados a una distancia de 6.0 m entre ellos.

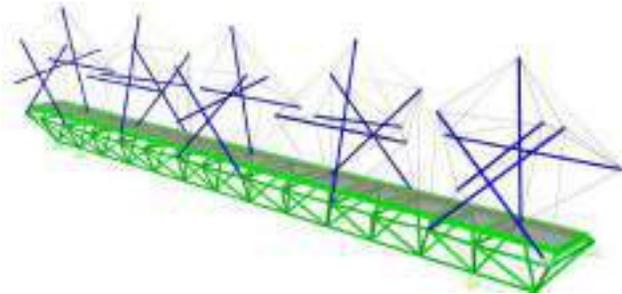


Figura 16. Vista en perspectiva del puente peatonal.

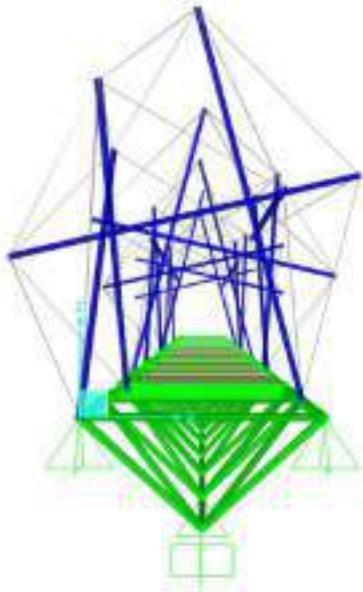


Figura 17. Vista en transversal del puente peatonal.

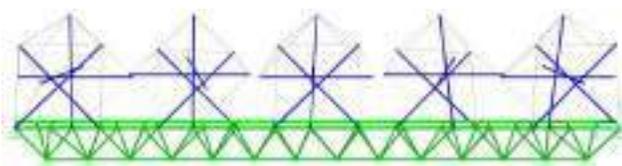


Figura 18. Vista en longitudinal del puente peatonal.

CONCLUSIONES

Se aplicó un método de búsqueda de forma y de fuerzas en equilibrio, basado en la doble descomposición de valores singulares para definir un módulo *tensegrity* que cumpla con restricciones geométricas predefinidas. Este método resulta factible para estructuras *tensegrity* en las que se requiere mantener una posición espacial definida, sin embargo, requiere de múltiples iteraciones para definir un sistema de coordenadas nodales con las que se cumplan las condiciones de equilibrio, simetría y de unilateralidad.

Mediante el análisis no lineal se definió la combinación de los grados de libertad adecuados para acoplar el sistema *tensegrity* al sistema de tridilosa. Restringir los grados de libertad en la dirección vertical (dirección Z) y en la dirección transversal (dirección X) reduce los desplazamientos de la base del módulo "X-T" con lo que se preserva el área interna designada al paso peatonal, y además permite que el sistema distribuya las fuerzas internas de manera uniforme y que el ensamble continúe trabajando de acuerdo con los principios mecánicos de las estructuras *tensegrity*, es decir, que los elementos barra trabajen únicamente a compresión y los cables bajo fuerzas de tensión.

El procedimiento propuesto para acoplar la estructura *tensegrity* "X-T" en la triditrabe permitió generar un modelo simplificado, a partir del cual se pueden conocer las fuerzas axiales y los desplazamientos, que se generan sobre el sistema triditrabe.

La estructura resultante brinda la pauta para desarrollar trabajos futuros, donde mediante el acoplamiento mecánico de sistemas *tensegrity* se mejoren las características estructurales de sistemas convencionales de construcción.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo durante toda esta investigación.



REFERENCIAS

- [1] L. Rhode-Barbarigos, N. B. Hadj Ali, R. Motro, and I. F. C. Smith, "Designing tensegrity modules for pedestrian bridges," *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 4, pp. 1158-1167, 2010.
- [2] R. Motro, V. Raducanu, and R. B. Fuller, "Tensegrity Systems," *International Journal of Space Structures*, vol. 18, no. 2, pp. 77-84, 2003.
- [3] J. Y. Zhang and M. Ohsaki, *Tensegrity Structures*. 2015.
- [4] V. Jáuregui Gómez, "Tensegrity Structures and their Application to Architecture," pp. 1-239, 2004.
- [5] Columbia University, "Olympic Domes First of Their Kind," *Engineering News Record*, 1986. [Online]. Available: <https://www.columbia.edu>.
- [6] J. De Boeck, "Tensegrity bridges," Delft. University of Technology, 2013.
- [7] P. Van Stenis, "Stokkenbrug." [Online]. Available: <https://twitter.com/pjvs66/status/768537589884317696>.
- [8] Cox Architecture, "Kurilpa Bridge," 2010. [Online]. Available: <http://www.coxarchitecture.com.au/project/kurilpa-pedestrian-bridge/>.
- [9] L. Rhode-Barbarigos, N. B. Hadj Ali, R. Motro, and I. F. C. Smith, "Tensegrity modules for pedestrian bridges," *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 4, pp. 1158-1167, 2010.
- [10] L. Rhode-Barbarigos, H. Jain, P. Kripakaran, and I. F. C. Smith, "Design of tensegrity structures using parametric analysis and stochastic search," *Eng. Comput.*, vol. 26, no. 2, pp. 193-203, 2010.
- [11] N. Bel Hadj Ali, L. Rhode-Barbarigos, A. A. Pascual Albi, and I. F. C. Smith, "Design optimization and dynamic analysis of a tensegrity-based footbridge," *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 11, pp. 3650-3659, 2010.
- [12] J. I. Cobos, "Tensegridad como sistema estructural alternativo aplicado a puentes peatonales," UNIVERSIDAD DE CUENCA, 2018.
- [13] R. Lorenzo S., B. Arcos R., J. A. Escobar S., and Gómez M. Roberto, "Comportamiento estructural de una piña de un puente tridilosa," Ciudad de México, México.
- [14] J. Y. Zhang and M. Ohsaki, *Tensegrity Structures*.
- [15] AASHTO, *LRFD GUIDE SPECIFICATIONS FOR THE DESIGN OF PEDESTRIAN BRIDGES*. 2009, p. 40.
- [16] M. Schenk, "Statically Balanced Tensegrity Mechanisms," 2005.
- [17] S. Pellegrino, "Mechanics of kinematically indeterminate structures," University of Cambridge, 1986.
- [18] S. Pellegrino and C. R. Calladine, "Matrix analysis of statically and kinematically indeterminate frameworks," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 22, pp. 409-428, 1985.
- [19] G. Gomez Estrada, H. J. Bungartz, and C. Mohr dieck, "Numerical form-finding of tensegrity structures," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 43, no. 22-23, pp. 6855-6868, 2006.
- [20] a G. Tibert and S. Pellegrino, "Review of Form-Finding Methods for Tensegrity Structures," vol. 18, no. 4, pp. 209-223, 2003.
- [21] H. J. Schek, "The force density method for form finding and computation of general networks," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 115-134, 1974.
- [22] X. Yuan, L. Chen, and S. Dong, "Pre-stress design of cable domes with new forms," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 44, no. 9, pp. 2773-2782, 2007.
- [23] G. Gomez Estrada, "Analytical and numerical investigations of form-finding methods for tensegrity structures," p. 152, 2007.
- [24] S. Pellegrino, "Structural computations with the singular value decomposition of the equilibrium matrix," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 30, no. 21, pp. 3025-3035, 1993.
- [25] S. Pellegrino, "Structural computations with the singular value decomposition of the equilibrium matrix," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 30, no. 21, pp. 3025-3035, 1993.
- [26] L. A. Ochoa Peralta and P. F. Orellana Ochoa, "Tensegridad como sistema estructural alternativo aplicado a cubiertas," Universidad de Cuenca, 2017.
- [27] K. Kebiche, M. N. Kazi-Aoual, and R. Motro, "Geometrical non-linear analysis of

tensegrity systems," *Eng. Struct.*, vol. 21, no. 9, pp. 864–876, 1999.

[28] R. D. Cook, D. S. Malkus, M. E. Plesha, and R. J. Witt, *Concepts and Applications of Finite Element Analysis.pdf*. 2002.

[29] AASHTO LRFD, *Bridge Design Specifications (SI)*, no. September. 2005.

DISMINUCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA POR MEDIO DE UNA SÍLICE CON PORO- SIDAD JERÁRQUICA IMPREGNADA CON NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO FÉRRICO

Arsenic decrease in water using a hierarchical porous silica impregnated with iron oxide nanoparticles

Viviana Palos Barba^{1*}, Rufino Nava¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro

*Autora de correspondencia
vpalos20@alumnos.uaq.mx

RESUMEN

Se investigó la influencia de una sílice con porosidad jerárquica SPJ-V1 impregnada con nanopartículas de Fe_2O_3 para la adsorción de iones de arsénico III y V en solución acuosa. La SPJ-V1 se preparó por el método sol-gel, utilizando tetraetilortosilicato (TEOS) como fuente de sílice, y polietilenglicol (PEG) y el surfactante catiónico cetil trimetil bromuro de amonio (CTAB) como agentes directores de las mesoestructuras (porosidad jerárquica). La incorporación de las nanopartículas de Fe_2O_3 en la superficie interna de los poros de la SPJ-V1 se realizó por el método de impregnación de llenado de poros, empleando nitrato de hierro (III) como precursor del Fe_2O_3 . Con el propósito de encontrar la concentración óptima de Fe_2O_3 , éste se incorporó en tres concentraciones diferentes: 2, 3 y 5% en peso. Los adsorbentes que manifestaron las más altas capacidades de adsorción de iones de arsénico III y V fueron los que se prepararon con las más altas cargas de Fe_2O_3 : 3 y 5% en peso. Los adsorbentes se caracterizaron mediante isothermas de adsorción-desorción de N_2 a 77 K, difracción de rayos X (XRD), espectroscopía de reflectancia difusa (DRS) en el rango UV-Vis, espectroscopía micro-Raman y microscopía electrónica de barrido (SEM). Independientemente de la carga de Fe_2O_3 , todas las muestras de xFe-SPJ-V1 sintetizadas presentaron mayores capacidades de adsorción de los iones de As III y (V) en comparación con la SPJ-V1 pura.

Palabras clave: adsorción, arsénico, porosidad jerárquica, sílice, óxido férrico

ABSTRACT

The influence of the impregnation of Fe_2O_3 nanoparticles on a hierarchical porous silica SPJ-V1 for the adsorption of arsenic ions (III) and (V) in an aqueous solution was investigated. The SPJ-V1 material was prepared by a sol-gel method, using tetraethyl orthosilicate

(TEOS) as the source of silica; polyethylene glycol (PEG) and the cationic surfactant cetyl trimethyl ammonium bromide (CTAB) as directing agents for the mesostructures (hierarchical porosity). The incorporation of Fe_2O_3 nanoparticles on the internal surface of the SPJ-V1 pores was made through the pore-filling impregnation method, using iron (III) nitrate as the Fe_2O_3 precursor. In order to find the optimal concentration of Fe_2O_3 , it was incorporated in three different amounts (2, 3 and 5 wt%). The adsorbents were characterized by adsorption-desorption N_2 at 77 K isotherms, X-ray diffraction (XRD), diffuse reflectance spectroscopy (DRS) in the UV-Vis range, micro-Raman spectroscopy and scanning electronic microscopy (SEM). Regardless of the amount of Fe_2O_3 , all xFe-SPJ-V1 samples synthesized showed higher adsorption capacities for the As (III) and (V) ions than the pure SPJ-V1.

Keywords: adsorption, arsenic, hierarchical porosity, silica, iron oxide

INTRODUCCIÓN

El arsénico es un metaloide que se encuentra ampliamente distribuido en la corteza terrestre. Este elemento puede existir de manera natural en suelos y aguas subterráneas, pero las fuentes antropogénicas han aumentado sus niveles en los cuerpos de agua, afectando de manera severa la salud de la población [1]. Las especies inorgánicas lo hacen altamente contaminante principalmente en su forma trivalente As (III) y pentavalente As (V). El consumo de agua con altas concentraciones de arsénico ha generado un problema serio de salud pública a nivel mundial en países como Bangladesh, Chile, Estados Unidos, India, México y Sri Lanka, entre otros [2]. Por lo tanto, la Organización Mundial de la Salud ha establecido un límite máximo permisible de 0.01 mg/L [3], mientras que la industria y la academia trabajan en el desarrollo de métodos que ayuden a disminuir la concentración del metal en los cuerpos de agua.



Existen diversas técnicas de remoción de arsénico del agua como son los procesos de oxidación, coagulación-precipitación, filtración, adsorción e intercambio iónico [4]. Sin embargo, la mayoría de esos métodos muestran inconvenientes como la producción de lodos, la necesidad de complementar el proceso con otra técnica o los bajos rendimientos obtenidos. Lo anterior no sucede con el método de adsorción, proceso mediante el cual un compuesto se concentra en la superficie de otro material, ya que al emplearlo con materiales nanoestructurados altamente porosos se ubica como una buena alternativa debido a su eficiencia y bajo costo [5]. Materiales de sílices mesoporosos representan una buena opción para procesos de eliminación de iones de metales pesados de aguas residuales a través de la técnica de adsorción, debido a sus adecuadas propiedades texturales, sus altas áreas superficiales e ideales diámetros y volúmenes de poro, lo cual ha permitido incrementar la eficiencia en la adsorción de metales pesados [6]. La remoción de arsénico en agua por medio de adsorción requiere de un proceso que involucre materiales con dos características muy importantes: gran área superficial y agentes con afinidad o atracción de cargas hacia los iones de As.

En el presente trabajo se evalúa el empleo de sílices con porosidad jerárquica, decoradas con óxido férrico, debido a su gran afinidad al As y bajo costo, para efectuar una adsorción de iones de arsénico (III) y (V) y lograr la remoción de dichos iones en aguas subterráneas.

METODOLOGÍA

Síntesis del soporte de sílice con porosidad jerárquica

La síntesis del material SPJ-V1 se llevó a cabo mediante el método sol-gel. Como agente director de la estructura se empleó polietilenglicol PEG (J.T. Baker), el cual fue

disuelto en una solución acuosa de ácido nítrico HNO_3 (65.6%, J.T. Baker). Posterior a la disolución, fue adicionado tetraetilortosilicado TEOS (98%, Aldrich) como precursor de sílice, la solución se mantuvo en agitación constante y a temperatura ambiente hasta la obtención de una solución clara. Para promover la producción de mesoporos se añadió el surfactante cetil trimetil bromuro de amonio CTAB (99%, Aldrich). Los reactivos empleados TEOS: HNO_3 : H_2O :PEG:CTAB cumplieron una relación molar de 1.00:0.25:14.69:0.62:0.09. Una vez obtenida la solución clara, ésta fue colocada en parrilla a 40 °C sin agitación para dar inicio al periodo de formación del gel, dicho periodo tuvo una duración de 30 h. Transcurrido este tiempo, se elevó la temperatura del material a 60 °C y permaneció así por 20 h adicionales para conseguir su maduración. Enseguida, el material fue conservado en una solución 1 M de hidróxido de amonio NH_4OH a punto de ebullición por un periodo de 6 h con la finalidad de obtener poros internos de gran superficie. Posteriormente, la muestra fue acidificada con una solución 0.1 M de ácido nítrico y lavada con etanol al 25%. Una vez que el material se secó, fue molido para finalmente ser sometido a un proceso térmico donde se llevó a cabo un secado completo a 60 °C por 72 h y su calcinación por 5 h. La etiqueta para esta sílice con porosidad jerárquica fue SPJ-V1.

Incorporación del óxido férrico Fe_2O_3

La impregnación del material de soporte SPJ-V1 con nanopartículas de óxido férrico Fe_2O_3 se realizó empleando el método de llenado de poro, utilizando cloruro de hierro (III) hexahidratado $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ como fuente de Fe. Las cargas de Fe_2O_3 que se colocaron en el soporte correspondieron al 2, 3 y 5% en peso. Finalmente, las muestras impregnadas se sometieron a secado a una temperatura de 110 °C por 18 h y a calcinado a 500 °C por un tiempo de 4 h.

Remediación de arsénico As

Las pruebas para la adsorción del arsénico en las nanopartículas de óxido férrico se llevaron a cabo preparando soluciones acuosas con una concentración de 200 ppm de As a partir de una solución estándar de arsénico de 1000 ppm (Karal). A estas soluciones se les agregó 0.1 g de adsorbente ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SPJ-V1}$ 2, 3 y 5 %) manteniendo un tiempo de contacto de 1 h con agitación constante y vigorosa a temperatura ambiente, con pH de 5 (pH natural de la solución). Transcurrido el tiempo de contacto, la mezcla pasó a filtrado en embudo y papel filtro para separar el sólido (adsorbente). La cuantificación de la concentración de iones de arsénico total (III y V) previo y posterior a la adsorción se realizó por espectroscopía de emisión atómica por plasma inductivamente acoplado (ICP-AES, Perkin Elmer Optima 3300DV).

Métodos de caracterización

Caracterización del soporte de sílice con porosidad jerárquica SPJ-V1

Las propiedades texturales del material se determinaron a partir de las isothermas de adsorción de N_2 a 77 K empleando un soratómetro autosorb@iQ2 (Quantachrome Instruments). Los resultados de estos análisis nos permitieron conocer la distribución de tamaño de poro, el área superficial y el volumen de poro. La microscopía electrónica de barrido (SEM) fue empleada para identificar la morfología del material de soporte.

Caracterización del adsorbente

La presencia de óxido férrico ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) soportado en la sílice con porosidad jerárquica se analizó mediante la técnica de Micro-Raman por medio de la respuesta vibrónica de los enlaces moleculares en las muestras. Estos análisis se realizaron con un espectrómetro Renishaw y un láser de 785nm. Las transiciones electrónicas de las partículas de

$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ se detectaron por espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis), con un espectrofotómetro CARY 5000 (VARIAN), y la cristalinidad de los adsorbentes se observó mediante la técnica de Difracción de Rayos X (DRX), con un difractorómetro de rayos-X D8 Advance (BRUKER).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de los adsorbentes

De acuerdo con la formación de poros propuesta por [7] la interacción entre los surfactantes CTAB y PEG con la fuente de sílice, el arreglo de poros supramolecular esperado en este material se muestra en la Figura 1, donde la sílice reaccionará primero con las micelas del CTAB para después agregarse gracias a las moléculas del PEG.

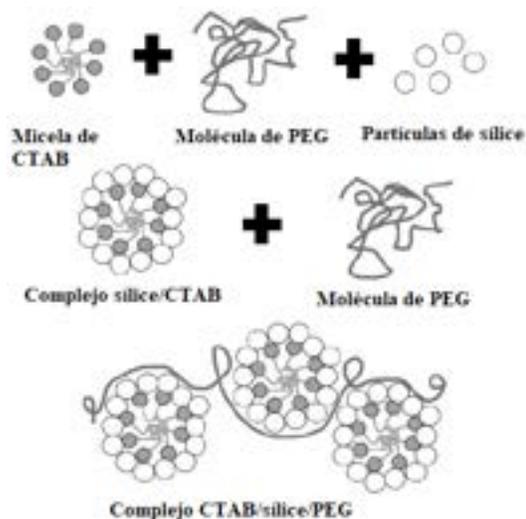


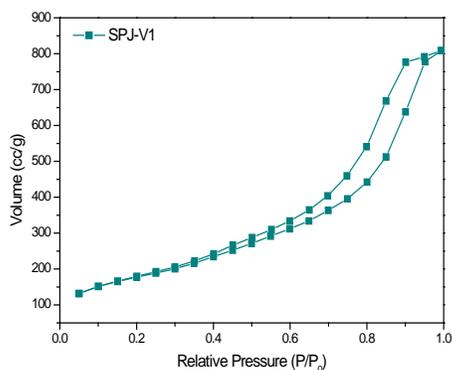
Figura 1. Representación de la propuesta de formación de porosidad jerárquica por los surfactantes. Fuente: modificada de Smatt, Schunk y Lindén [7]

t

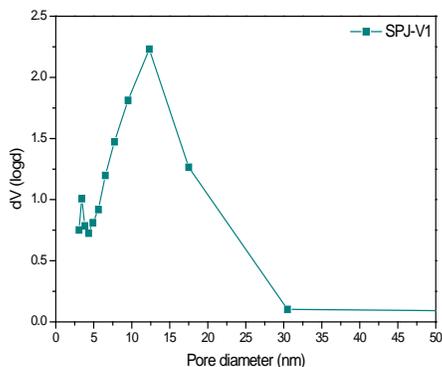
Las propiedades texturales de la sílice con porosidad jerárquica se determinaron mediante las isothermas de adsorción-desorción de nitrógeno a 77 K. En la Figura 2a se presenta la isoterma de adsorción-desorción de la SPJ-V1, en la cual, de acuerdo con la clasificación de la IUPAC, se aprecia una isoterma



de tipo IV con un ciclo de histéresis de tipo H3, que es característico de materiales compuestos por partículas porosas y con una distribución amplia en el tamaño de poro [8]. La distribución del tamaño de poro de la Figura 2b muestra la existencia de mesoporos de distintos tamaños en el soporte de sílice: el primero centrado en 3.41 nm con una distribución estrecha (3.05-3.83 nm) y el siguiente centrado en 12.3 nm con una amplia distribución (4.32-30.48 nm).



a)



b)

Figura 2. Propiedades texturales de la sílice con porosidad jerárquica: a) Isotherma de fisorción de N₂ y b) Distribución del tamaño de poro

El área superficial de la sílice con porosidad jerárquica SPJ-V1 se calculó en 588.18 m²/g, mientras que su volumen promedio de poro fue equivalente a 1.20 cm³/g. Los resultados anteriores demuestran claramente que la sílice obtenida muestra una distribución bimodal en el tamaño de poros, lo cual significa una sílice con porosidad jerárquica.

Microscopía electrónica de barrido SEM

Las micrografías de la sílice con porosidad jerárquica sintetizada en este trabajo como material de soporte SPJ-V1 se observan en la Figura 3. En ellas se pueden observar grandes aglomeraciones constituidas por partículas muy pequeñas, con morfología casi esférica y con una distribución uniforme en tamaño de aproximadamente de 50 nm. Además, se observan grandes cavidades (macroporosidad) que permitirán una alta difusión hacia el interior de los mesoporos de las partículas nanométricas.

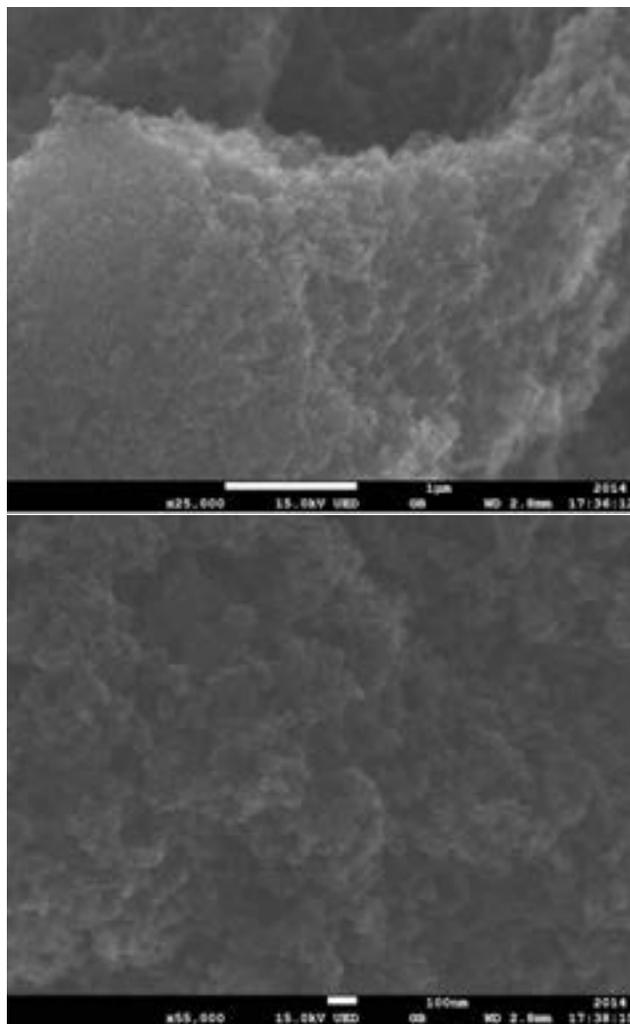


Figura 3. Micrografías SEM de la sílice SPJ-V1 con porosidad jerárquica

Caracterización de los adsorbentes

Espectroscopía micro-Raman

La sílice con porosidad jerárquica (SPJ-V1) pura y de los adsorbentes xFe-SPJ-V1 fue analizada por medio de espectroscopía micro-Raman y los resultados se pueden observar en la Figura 4. El espectro de micro-Raman de la sílice pura (SPJ-V1) presenta bandas en 156, 260, 398, 415, 498 y 602 cm^{-1} , las cuales se pueden asignar a las vibraciones del enlace Si-O-Si [9]. La banda en 638 cm^{-1} pertenece a los grupos silanoles Si-OH [9] [10].

Los espectros de micro-Raman de los adsorbentes con las diferentes cargas de Fe_2O_3 a 2, 3 y 5% en peso muestran las mismas bandas de la sílice pura y además presenta bandas en 226, 294 y 612 cm^{-1} que corresponden a la fase cristalina $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [11]. Se observa claramente que las intensidades de estas bandas se incrementan con el aumento en la carga de Fe_2O_3 , indicando a su vez un incremento en el tamaño de los cristalitas de Fe_2O_3 .

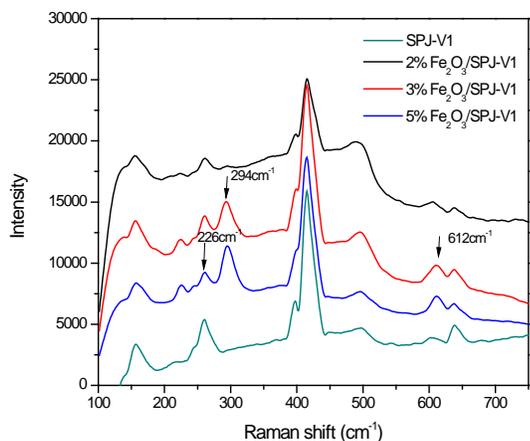


Figura 4. Espectros micro-Raman del soporte puro y los adsorbentes

Espectroscopía de reflectancia difusa DRS en el rango UV-Vis

Los materiales sintetizados en este trabajo fueron analizados a través de espectroscopía de reflectancia difusa, los espectros en el rango UV-Vis se muestran en la Figura 5. Los resultados claramente indican que la sílice pura (SPJ-V1) prácticamente no presenta absorción en el rango de estudio. Las muestras con Fe_2O_3 (xFe-SPJ-V1) mostraron altas intensidades de absorción. Las bandas centradas en aproximadamente 255 y 347 nm indican los iones de Fe^{3+} que corresponden a la fase cristalina del óxido férrico en la fase $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [12] [13] [14]. Las intensidades de absorción se incrementan con el contenido de Fe_2O_3 , indicando una mayor cantidad de partículas de Fe_2O_3 en la sílice. Además, se puede observar que al incrementar la carga de Fe_2O_3 la banda de absorción se desplaza a mayores longitudes de onda, indicando un crecimiento en el tamaño de la partícula de Fe_2O_3 .

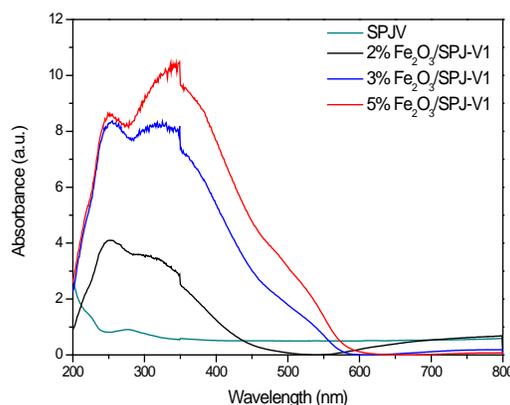


Figura 5. Espectros UV-Vis del soporte de sílice jerárquica y de los adsorbentes

Difracción de rayos X DRX

La técnica de DRX confirmó la presencia de $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ en el sustrato de sílice jerárquica. La Figura 6 muestra las reflexiones típicas asociadas al óxido férrico, centrados en 2θ a 32.9° [104], 35.4° [110], 40.6° [113], 49.3°



[024], 53.9° [116], 62.2° [214] y 63.8° [300] (JCPDS Tarjeta No. 33-664; [13] [14]). Los difractogramas dan a conocer que a mayor carga de óxido férrico los índices de Miller aparecen con mayor intensidad, lo cual indica que en la carga de 5% de Fe_2O_3 estas partículas tienen un tamaño superior a los 5 nm. Por otro lado, en las concentraciones más bajas a 2 y 3% Fe_2O_3 las partículas serán de aproximadamente 5 nm, por lo cual sus señales son débiles y casi indetectables.

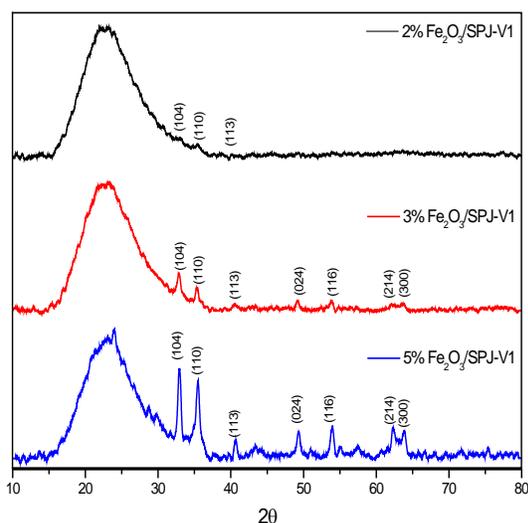


Figura 6. Difractogramas de los adsorbentes con diferentes cargas de óxido férrico

Remediación total de iones de arsénico As (III y V)

Para determinar la capacidad de adsorción de los adsorbentes preparados en este trabajo, se realizaron cuatro experimentos bajo las siguientes condiciones de adsorción: concentración de iones de As (III y V) en la solución inicial 200 ppm, temperatura de adsorción: 25°C , tiempo de contacto: 60 min y pH de la solución inicial: 5.

En la Figura 7 se presenta el porcentaje de adsorción de iones de arsénico (III y V) en función de la carga de Fe_2O_3 en los adsorbentes. La gráfica muestra que la sílice jerárquica pura (SPJ-V1) manifiesta una capacidad de adsorción de iones de As (III y V) de

hasta un 25%. Esta situación puede deberse a las propiedades texturales de la sílice con porosidad jerárquica preparada en este trabajo, la cual posee una gran área superficial (superior a $580\text{ m}^2/\text{g}$) y un gran volumen de poro ($1.2\text{ cm}^3/\text{g}$). En la Figura 7 se puede ver claramente que la presencia de Fe_2O_3 en la sílice SPJ-V1 mejora la capacidad de adsorción de iones de arsénico (III y V), lo que demuestra la alta afinidad química que tienen los iones de As (III y V) por el Fe_2O_3 . La capacidad de adsorción de los iones de As (III y V) por los diferentes adsorbentes sigue la tendencia: $3\text{Fe-SPJ-V1} > 5\text{Fe-SPJ-V1} > 2\text{Fe-SPJ-V1} \gg \text{SPJ-V1}$. El adsorbente que manifestó la más alta capacidad de adsorción fue 3Fe-SPJ-V1, el cual presenta una carga de 3% en peso de Fe_2O_3 soportado en SPJ-V1. Es muy probable que en este adsorbente se haya logrado una mayor dispersión de las nanopartículas de Fe_2O_3 en la superficie interna de los poros de la SPJ-V1, con el consecuente incremento de sitios activos para la adsorción de los iones de As (III y V).

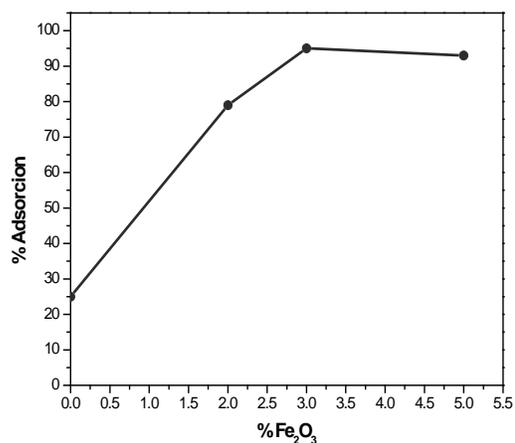


Figura 7. Porcentaje máximo de adsorción de iones de As (III y V) en función de la carga de Fe_2O_3 en los adsorbentes xFe-SPJ-V1

Además, la presencia de la porosidad jerárquica en la SPJ-V1, con sus tamaños de poros en el rango mesoporoso, facilitó la transferencia de los iones de As (III y V) hacia el interior de los mismos, donde se localizan los

sitios activos para la adsorción. Finalmente, el tamaño de las nanopartículas de Fe₂O₃ en el adsorbente 3Fe-SPJ-V1 es uniforme y adecuado para una alta eficiencia en la adsorción de iones de As (III y V).

CONCLUSIONES

La sílice con porosidad jerárquica SPJ-V1 con gran área superficial y gran tamaño de poro ha sido exitosamente sintetizada por el método sol-gel, con un arreglo supramolecular de surfactantes. El método de impregnación por llenado de poros permitió incorporar exitosamente las nanopartículas de Fe₂O₃ en la superficie interna de los poros de la sílice SPJ-V1.

Las nanopartículas de Fe₂O₃ en su fase cristalina α -Fe₂O₃ mostraron una alta dispersión en la superficie interna de los poros de la SPJ-V1 y en consecuencia generaron una gran cantidad de sitios activos para la adsorción de As III y V.

El tamaño de las nanopartículas de Fe₂O₃ se incrementó con el contenido de Fe₂O₃ en la sílice SPJ-V1, obteniéndose un menor tamaño (alrededor de 5 nm) para las cargas de 2 y 3 % en peso de Fe₂O₃. Una adición mayor de Fe₂O₃ (5 % en peso) resultó en un incremento en el tamaño (superior a los 5 nm), de acuerdo con los cálculos realizados para aproximar el tamaño de grano con la ecuación de Debye-Scherrer a partir de los difractogramas de rayos X.

Los materiales de sílice con porosidad jerárquica (SPJ-V1) impregnada con nanopartículas de Fe₂O₃ como adsorbentes son eficientes para la adsorción de iones de As (III y V) en soluciones acuosas. La habilidad del adsorbente se puede relacionar directamente con la estructura del arreglo de los poros, así como de su densidad de poros y la accesibilidad de las nanopartículas de Fe₂O₃ que se encuentran en la superficie de la sílice SPJ-V1.

El adsorbente que manifestó la mayor capacidad de adsorción de iones de arsénico (III y V) fue el que se preparó con la carga de

Fe₂O₃ del 3% en peso (3Fe-SPJ-V1), alcanzando un porcentaje de remoción del arsénico del 95%. La gran área superficial, el arreglo de poros y el tamaño de nanopartícula de Fe₂O₃ de este adsorbente demostraron ser apropiadas para realizar de manera eficiente la adsorción de los iones de arsénico (III y V).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo durante esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] J. Bundschuh, M. I. Litter, F. Parvez, G. Román-Ross, H. B. Nicolli, J.-S. Jean, C.-W. Liu, D. López, M. A. Armienta, L. R. Guilherme, A. Gómez Cuevas, L. Cornejo, L. Cumbal and R. Toujaglez, "One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries," *Science of the Total Environment*, vol. 429, pp. 2-35, 2012.
- [2] J. García Salcedo, A. Pérez-Vertti, M. Hernández Serrano and L. Serrano Gallardo, "Arsenicismo en el mundo," in *Arsénico. Perspectiva epidemiológica, ambiental y de salud*, 2016, pp. 29-40.
- [3] Organización Mundial de la Salud, "Guías para la calidad del agua potable," OMS, Suiza, 2006.
- [4] G. Ungureanu, S. Santos, R. Boaventura and C. Botelho, "Arsenic and antimony in water and wastewater: Overview of removal techniques with special reference to latest advances in adsorption," *Journal of Environmental Management*, vol. 151, pp. 326-342, 2015.
- [5] M. Chiban, M. Zerbet, G. Carja and F. Sinan, "Application of low-cost adsorbents for arsenic removal: A review," *Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, vol. 4, no. 5, pp. 91-102, 2012.
- [6] S. Jin, B. C. Park, W. S. Ham, L. Pan and Y. K. Kim, "Effect of the magnetic core size of amino-functionalized Fe₃O₄-meso-



porous SiO₂ core-shell nanoparticles on the removal of heavy metal ions," *Colloids and Surfaces A*, vol. 531, pp. 133-140, 2017.

[7] J.-H. Smatt, S. Schunk and M. Lindén, "Versatile Double-Templating Synthesis Route to Silica Monoliths Exhibiting a Multimodal Hierarchical Porosity," *Chemical Materials*, vol. 15, pp. 2354-2361, 2003.

[8] J. Smatt, S. Schunk and M. Lindén, "Versatile double-templating synthesis route to monoliths exhibiting a multimodal hierarchical porosity," *Chemistry of Materials*, pp. 2354-2361, 2003.

[9] G. Walrafen and M. Hokmabadi, "Raman spectrum and structure of thermally treated silica aerogel," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 85, no. 2, pp. 771-776, 1986.

[10] A. Martinelli, "Effects of a protic ionic liquid on the reaction pathway during non-aqueous sol-gel synthesis of silica: a raman spectroscopic investigation," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 15, no. 4, pp. 6488-6503, 2014.

[11] I. Andreou, H. Amenitsch, V. Likodimos, P. Falaras, P. Koutsoukos and E. Leonidis, "Organized silica films generated by evaporation-induced self-assembly as hosts for iron oxide nanoparticles," *Materials*, vol. 6, pp. 1467-1484, 2013.

[12] D. Andreeva, I. Ivanova, L. Ilieva, J. Sobczak, G. Avdeev and T. Tabakova, "Nano-sized gold catalysts supported on ceria and ceria-alumina for WGS reaction: Influence of the preparation method," *Applied Catalysis A: General*, vol. 333, pp. 153-160, 2007.

[13] L. Escamilla-Perea, C. Peza-Ledezma, R. Nava, E. Rivera-Muñoz, B. Pawelec and J. Fierro, "CO oxidation at 20 °C over Au/SBA15 catalysts decorated by Fe₂O₃ nanoparticles," *Catalysis Communications*, vol. 15, no. 1, pp. 108-112, 2011.

[14] T. Herranz, S. Rojas, M. Ojeda, F. Pérez Alonso, P. Terreros, K. Pirota and J. Fierro, "Synthesis, structural features, and reactivity of Fe-Mn mixed oxides prepared by microemulsion," *Chemistry of Materials*, vol. 18, no. 9, pp. 2364-2375, 2006.

EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN ENTRE DOS CONFIGURACIONES VEHICULARES EN UN TRAMO CARRETERO ASCENDENTE

Operational speed evaluation between two vehicle configurations
in a positive slope road section

José Jacob Durán Casillas¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia
jacobic93@gmail.com

RESUMEN

De entre los muchos factores que detonan la accidentalidad en carreteras, la velocidad es sin duda el factor preponderante por elevar los índices de siniestralidad. La creencia radica en declarar que las altas velocidades son las causantes de los accidentes, pero no necesariamente esta creencia es contundente, sino que los altos diferenciales de velocidad observados en la flota podrían tener peores repercusiones. Para tomar medidas al respecto, la muestra representativa de velocidades es un elemento a considerar que debe realizarse con aproximaciones cercanas a la realidad. El análisis de los datos se lleva a cabo mediante una evaluación del percentil 85 de velocidad en seis diferentes puntos de un tramo de la carretera México-Querétaro, que ha generado polémica en los últimos años por generar accidentes. Dicho tramo es representativo ya que cuenta con un alto Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) en la Red Carretera Federal (RCF), tanto en vehículos ligeros como en vehículos de carga. Se presenta entonces una evaluación en campo de los diferenciales de velocidad para Vehículos Ligeros (A) y para vehículos de carga, que en este caso son exclusivamente los Tractocamiones Doblemente Articulados con nueve ejes (T3-S2-R4), donde, producto de la posible sobrecarga y del efecto de la pendiente, se tienen registros de vehículos que circulan hasta a 20 km/h, lo cual podría representar un riesgo a la seguridad vial.

Palabras clave: velocidad de operación, percentil 85, doblemente articulado, vehículo ligero, diferencial de velocidad, seguridad vial

ABSTRACT

Among the many factors that trigger road accidents, speed is undoubtedly the preponderant factor to raise accident rates. The belief is that high speeds are the cause of accidents, but not necessarily, this belief is blunt, but that the high-speed differentials

observed in the fleet could have worse repercussions. In order to take measures in this regard, the speed sample is an element to take into account and must be done with approximations close to reality. The data analysis is done through an evaluation of the 85th speed percentile in 6 different points of the Mexico - Queretaro highway road section, which has generated controversy in recent years due to accident generation. This section is representative because it has a high TDPA index in the federal highway network, not only in light vehicles but also in cargo vehicles. A speed differential field evaluation of Light Vehicles (A) and cargo vehicles is presented, which in this case are exclusively the nine axles Double Articulated Tractors (T3 S2 R4), where product of the possible overload and slope effect, there are records of vehicles that drive up to 20 km / h, which could represent a risk to road safety.

Keywords: Operational speed, 85th percentile, double articulated, light vehicle, speed differential, road safety.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la National Highway Traffic Safety Administration, (NHTSA por sus siglas en inglés), se ocasionan más de 13,000 accidentes fatales en los Estados Unidos, donde uno de los factores con mayor influencia es sobrepasar los límites permisibles de velocidad [1]. Para 2016, más de 37,000 personas fallecieron en accidentes de vehículos motorizados, también en los Estados Unidos esta situación se presenta con un 5.6 por ciento de crecimiento respecto al año anterior. De la cantidad antes mencionada, el 27 por ciento de estos accidentes donde hubo tales víctimas mortales ocurrieron mientras que uno de los vehículos involucrados se desplazaba con exceso de velocidad. De manera subsecuente, aproximadamente el 11 por ciento de estas víctimas estuvieron involucradas en un choque con un vehículo de transporte de carga de grandes dimen-



siones, y es importante destacar que el 72 por ciento de las víctimas de estos accidentes eran conductores de otros vehículos, lo cual resalta el riesgo que los vehículos de carga generan en las demás configuraciones vehiculares, donde los vehículos ligeros destacan como los más afectados [2,16].

Continuando con lo anterior y haciendo énfasis en una de las configuraciones vehiculares objeto de estudio en esta investigación, se muestra que en Estados Unidos para 2016 fallecieron 4,317 personas que se vieron involucradas en un accidente con un vehículo de carga, donde en el 72 por ciento de estos se vieron inmiscuidos tractocamiones de pesos que rebasan las 26,000 lb de Peso Bruto Vehicular (PVB). Esta situación no es ajena a la realidad que se vive en la Red Carretera Federal (RCF) mexicana, donde para el año 2017 ocurrieron un poco más de 11,883 percances que dejaron un saldo de 2,921 personas fallecidas. En los anteriores participaron 19,388 vehículos, donde en el 26 por ciento de los casos participaron vehículos de carga, que incluyen las configuraciones aceptadas por la Norma Mexicana: el Camión Unitario (C), el Tractor Articulado (T-S) y el Tractocamión Doblemente Articulado (T-S-R o T-S-S). En México, para el año 2017, hubo 955 colisiones que involucraron al Tractocamión Doblemente Articulado, dentro de las cuales se presentaron 308 colisiones con víctimas, que dieron como resultado 195 muertos y 536 lesionados [3].

La velocidad es por mucho la causa número uno de accidentes con vehículo motorizado alrededor del mundo, pero no sólo es el exceso de velocidad la causa principal, sino el amplio diferencial de velocidades dentro de la flota vehicular. En [4] se argumenta que no sólo el exceso de velocidad genera una accidentalidad elevada en una carretera, sino que aquellos vehículos que limitan o irrumpen el flujo coordinado de la flota vehicular, o que circulan a una velocidad inferior a la establecida por la ley, son también causales principales de posibles accidentes. Cuando la mayoría de los vehículos circulan a veloci-

dades de operación similares independientemente de si son altas o bajas, la tasa de fatalidad tiende a disminuir. La varianza que se puede presentar en una carretera puede ser uno de los principales detonantes de las altas tasas de accidentalidad. Basándose en experimentos [5], se concluyó que los accidentes en tramos con pendientes elevadas pueden ser comprendidos estudiando las diferencias de las velocidades en los vehículos implicados en un accidente. También resaltan el hecho de que una pendiente superior al 4% y una longitud superior a los 1500 m contribuyen de manera importante a la reducción de la velocidad y al incremento del riesgo de colisión.

Existen ciertos elementos que generan accidentes y que están relacionados con los vehículos de carga con doble remolque. En [6] mencionan que las características particulares de los vehículos de carga influyen positiva o negativamente en la ocurrencia de accidentes. Lo anterior puede ser ocasionado por el mismo vehículo, en cuestión debido a sus características de tracción, incremento de dimensiones y pesos, por el comportamiento del conductor, conductores profesionales pasan más tiempo manejando que un conductor regular, y por el uso que tenga el vehículo para el transporte de mercancías, cuyo uso comercial debería tener más y mejores criterios de eficiencia, regulaciones y restricciones.

Una de las cuestiones más importantes en el comportamiento de los vehículos de carga en las carreteras es su aceleración y el mantenimiento de la velocidad [7]. Por ejemplo, la falta de carriles exclusivos de aceleración en una vía, que cuenta con un solo carril por sentido y que aparte tiene pendientes verticales positivas, provoca que su velocidad disminuya al crear conflictos con los vehículos ligeros que desean rebasar. Cuando un vehículo de carga viaja a 16 km/h (10mi/h) menos que la velocidad de operación de una autovía, la probabilidad de que se vea envuelto en un accidente de tránsito se incrementa hasta 3.7 veces. De igual manera, si el vehículo de carga viaja a 32 km/h (20 mi/h) por debajo

de la velocidad de operación, la probabilidad de que se vea envuelto en un accidente de tránsito se incrementa hasta 15 veces [8]. Así también, estos autores argumentan que un número considerable de vehículos de carga con grandes dimensiones puede afectar la seguridad vial de una autovía puesto que muestran problemas para operar en tramos con pendientes ascendentes (disminuyendo su velocidad), para mezclarse con el resto de la flota vehicular, para maniobras de entrecruzamiento con otros vehículos, para hacer maniobras de frenado y para ejecutar maniobras de evasión repentina.

La mayoría de los accidentes tipo colisión delantera/trasera, en los que se ven envueltos los vehículos pesados, se deben a una diferencia de 40-50 km/h entre los vehículos involucrados. Othman y Thompson mencionan que un valor superior al 4% en pendiente vertical puede ser mucho más riesgoso, en estudios realizados para carreteras suecas [9]. Asimismo [10], argumentan que la longitud del tramo con pendiente ascendente tiene un impacto importante en las carreteras en China. Estas diferencias de velocidad, que pueden ser observadas muy comúnmente en la RCF mexicana, se pueden presentar notablemente entre los vehículos ligeros y los Tractocamiones Doblemente Articulados en tramos carreteros ascendentes, donde ya sea por efecto de la pendiente carretera, el sobrepeso y la relación peso-potencia, los vehículos tipo T3-S2-R4 tienden a disminuir su velocidad notablemente, ocasionando una alta peligrosidad de choque por alcance en los vehículos ligeros. A mayor velocidad menor campo visual por parte del conductor, lo que reduce el tiempo de reacción disponible para que el conductor realice una maniobra evasiva en caso de ser necesitada [11].

El objetivo de esta investigación radica en destacar el potencial riesgo de los vehículos T3-S2-R4 en carretera, considerando una muestra representativa en un tramo que históricamente cuenta con una siniestralidad elevada, pendientes ascendentes pronunciadas superiores a las reportadas en la lite-

ratura y una gran composición de vehículos de este tipo en el TDPA. Es posible que las bajas velocidades observadas en carretera estén relacionadas con el sobrepeso y la pendiente, situándose muy por debajo de la máxima permitida por las autoridades.

LA IMPORTANCIA DEL CONOCIMIENTO DE LAS VELOCIDADES DE OPERACIÓN

La velocidad es una medida básica del comportamiento del tráfico. Es de relevancia el entender la implicación de la velocidad en la seguridad de una carretera, puesto que los límites establecidos podrían ser una medida clave en las posibles tasas de accidentalidad. La variedad del diseño de una carretera y las características operacionales podrían ser factores determinantes en la velocidad de operación y en la ocurrencia de choques. Esta información se encuentra directamente relacionada a cuestiones seguridad, tiempo y confort.

Un elemento común en el ámbito de investigaciones en cuanto a la velocidad se refiere es el percentil 85 de velocidad. Este percentil es una buena representación de las velocidades de operación, que es a la cual los vehículos circulan bajo condiciones de flujo libre, y no es más que la velocidad a la que el 85 por ciento de los conductores viajan en una locación en particular [11].

La recolección de datos es esencial tanto para establecer velocidades de operación como para resolver hipótesis vinculadas con las velocidades actuales de una carretera. Una adecuada planeación del proceso de captación de datos debe hacerse eficientemente, de manera que el proceso represente la situación actual. Este proceso presenta la necesidad de una metodología detallada y podría ser sencillo si se tiene el equipo adecuado. Esto último requerirá una pequeña muestra representativa de los datos, con el fin de obtener aproximaciones cercanas a la realidad. Los estudios de velocidad tienen el fin de evaluar cuestiones operacionales y de seguridad de un tramo específico de una carretera [1].



El nombre de los estudios es el de “Estudio de velocidad de punto” y se refiere a locaciones específicas donde es del interés del investigador saber el valor del parámetro velocidad, bajo condiciones del tráfico y condiciones tanto climáticas como operacionales en un preciso momento, saber cuáles son las velocidades que se medirán, así como las configuraciones vehiculares que son de interés para el mismo, de manera que se haga énfasis en ellas, o bien, si lo que se busca es la obtención del parámetro de toda la flota vehicular, que deberá hacerse bajo condiciones de flujo libre, evitando horas de saturación donde la capacidad de la vía sea rebasada por la elevada demanda vehicular [12]. Asimismo, los observadores deberán contar con el equipo de seguridad adecuado y deberán situarse en una locación donde la percepción de ellos por parte de los vehículos de interés no afecte el comportamiento de los vehículos aforados, o bien, el aforador deberá permanecer desapercibido para lograr una toma de datos lo suficientemente aproximada a la realidad.

METODOLOGÍA

Método de selección individual

Para obtener la velocidad, existen dos métodos de medición tanto directa e indirectamente. Uno de ellos es el Método de selección individual, para el cual se requiere de una pequeña muestra de datos tomada en periodos de tiempo reducidos. Dichos estudios están relacionados con investigaciones no de alcances superiores, sino de objetivos pequeños como es el caso de esta investigación.

La herramienta más económica que otorga una precisión aceptable para realizar las mediciones, es la pistola láser o la pistola radar. El principio de estas últimas consiste en el empleo del efecto Doppler para determinar la velocidad, el cual emite un haz de ondas de alta frecuencia hacia un vehículo en

movimiento. Estas ondas se reflejan en el vehículo de interés y regresan al radar. El cambio en la frecuencia de ondas determina la velocidad del vehículo. Se recomienda realizar el estudio en tramos carreteros rectos por la no influencia de la interferencia angular. La precisión de las mediciones dependerá del equipo empleado y de la experiencia del aforador.

Tramo de estudio

Para determinar el área de estudio donde se llevará a cabo el método mencionado, se responde a un llamado de la sociedad o una investigación por parte de alguna entidad gubernamental o científica. Una sección carretera adecuada debe contener ciertas características, pero sobre todo debe ser homogénea. Una sección homogénea es aquella en la que:

El área del camino es consistente

Las características del camino son consistentes: anchos de carril, hombros de camino, superficie regular, etcétera.

Atendiendo a lo anterior, el tramo objeto de estudio es el correspondiente a la carretera México-Querétaro, que históricamente muestra valores elevados del TDPA que alcanzan hasta más de 50,000 vehículos. En algunos puntos, la configuración de interés T3-S2-R4 presenta valores de hasta el 5.6 por ciento, figurando como un contenido elevado de vehículos en la flota diaria vehicular. Así también, resulta ser un tramo conflictivo, puesto que se da lugar a muchos accidentes año con año y la presión de la población local es latente en medios informativos. Por ejemplo, en el año 2017 se presentaron 15 colisiones donde se vieron involucradas estas configuraciones vehiculares, en las cuales, en 6 casos de estas hubo 6 personas fallecidas y 3 lesionados, según datos reportados por la Policía Federal, lo que no quiere decir que no existan más colisiones a lo largo del año [13].

Debido a la búsqueda del diferencial de velocidad del T3-S2-R4 con respecto a los

vehículos ligeros o de tipo A, así como su variación a lo largo de una pendiente prolongada, se decide realizar las mediciones en la denominada "Cuesta china" así conocida por la población local, que comprende aproximadamente 5.37 km, del kilómetro 206+000 al 200+000, aproximadamente y presenta una pendiente con un comportamiento que se puede considerar lineal, teniendo un valor superior al 3 por ciento de pendiente promedio. Dichos tramos se muestran en la Figura 1. De igual manera, se exhiben los puntos donde se realizaron las mediciones de la velocidad, con el fin de denotar la variación de la velocidad en 6 puntos distintos. Los puntos se decidieron pensando en la seguridad del aforador y buscando hacer una evaluación en tramos rectos de la carretera, donde se observaran características consistentes en cada uno de los lugares de interés. También se muestra la variación de la pendiente cada 500 m, la cual se expone a manera de resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos de los tramos donde se evaluó la pendiente

Tramo	Kilometraje	Elevación (m)	Elevación (m)	Distancia (m)	Pendiente (%)
T1 - T2	1+000 - 1+500	1858	1889	500	6.20%
T2	1+500 - 2+000	1889	1908	500	3.80%
T2	2+000 - 2+500	1908	1920	500	2.40%
T2 - T3	2+500 - 3+000	1920	1947	500	5.40%
T3 - T4	3+000 - 3+500	1947	1970	500	4.60%
T4	3+500 - 4+000	1970	1990	500	4.00%
T4 - T5	4+000 - 4+500	1990	2006	500	3.20%
T5	4+500 - 5+000	2006	2018	500	2.40%
T6	5+000 - 5+360	2018	2033	370	4.05%



Fuente: Google Earth

Figura 1. Tramo objeto de estudio

Muestra representativa

Para establecer un perfil de las velocidades que circulan por un punto, se debe determinar cuántas velocidades son las necesarias para obtener una muestra que ejemplifique la situación real donde el número de vehículos dependerá del nivel de confianza requerido y del análisis estadístico de los datos. *El Manual de Estudios de Ingeniería de Transporte* [12] presenta la Ecuación 1 para obtener la muestra representativa para la estimación del percentil 85 de velocidad:

$$N = (S^2 K^2 (2 + U^2)) / 2E^2 \quad (1)$$

Donde

N= Número mínimo de velocidades a obtener

S= Desviación estándar estimada de la muestra (km/h)

K= Constante del nivel de confianza deseado

U= Constante del percentil de velocidad deseado

E= Error permitido en la estimación de la velocidad (km/h)

Debido a diferentes factores tanto físicos como operacionales de los vehículos de carga, la obtención de velocidades para estos vehículos se debe de realizar en un periodo a parte de la medición de los vehículos ligeros, puesto que las características de operación son distintas.

En la Tabla 2 se muestran los valores de los parámetros empleados tanto para los ve-



hículos ligeros (A) como para los vehículos T3-S2-R4. De la misma manera en la Tabla 3 se presenta el resumen de los tamaños de muestra necesarios para obtener el parámetro velocidad en cada uno de los puntos de evaluación para las dos configuraciones vehiculares de interés.

Tabla 2. Valores considerados para obtener las muestras representativas

Parámetros	
Vehículos A	Vehículos T3-S2-R4
S Var	S Var
K 2.00	K 2.00
U 1.04	U 1.04
E 3.20	E 6.44

Tabla 3. Valores obtenidos correspondientes al tamaño de muestra en cada uno de los puntos de interés

P1	P2	P3	P4	P5	P6
S(A)= 8.66	S(A)= 7.76	S(A)= 10.99	S(A)= 10.30	S(A)= 10.01	S(A)= 8.95
S(T3-S2-R4)= 8.16	S(T3-S2-R4)= 11.31	S(T3-S2-R4)= 16.88	S(T3-S2-R4)= 16.88	S(T3-S2-R4)= 15.31	S(T3-S2-R4)= 18.34
N(A)= 45.12	N(A)= 36.23	N(A)= 72.67	N(A)= 63.86	N(A)= 60.29	N(A)= 48.20
N(T3-S2-R4)= 6.66	N(T3-S2-R4)= 12.80	N(T3-S2-R4)= 28.50	N(T3-S2-R4)= 28.49	N(T3-S2-R4)= 23.44	N(T3-S2-R4)= 34.98

Discusión y Resultados

Después de realizar el procedimiento descrito en la metodología, se obtuvieron los percentiles 85 de velocidad en cada uno de los puntos propuestos, tanto para la configuración de vehículo tipo A como para la de T3-S2-R4. Es importante destacar que el vehículo objeto de estudio es únicamente el tipo T3-S2-R4. Las velocidades obtenidas para los vehículos tipo A fueron obtenidas con fines comparativos. La Tabla 4 muestra el resumen de los percentiles 85 para ambas configuraciones.

Por un lado, se puede apreciar que los vehículos ligeros tienden a mantener la velo-

cidad en un intervalo que ronda valores obtenidos por el percentil 85. Las velocidades obtenidas demuestran que la gran mayoría de vehículos que circulan por este tramo carretero mantienen su velocidad por debajo de la mínima exigida por las autoridades mexicanas, que es de 110km/h, aunque considerando que parte del tramos se encuentra en una zona suburbana, el Reglamento de Tránsito en Carreteras y Puentes de Jurisdicción Federal, publicado por Diario Oficial de la Federación (2012), limita las velocidades a 50 km/h, lo cual podría ser tema de discusión en cuanto a las condiciones de este tramo carretero. También se puede mencionar, que el efecto de la pendiente no tiene inferencia representativa alguna para los vehículos tipo A, inclusive se observan incrementos de alrededor del 10 por ciento entre algunos de los puntos evaluados, como es el caso del P2 al P3, debido a que los vehículos aceleran para no rezagarse por efecto de la pendiente. Por otro lado, y refiriéndose a los vehículos de tipo T3-S2-R4, la situación es completamente distinta. Si se observan únicamente los percentiles 85 de estas configuraciones, las conclusiones podrían ser similares a las de los vehículos tipo A, como se ve también en la Tabla 4, pero no es así puesto que, al momento de realizar el estudio, se observó que muchos de los vehículos aforados circulaban a una alta velocidad o lo hacían a una muy baja. Debido a esta situación, se optó por hacer diagramas de puntos para entender mejor el comportamiento de dicha configuración, estos diagramas se muestran en la Figura 3, donde queda en evidencia el efecto de la pendiente y la tendencia a la agrupación de los vehículos que circulan tanto a bajas velocidades como a velocidades mayores. En la misma se observa como en P1 el 95% de las velocidades se agrupan por encima de los 50 km/h, situación que se ve disminuida conforme se observan las mediciones en los siguientes puntos. De manera similar, la tabla del percentil 50 es una buena evidencia de cómo a partir de P3 el 50% de los vehículos se desplazan a 50km/h o menos.

De manera agrupada y obteniendo el percentil 50 de cada uno de los puntos aforados, se observa en la Tabla 5 con mayor determinación que al menos la mitad de los vehículos de tipo T3-S2-R4 circulan muy por debajo de la velocidad que establece la ley para esta configuración, que es de 80 km/h. Es necesario destacar que ni en el Reglamento de Tránsito ni en la Norma Oficial NOM-EM-033-SCT-2-2002 se tiene estipulada una velocidad mínima [13] [14], por lo que se permite que estos vehículos manejen a velocidades tan bajas como se observan en el diagrama de dispersión de la Figura 3, donde se registraron velocidades de hasta 20 km/h. Lo anterior se puede relacionar directamente con la sobrecarga. El Instituto Mexicano del Transporte realizó estudios donde se evidencia la muestra total de vehículos de carga que circulan con exceso de Peso Bruto Vehicular en estaciones instaladas en la Red Federal, donde para la configuración T3 S2 R4 se registró que un 37.20 por ciento de los vehículos iban con exceso de carga [15].

Tal cual lo mencionan en [5], para diferentes configuraciones vehiculares la carga vehicular puede ocasionar una reducción significativa en la velocidad de circulación de los vehículos de carga, describiendo un valor de 4 por ciento como el punto de inflexión a partir del cual, para configuraciones vehiculares y pesos brutos menores, la velocidad se ve reducida de manera importante en una longitud considerable. En este caso, se tienen 5 tramos que exceden este valor de pendiente, donde se observan velocidades bajas en las configuraciones de nuestro interés, creando así diferenciales de hasta 80.91 km/h, que representan un riesgo para la seguridad vial de la carretera. También se menciona en [4], argumentando que no es el límite de velocidad ni el aumento de la misma lo que marca la pauta para determinar si una velocidad pone en riesgo la seguridad de los usuarios, sino que la variación de la misma, o bien, las muy altas y muy bajas velocidades sí representan un riesgo a considerar por parte de los expertos en la materia.

Tabla 4. Valor del percentil 85 de velocidad por configuración en cada punto de evaluación.

Percentil 85 de velocidad (km/h)		
Configuración vehicular		
	A	T3-S2-R4
P1	92.31	74.20
P2	86.56	68.32
P3	100.91	68.32
P4	97.18	61.81
P5	101.25	62.67
P6	95.83	66.72

Tabla 5. Valor del percentil 50 de velocidad para los vehículos tipo T3-S2-R4.

Percentil 50 de velocidad (km/h)	
	T3-S2-R4
P1	66.29
P2	51.79
P3	50.00
P4	45.42
P5	40.00
P6	45.33

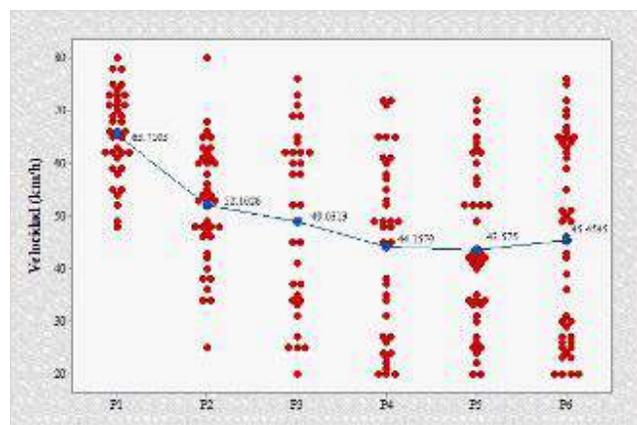


Figura 3. Diagrama de valores individuales en cada uno de los puntos de aforo

CONCLUSIONES

Existen muchas razones por las cuales los vehículos de tipo T3-S2-R4 figuran como elementos de riesgo en la composición vehicular del flujo cotidiano en carreteras, pero, reforzando lo mencionado por algunos autores, la combinación de tramos rectos con valores de pendiente elevados mas un por-



centaje considerable de vehículos, que exceden el peso bruto vehicular autorizado por la normatividad mexicana, representa un riesgo para la seguridad vial de los usuarios de una carretera. Esta situación es de importancia tanto para las autoridades como para los expertos en la materia, puesto que las cifras por accidentes viales a nivel nacional se encuentran en números alarmantes.

En este caso, en el tramo que se evalúa de la carretera México-Querétaro, se presenta una demostración de cómo existen diferenciales de velocidad elevados entre vehículos tipo A y vehículos tipo T3-S2-R4, lo que eleva los índices de siniestralidad, puesto que los vehículos de carga al contar con características físicas más robustas ponen en riesgo a los usuarios más vulnerables.

Aunque la literatura nos indica que el percentil 85 de velocidad es una buena herramienta para determinar velocidades de operación, se necesita hacer uso de otras herramientas que otorguen una descripción más a fondo de la situación observada en carretera. Tal es el caso de los diagramas de puntos, que aunado al aforo realizado en sitio resultó ser una buena herramienta para describir el comportamiento observado en sitio: por un lado vehículos que circulan a muy bajas velocidades probablemente por el efecto de la pendiente y el sobrepeso y, por otro lado vehículos que circulaban cerca de la velocidad máxima permitida, dentro de los cuales se puede inferir que su carga era ligera o que realizaban un desplazamiento sin carga que les limitara alcanzar una velocidad cercana a la máxima permitida. Lo anterior queda ejemplificado con el agrupamiento de velocidades en los puntos donde la pendiente ha tenido influencia, observando registros de velocidades hasta de 20 km/h.

Una línea de investigación futura podría ser la búsqueda directa de la información de peso, pendiente, velocidad y una base de datos de accidentalidad, donde se pueda determinar tramos conflictivos en una red vial, originando así una herramienta de utilidad para que las autoridades pertinentes

tomen decisiones y ejecuten planes de intervención para mitigar y reducir los índices de siniestralidad.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial al Instituto Mexicano del transporte por el apoyo brindado para acceder a los datos de accidentalidad, así como a la Coordinación de Seguridad y Operación del Transporte por facilitar el radar para realizar los estudios pertinentes.

REFERENCIAS

- [1] Methods and Practices for Setting Speed Limits: An informational report, Federal Highway Administration, 2004.
- [2] Traffic Safety Facts, Summary of Motor Vehicle Crashes, National Highway Traffic Safety Administration, 2016.
- [3] Anuario Estadístico de Accidentes en Carreteras Federales (2017), Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Documento técnico N° 74, Sanfandila, Querétaro, 2018.
- [4] Lave, Charles A., "Speeding, Coordination and the 55 MPH Limit", American Economic Association, JSTOR, 2014.
- [5] Cerezo, V., Gothié, M., Dupré, G., "The Danger of Ramps for Heavy Goods Vehicles". 10th International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology, Paris, France, 2008.
- [6] Christoforou, Z. D., Karlafatis, M. G., Yannis, G., "Heavy vehicle age and road safety, Proceedings of the Institution of Civil Engineers", *Transport* 163, 41-48, 2010.
- [7] Grislis, A. "Longer Combination Vehicles and Road Safety", *Transport*, 25(3), 336-343, 2010.
- [8] Harkey, David L., Council, Forrest M., Zegger, Charles V., "Operational Characteristics of Long Combination Vehicles and Related Geometric Design Issues", *Transportation Research Record*, 1523, 22-28, 1996.
- [9] Othman, S., Thomson, R., "Influence of road characteristics on traffic safety". *Proc.*

the 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Conference (ESV), Lyon, France, 2007. Paper Number 07-0064.

[10] Fu, Rui., Guo, Yingshi., Yuan, Wei., Feng, Hongyun., Ma, Y., "The correlation between gradients of descending roads and accident rates", *Safety Science*, 49 (3), 416–423, 2011.

[11] A Policy of Geometric Design of Highway and Streets, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2001.

[12] Manual of Transportation Engineering Studies, Institute of Transportation Engineers, 2009.

[13] Reglamento de Tránsito en Carreteras y Puentes de Jurisdicción Federal, Diario Oficial de la Federación, Gobierno de México, 2012.

[14] Norma Oficial Mexicana NOM-EM-033-SCT-2-2002, Límites máximos de velocidad para los vehículos de carga, pasaje y turismo que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal, 2003.

[15] Estudio Estadístico de campo del auto-transporte nacional, Análisis estadístico de la información recopilada en las estaciones instaladas en 201, Secretaria de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, 2016.

[16] Traffic Safety Facts, Large Trucks, National Highway Traffic Safety Administration, 2016.

MATERIAL MESOPOROSO CON ARREGLO CÚBICO DE POROS SBA-16 FUNCIONALIZADO CON GRUPOS AMINO PARA LA ADSORCIÓN DE IONES DE CR (VI) DE SOLUCIONES ACUOSAS

SBA-16 cage-like mesoporous material functionalized by amino groups as an adsorbent for Cr (VI) ions removal from aqueous solution

Ileri Segura^{1*}, Rufino Nava¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro

*Autora de correspondencia
irerisegura@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se presentan y analizan los primeros resultados de la síntesis y funcionalización de los materiales mesoporosos del tipo SBA-16 con grupos amino y su capacidad de adsorción de iones de Cr (VI) en medios acuosos. La capacidad de adsorción de los materiales funcionalizados fue analizada variando el pH de la solución de dicromato de potasio disuelto en agua desionizada a una concentración de 100 ppm de cromo hexavalente. Las propiedades texturales y la presencia de los grupos amino en los materiales adsorbentes fueron evaluadas mediante las isothermas de adsorción-desorción de N₂ (SBET), espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR) y para determinar el cromo en el adsorbente después de la adsorción se utilizó espectroscopia de reflectancia difusa en el rango UV-vis. Los resultados de esta caracterización indicaron que la adsorción de los iones de Cr⁶⁺ ocurre entre la interacción del ion Cr⁶⁺ y los grupos amino. La SBA-16 pura (sin funcionalizar) no presenta adsorción de iones de Cr (VI).

Palabras clave: materiales mesoporosos, funcionalización, SBA-16, adsorción, iones de Cr (VI).

ABSTRACT

In the present work, the first results of the synthesis and functionalization of mesoporous materials of type SBA-16 functionalized with amino groups and their ability to adsorption of Cr (VI) ions in aqueous media are presented and analyzed. The adsorption capacity of the functionalized materials was analyzed by varying the pH of the solution of potassium dichromate dissolved in deionized water at a concentration of 100 ppm of hexavalent chromium. The textural properties and the presence of the amino groups in the adsorbent materials were evaluated by the N₂ adsorption-desorption isotherms (SBET), Fourier transform infrared spectros-

copy (FT-IR) and to determine the presence of chromium in the adsorbent after adsorption, diffuse reflectance spectroscopy was used in the UV-vis range. The results of this characterization indicated that the adsorption of the Cr⁶⁺ ions occurs between the interaction of the Cr⁶⁺ ion and the amino groups. The pure SBA-16 (non-functionalized) does not present adsorption of Cr (VI) ions.

Keywords: mesoporous materials, functionalization, SBA-16, adsorption, Cr (VI) ions.

INTRODUCCIÓN

Las descargas de metales pesados en ecosistemas acuáticos se han convertido en un tema de preocupación por varios años. Los contaminantes que más se descargan a dichos ecosistemas incluyen cromo, mercurio, uranio, zinc, arsénico, cadmio, oro, plata, cobre, níquel, entre otros, los cuales son carcinógenos y mutagénicos [1]. Existen diversas actividades industriales que son asociadas con los desechos tóxicos con altos contenidos de compuestos de cromo como lo son el curtido de pieles, manufactura de aleaciones, síntesis de pigmentos y colorantes, entre otros. Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA), el cromo es considerado uno de los elementos principales de los contaminantes inorgánicos tóxicos, debido a sus propiedades mutagénicas y carcinogénicas contra las especies biológicas [2].

En ambientes acuosos el cromo se puede encontrar en dos estados de valencia como puede ser el cromo hexavalente (Cr VI), o bien el cromo trivalente (Cr III). El consumo de agua contaminada por cromo puede ser de alto riesgo para la salud de las personas, lo que se debe a los dos estados de oxidación del cromo [3]. A pesar de que el cromo trivalente es elemento esencial como nutriente para los seres vivos, en exceso pueden ocasionar problemas de salud ya que dificulta la absorción de zinc y hierro por lo que los niveles de glucosa disminuyen [4]. El cromo



hexavalente puede ser dañino para la salud al ser ingerido, ya que puede causar desde irritaciones y úlceras, en las vías respiratorias y sistema digestivo, hasta causar anemia y cáncer a los humanos [3]. Por lo que, se han propuesto diversos métodos para eliminar este contaminante de los medios acuosos en los cuales involucran adsorción y reducción de Cr (VI) al estado trivalente que es menos tóxico. Dentro de estos métodos se han propuesto una vasta variedad de sólidos como adsorbentes eficientes para la eliminación de Cr [5, 6]. Las sílices mesoporosas ordenadas son otro tipo de materiales que se han utilizado de manera exitosa en la eliminación y recuperación de metales pesados. Las más estudiadas, para la separación de algunos contaminantes inorgánicos acuosos como Cu, Zn y Hg, son la MCM-41 y la SBA-15 con diferentes grupos enlazados en su superficie [7, 8, 9, 10]. Otro material mesoporoso es el sustrato de SBA-16 que posee interesantes propiedades texturales como son arreglo cúbico de poros tridimensional con micro- y meso-poros interconectados, alta área superficial y adecuado diámetro de poro para funcionalizarlo y mejorar los procesos difusionales a través de sus poros [11].

Es así que el objetivo de la presente investigación es desarrollar matrices nanoestructuradas en base a la sílice mesoporosa SBA-16 funcionalizadas con grupos amino con una alta capacidad de adsorción para disminuir la concentración de cromo total disuelto en medios acuosos. Por el cual se desarrolló la metodología experimental para la síntesis de los materiales mesoporosos SBA-16 puros y materiales SBA-16 funcionalizados con grupos amino. Además, se determinó la eficiencia de los materiales mesoporosos del tipo SBA-16 funcionalizados con grupos amino en la remoción del cromo total disuelto en agua. Para la síntesis de los materiales mesoporosos se empleó el método sol-gel, el cual es utilizado desde 1800, ya que permite obtener materiales de alta dureza y ho-

mogeneidad a temperaturas no elevadas. La síntesis por medio de este método permite un mejor control de la textura, composición, homogeneidad y propiedades estructurales. Los sólidos obtenidos usualmente cuentan con alta porosidad y por tanto una alta área superficial [12, 13]. Para funcionalizar los materiales mesoporosos se utiliza una sustancia llamada dopante que es capaz de cambiar una característica de un material y con lo cual se pretende mejorar la afinidad del material para formar ligandos o compuestos de coordinación con el metal de interés [13]. Para este trabajo se utilizó como sustancia dopante grupos amino. Cabe mencionar que los límites máximos permisibles para la descarga de cromo hexavalente al alcantarillado público están establecidos por la norma oficial mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996 que determina una concentración promedio mensual de Cr VI en 0.5 mg/L [14]. Además la NOM-001-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles para las descargas de contaminantes en aguas y bienes nacionales [15]. En la Tabla 1 se muestran los límites para diferentes bienes nacionales.

Tabla 1. Concentración promedio mensual de cromo [15]

	Ríos			Embalses naturales y artificiales	
	Uso en riego agrícola	Uso público urbano	Protección de vida acuática	Uso en riego agrícola	Uso público urbano
Límite máximo permisible (mg/L)	1	0.5	0.5	1	0.5
	Aguas costeras			Suelo	
	Explotación pesquera, navegación y otros usos	Recreación	Estuarios	Uso en riego agrícola	Humedales naturales
Límite máximo permisible (mg/L)	.05	1	.05	0.5	0.5

METODOLOGÍA

Síntesis de la matriz mesoporosa SBA-16

Para la síntesis de los materiales mesoporosos se utilizó el método sol-gel [16], para el cual fueron necesarios 8 g de un surfactante neutro como director de la estructura cúbica, que es Pluronic F127 (BASF). El surfactante se disolvió en 240 ml de una solución de 2M de ácido clorhídrico y 60 ml de agua destilada, y se mantuvo en agitación constante a una temperatura ambiente (28 °C-30 °C) durante una hora. Una vez disuelto el surfactante, se inició el proceso de sol-gel por lo que fueron añadidos 26 ml del precursor de sílice (TEOS). Al añadir el TEOS se mantuvo en agitación por 24 horas a temperatura ambiente. Una vez finalizada la reacción, la solución se pasó a un madurado por 48 horas a 80 °C en una estufa sin agitación. Pasadas las 48 horas de madurado se dejó enfriar y se recuperó el sólido por filtración, se secó a temperatura ambiente y posteriormente se puso en la mufla a 110 °C por 18 horas. Finalmente, se calcinó a 500 °C por 6 horas con una rampa de velocidad de 1 °C por minuto (véase Figura 1).

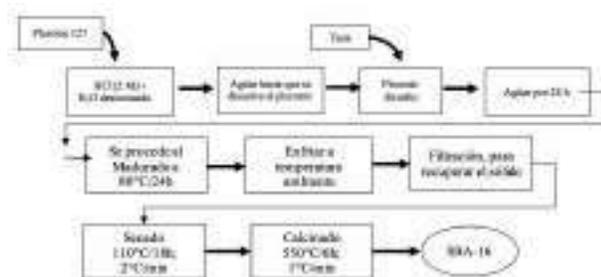


Figura 1. Esquema del procedimiento de síntesis de la SBA-16 [16].

Funcionalización de la matriz mesoporosa SBA-16

La funcionalización del material mesoporoso del tipo SBA-16 se realizó por el método postsíntesis (exsitu) a partir de la SBA-16 pre-

viamente sintetizada y descrita por [10] (véase Figura 2.). La SBA-16 fue dispersada en una solución de 3-aminopropil trietóxilisano (APTES), que es el precursor de los grupos funcionales -NH₂, en etanol. La cantidad de APTES se calculó para obtener 0.2 moles, 0.3 moles y 0.4 moles de APTES por cada mol de TEOS. La reacción se realizó a temperatura ambiente por 60 minutos. Posteriormente, se recuperó el sólido por filtración y se dejó secar a temperatura ambiente y posteriormente a 110 °C por 18 horas.

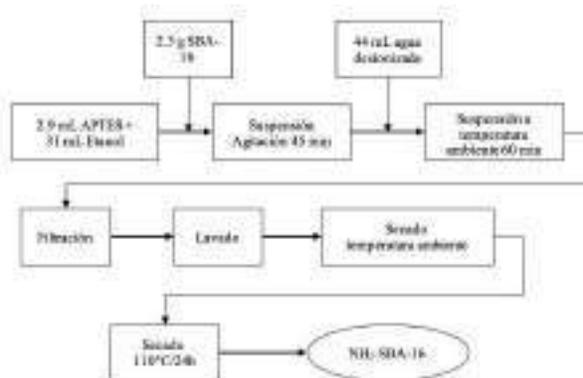


Figura 2. Esquema del procedimiento de funcionalización de la SBA-16 con grupos amino [10].

Experimento de adsorción de Cr.

El experimento de adsorción se llevó a cabo de la siguiente manera. En 55 ml de una solución de dicromato de potasio en agua desionizada (100 ppm de Cr) se dispersó 0.275 g del material adsorbente y se mantuvo en agitación y a una temperatura ambiente (27 °C), con un tiempo de contacto de una hora. Se realizaron dos experimentos a condiciones de pH diferentes; uno a pH 4.7, que es el pH al que la solución de dicromato de potasio se encuentra, y el otro a pH 3, en el que se utilizó ácido nítrico (HNO₃) a 0.1 M para ajustar dicho pH. En los experimentos de adsorción se utilizaron la SBA-16 sin funcionalizar y las tres NH₂SBA-16 con diferentes concentraciones de APTES (0.2, 0.3 y 0.4 moles).



Caracterización del material

Las características fisicoquímicas de los adsorbentes del tipo SBA-16 modificados con grupos amino, antes y después de la adsorción de Cr^{6+} , fueron investigados a través de isothermas de adsorción-desorción de N_2 a 77 K (SBET), espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR) y espectroscopia de reflectancia difusa en el rango DRS-UV-vis.

Técnicas de Caracterización

a) Isothermas de Adsorción-desorción

Las propiedades texturales de los adsorbentes fueron evaluadas usando un equipo de isothermas de adsorción-desorción de nitrógeno a 77 K el Micromeritics TriStar 3000. Antes de la medición, las muestras fueron desgasificadas a 423 K por 24 h a vacío (10⁻⁴ mbar). El área total superficial fue calculada con el método de Brunauer-Emmett-Teller (BET) [17] y los datos de adsorción recogidos en el intervalo de presión relativa 0.03-0.3.

b) Espectroscopia de Infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR)

Los espectros de transformada-IR de Fourier (FT-IR) de la vibración del entramado (rango de 400-1800 cm^{-1}) se registraron en un espectrofotómetro Bruker Vector 3.3 a partir de la técnica de obleas de KBr.

c) Espectroscopia de reflectancia difusa UV-vis

Los espectros de reflectancia difusa UV-vis de los materiales mesoporosos que contienen cromo adsorbido se registraron a temperatura ambiente en un espectrofotómetro CARY 5000 UV-Vis-NIR VARIAN.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las isothermas de adsorción-desorción de N_2 a 77K de la SBA-16 y 3NH₂-SBA-16 se muestran en la Figura 3. Ambas muestras presentan isothermas irreversibles de adsorción-desorción de tipo IV con un ciclo de histéresis

H_2 en el rango de presión parcial de 0.4 a 0.6 P/P₀, característica de materiales porosos con poros de 3-6 nm de diámetro [18, 19]. Estos resultados son típicos para los materiales con estructura cúbica de poros como lo son para la SBA-16, lo que revela en primera instancia que se ha obtenido la SBA-16 y en segunda la naturaleza mesoporosa se conserva en los materiales funcionalizados con grupos amino como lo es 3NH₂-SBA-16. En el interior de la Figura 3 (A y B) se incluyen las distribuciones del diámetro de poro para la SBA-16 y 3NH₂-SBA-16, en las que se observa una distribución uniforme en el diámetro de poro y que la presencia de los grupos amino no afecta al diámetro promedio de poro de la SBA-16.

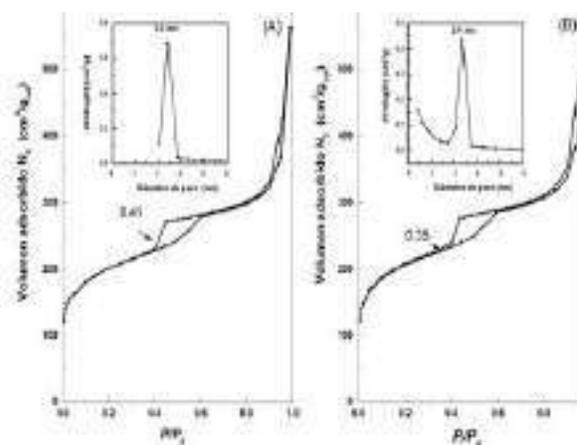


Figura 3. Isothermas de adsorción-desorción y distribución de tamaño de poro para SBA-16 pura (A) y 3NH₂-SBA-16 (B).

La Tabla 2 muestra los valores de algunos parámetros texturales como área, volumen y diámetro de poro para la muestra SBA-16 pura y su contraparte modificada con grupos amino. Como se esperaba, el área y el volumen mesoporo de la SBA-16 disminuyen después de la funcionalización con grupos amino, SBA-16 (650 m^2/g) \gg 3NH₂-SBA-16 (494 m^2/g), lo que sugiere que las especies injertadas parecen estar concentradas no sólo en la superficie externa sino también dentro de la superficie interna de los mesoporos del sustrato SBA-16.

Tabla 2. Propiedades texturales de los materiales adsorbentes antes y después de su funcionalización con grupos NH₂.

Muestras	SBET (m ² /g)	Perdida de Área SBET (%)	Vtotal (cm ³ /g)	dp (nm)
SBA-16	650	-	0.64	3.4
3NH ₂ -SBA-16	494	24.0	0.43	3.1

Espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR)

Para una mayor información acerca de la evidencia de la funcionalización de la SBA-16 con los grupos amino, se midieron los espectros de infrarrojo de los materiales en un rango de número de onda 300-4000 cm⁻¹. Para la SBA-16 funcionalizada con grupos amino, se espera que la vibración de estiramiento N-H ocurra en 3300 cm⁻¹ [20]. La Figura 4 muestra el espectro IR de los materiales mesoporosos SBA-16 y NH₂SBA-16, donde se observa el espectro típico de la sílice (SiO₂). A las bandas 811 y 1087 cm⁻¹ pertenecen las vibraciones simétricas y antisimétricas de los enlaces Si-O-Si. Las bandas 463 y 967 cm⁻¹ han sido asignadas a la vibración de torsión del enlace Si-O-Si y el grupo silano (Si-OH) respectivamente. Por lo que las bandas 1087, 811 y 402 cm⁻¹ son asignadas a la SBA-16 [21]. Finalmente, con el espectro de la NH₂SBA-16, podemos observar que las bandas características corresponden a las vibraciones de los enlaces N-H (1558, 950 y 3270 cm⁻¹) y los enlaces C-H (1927 y 1882 cm⁻¹) para los grupos metileno. Por lo tanto, estos resultados confirman que la funcionalización de la SBA-16 con grupo amino fue exitosa.

Espectroscopia UV-vis

Después de los experimentos de adsorción con el material adsorbente (SBA-16 y NH₂-SBA-16) se efectuó la caracterización del material por espectroscopia UV-vis, la cual nos permite observar la presencia del ion Cr adsorbido por el material.

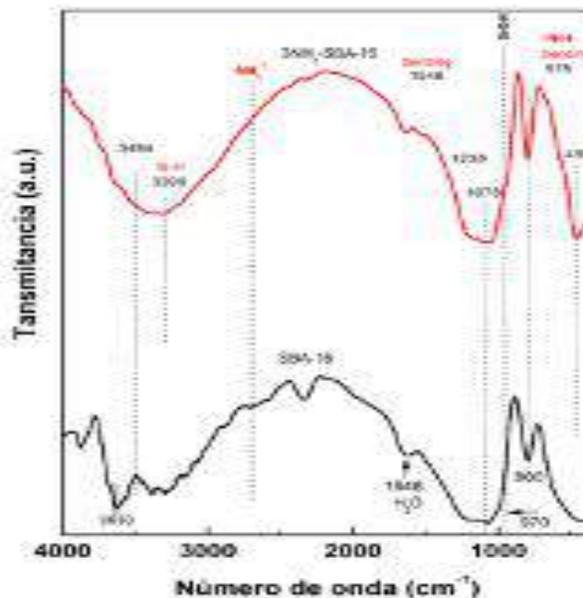


Figura 4. Espectro FT-IR del sustrato de la SBA-6 antes y después de la funcionalización con grupos amino.

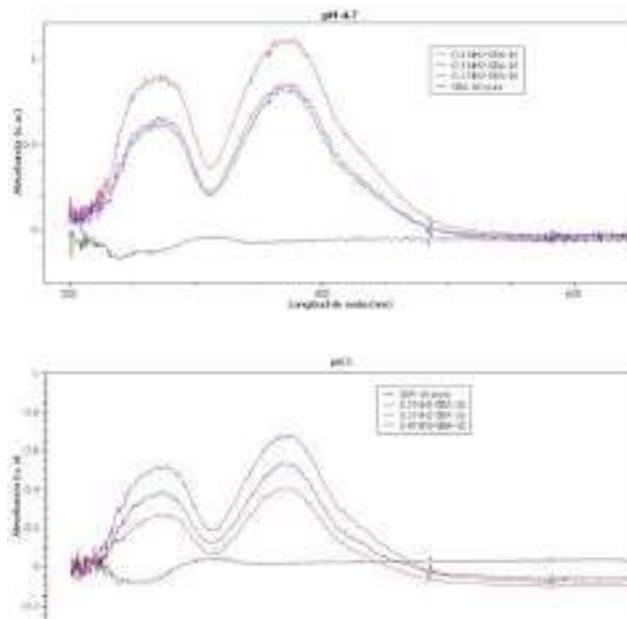


Figura 5. Espectros UV-vis de adsorción de Cr en el material adsorbente, a) experimento a pH 4.7 y b) experimento a pH 3.

Como se observa en la Figura 3, los espectros de los adsorbentes con diferentes cantidades de grupos amino (0.4, 0.3 y 0.2 NH₂-SBA-16) presentan bandas centradas en aproximadamente 275 y 375 nm que carac-



terizan a los iones de Cr (VI) adsorbido en los materiales mesoporosos [22, 23]. En cambio, el espectro del material adsorbente SBA-16 puro no presenta los picos característicos del ion Cr^{6+} , lo que nos indica que la SBA-16 pura no contiene sitios activos para la adsorción de los iones de Cr (VI).

CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación demostró que el material de sílice mesoporoso SBA-16 funcionalizado con grupos aminos es eficiente para la adsorción del ion de cromo hexavalente. El adsorbente SBA-16 puro sin grupos amino no mostró adsorción de iones de cromo (VI). En el caso de los adsorbentes basados en SBA-16, la accesibilidad más fácil de los iones de cromo a los grupos amino favorece la adsorción. Sin embargo, es necesario realizar estudios de cuantificación de la adsorción de cromo hexavalente para determinar la eficiencia de adsorción de los materiales mesoporosos SBA-16 funcionalizados con grupos amino.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo durante toda esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] N. Ahalya, R. D. Kanamadi y T. V. Ramachandra, "Biosorption of chromium (VI) from aqueous solutions by the husk of Bengal gram (*Cicer arietinum*)," *Electronic Journal of Biotechnology*, vol. 8, n° 3.
- [2] World Health Organization, Guidelines for drinking-water quality-health criteria and other supporting information, 2nd ed., vol. II.
- [3] ASTDR, Cromo. cas #7440-47-3, 2012.
- [4] M. Granados Silvestre, M. G. Ortiz López, I. Montúfar Robles y M. Iraheta, "Micronutrientes y diabetes, el caso de los minerales," *Journal de Medicina y Cirujanos*, pp. 119-125, 2014.
- [5] Y. Li, S. Zhu, Q. Liu, Z. Chen, J. Gu y J. Ma, "N-doped porous carbon with magnetic particles formed in situ for enhanced Cr (VI) removal," *Water Res.*, n° 47, pp. 4188-4197, 2013.
- [6] P. Misaelides, "Application of natural zeolites in environmental remediation: A short review," *Microporous and Mesoporous Materials*, n° 144, pp. 15-18, 2011.
- [7] H. Yoshitake, "Design of functionalization and structural analysis of organically modified siliceous oxides with periodic structures for development of sorbents for hazardous substances," *J. Mater. Chem.*, pp. 4537-4550, 2010.
- [8] D. Pérez Quintanilla y I. Sierra, "Factors affecting Hg (II) adsorption on hybrid nanostructured silicas: influence of the synthesis conditions," *J. Porous Mater.*, pp. 71-80, 2014.
- [9] A. Walcarius y L. Mercier, "Mesoporous organosilica adsorbents: nanoengineered materials for removal organic and inorganic pollutants," *J. Mater. Chem.*, pp. 4478-4511, 2010.
- [10] V. Hernández Morales, R. Nava, Y. J. Acosta Silva, S. A. Macías Sánchez, J. L. Pérez Bueno y B. Pawelec, "Adsorption of lead (II) on SBA-15 mesoporous molecular sieve functionalized with $-NH_2$ groups," *Microporous and Mesoporous Materials*, n° 160, pp. 133-142, 2012.
- [11] R. M. Grudzien, B. E. Grabicka y M. Jaroniec, *Adsorption*, n° 12, p. 293, 2006.
- [12] K. Flodström y V. Alfredsson, "Influence of the block length of triblock copolymers on the formation of mesoporous silica," *Microporous and Mesoporous Materials*, n° 59, pp. 167-176, 2003.
- [13] A. Feliczak Guzik, B. Jadach, H. Piotrowska, M. Murias, J. Lulek y I. Nowak, "Synthesis and characterization of SBA-16 type mesoporous materials containing amine groups," *Microporous and Mesoporous Materials*, n° 220, pp. 231-238, 2016.

[14] Norma Oficial Mexicana NOM-002-SE-MARNAT-1996 Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, 1996.

[15] Norma Oficial Mexicana NOM-001-SE-MARNAT-1996 Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, 1996.

[16] D. Zhao, P. Yang, D. I. Margolese, B. F. Chemelka y G. D. Stucky, "Synthesis of continuous mesoporous silica thin films with three-dimensional accessible pore structures," *Chemical Communications*, n° 22, pp. 2499-2500, 1998.

[17] S. Brunauer, P. Emmett y E. Teller, *J. Am. Chem. Soc.*, n° 60, p. 309, 1938.

[18] A. Walcarius, M. Etienne y J. Bessiere, *J. Am. Chem. Mater.*, n° 14, p. 2757, 2002.

[19] P. I. Ravikovitch y A. V. Neimark, *Langmuir*, n° 18, p. 9830, 2002.

[20] L. D. White y C. P. Tripp, *J. Colloid Interface Sci.*, n° 13, p. 2605, 1978.

[21] G. S. Balangero Bottazzi, M. L. Martínez, M. B. Gómez Acosta, O. A. Anunziata y A. R. Beltramone, *Appl. Catal.*, n° 404, p. 30, 2011.

[22] Z. Yu-Ting, Z. Ting-Ting, R. Man, Y. Yong-Liang y W. Jian-Hua, "A 2D porous Fe₂O₃/graphitic-C₃N₄/graphene ternary nanocomposite with multifunction of catalytic hydrogenation, chromium(VI) adsorption and detoxification," *Journal of Materials Chemistry A*, n° 5, pp. 3447-3455, 2017.

[23] J. Zhao, Z. Li, J. Wang, Q. Li y X. Wang, "Capsular polypyrrole hollow nanofibers: an efficient recyclable adsorbent of hexavalent chromium removal," *Journal of Materials Chemistry A*, n° 3, pp. 15124-15132, 2015.

EL ENDURECIMIENTO ANISOTRÓPICO EN LA SUPERFICIE DE FLUENCIA DE MODELOS CONSTITUTIVOS PARA SUELOS NO SATURADOS

Anisotropic hardening in the yield surface on constitutive
models for unsaturated soils

Eduardo Daniel Pérez García^{1*}, Eduardo Rojas González¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro

*Autor de correspondencia
eduardaniel1492@gmail.com

RESUMEN

La mecánica de suelos saturados evolucionó rápidamente después de que Terzaghi estableció el principio de esfuerzos efectivos, sin embargo, los modelos determinados para estos materiales no aplican para el caso de suelos no saturados. Por esa razón, en años recientes se han venido investigando estos materiales para establecer ecuaciones que ayuden a predecir su comportamiento adecuadamente. Existen diferentes fenómenos en los suelos no saturados tales como el endurecimiento por succión, el acoplamiento hidromecánico y la histéresis de la curva de retención. El propósito de este documento es discutir las ventajas y desventajas de tres modelos distintos incluyendo los parámetros que requieren y sus consideraciones fenomenológicas para determinar las bases de un modelo más sencillo y práctico.

Palabras clave: suelos no saturados, esfuerzos efectivos, acoplamiento hidromecánico, superficie de fluencia, endurecimiento anisotrópico, histéresis

ABSTRACT

The mechanics of saturated soils evolved rapidly after Terzaghi established the principle of effective stress however the model established for these materials could not be applied for unsaturated soils. For that reason, in recent years, these materials have been investigated to establish the required equations to correctly model their behavior. There are different phenomena present on unsaturated soils such as: suction hardening, hydro-mechanical coupling and hysteresis of the retention curve. The purpose of this document is discussing the advantages and disadvantages of three different models including their parameters and their phenomenological considerations to establish the basis for a simpler and more practical model.

Keywords: unsaturated soils, effective stress, hydromechanical coupling, yield surface, anisotropic hardening, hysteresis

INTRODUCCIÓN

Los suelos no saturados son la combinación de tres distintas fases: partículas sólidas, partículas de aire y agua que ocupan el denominado espacio poroso. Su comportamiento de esfuerzo-deformación es complejo y está influenciado por muchos factores como cargas aplicadas externamente, tipos de suelo, estructura, densidad y succión que surgen de la tensión superficial a través de la interfaz aire-agua dentro del suelo. En particular, la succión aumenta la resistencia al corte y endurece la respuesta de la estructura del suelo. Al mojarse, sin embargo, este aumento en la rigidez de la estructura interna del suelo se pierde y puede estar asociado con un colapso volumétrico grande e irreversible. Los suelos no saturados se encuentran prácticamente distribuidos por toda la superficie terrestre y estas características de comportamiento necesitan ser estudiadas para ayudar a mitigar muchos problemas de ingeniería al buscar su aplicación en cimentaciones, pavimentos y taludes por mencionar algunos. Por esto se ha buscado el continuo desarrollo de modelos constitutivos para suelos no saturados, línea de investigación que se ha visto enriquecida en por lo menos los últimos 15 años.

Los primeros modelos constitutivos para suelos no saturados hacían uso de las denominadas variables independientes de esfuerzo, las cuales eran representadas generalmente por el esfuerzo neto ($\sigma_n = \sigma - u_w$) y la succión ($s = u_a - u_w$), donde σ representa el esfuerzo total, y u_a y u_w las presiones de aire y de agua, respectivamente. Esta consideración se tomaba en cuenta porque se demostró experimentalmente que mientras estas dos variables de esfuerzo se mantuvieran constantes, se podían hacer variar los valores de los elementos de esfuerzo, u_a y u_w sin afectar el comportamiento del suelo [1]. Estudios posteriores demostraron que es posible obtener estas variables de forma teórica al aplicar el principio que establece que el equilibrio de un sistema multifase es igual a la suma del equilibrio de cada una de sus fa-



ses. A partir de estos resultados, se han realizado una gran cantidad de ensayos en suelos no saturados para determinar la influencia de cada una de estas variables en el comportamiento volumétrico y de resistencia. Sin embargo, se han encontrado obstáculos para explicar de manera más precisa el comportamiento de estos materiales, uno de esos obstáculos sucede cuando aplicamos esfuerzos al suelo. Éste se deforma, los poros se reducen, y la curva de retención, el esfuerzo por succión y las deformaciones cambian de tal manera que hay que ir actualizando las curvas de retención y los esfuerzos por succión con cada incremento de carga. Esta interacción entre los esfuerzos aplicados al suelos y las propiedades hidráulicas se denomina acoplamiento hidromecánico.

Modelo del Estado Crítico

Uno de los modelos más prácticos para suelos no saturados es el modelo del estado crítico, debido a su sencillez y a que involucra el uso de pocos parámetros. Si un material fino es sometido a un ensayo de compresión isotrópica, su trayectoria de respuesta puede graficarse como una línea recta de pendiente igual a λ en los ejes logaritmo del esfuerzo medio efectivo (p') contra volumen específico ($v = 1 + e$), donde e representa la relación de vacíos del material, tal como se muestra en la Figura 1, donde N representa el volumen específico para un esfuerzo medio efectivo unitario, mientras que su respuesta en descarga-recarga se puede trazar como línea recta de pendiente k .

La Figura 1 muestra que cuando se trazan las trayectorias de respuestas de un suelo fino para ensayos drenados y no drenados realizados en probetas normalmente consolidadas (NC) y preconsolidadas (PC) se obtienen las curvas que se muestran en la figura. Se pudo observar que si se unían los puntos finales de todas las trayectorias de respuesta de estos últimos ensayos, que representan las condiciones de falla del material para

cada caso, se alineaban en una recta paralela a la línea de compresión virgen isotrópica (CVI). A esta línea se le denominó del Estado Crítico (CSL) y representa una condición donde el material alcanza un estado de plasticidad perfecta y la deformación desviadora crece indefinidamente mientras los esfuerzos efectivos y la deformación volumétrica total se mantienen constantes.

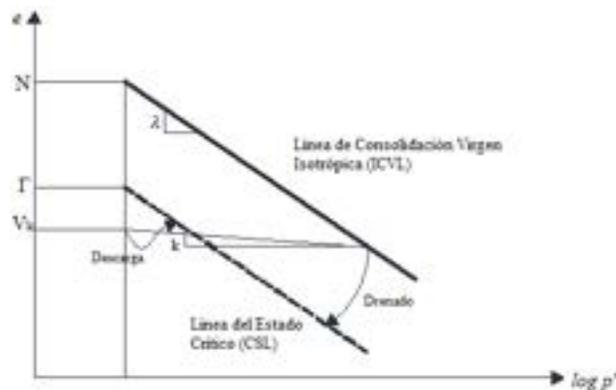


Figura 1. Trayectorias de respuesta para diversos ensayos y línea del estado crítico (CSL).

Modelo Cam-Clay Modificado

Este modelo permite simular el comportamiento de suelos arcillosos y fue desarrollado por Roscoe y Burland [2]. Se denomina modelo modificado Cam-Clay (MCC), que se basa en cuatro principios: propiedades elásticas, superficie de fluencia, potencial plástico y ley de endurecimiento. Esta teoría fue desarrollada para suelos normalmente consolidados y ligeramente sobreconsolidados. Históricamente, se puede considerar el modelo Cam-Clay como el primer modelo de endurecimiento plástico que fue adoptado de forma general para suelos. Una de las hipótesis básicas en el modelo modificado Cam-Clay es considerar que la superficie de fluencia coincide con el potencial plástico, lo cual implica una regla de flujo asociada y la aceptación del criterio de normalidad (el incremento de deformación plástica es normal, en todo punto, a la curva de fluencia o plastificación). En la Figura 2, se representan

el plano del volumen específico (v) y el logaritmo natural del esfuerzo efectivo ($\ln p'$), la respuesta de un material al ser sometido a consolidación isotrópica. Además, se asume la hipótesis de endurecimiento isotrópico, es decir, que las sucesivas superficies de fluencia, que aparecen al aumentar las cargas sobre la muestra, aumentan de tamaño, pero sin cambiar de forma.

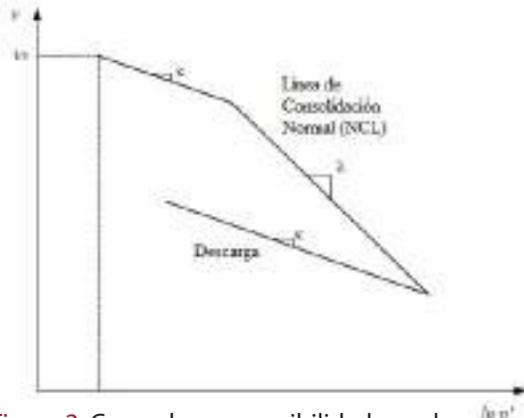


Figura 2. Curva de compresibilidad para la respuesta del material durante la consolidación isotrópica.

El propósito de este artículo es hacer un análisis de tres modelos constitutivos basados en las consideraciones anteriores e investigar los parámetros que involucran, cómo plantean la superficie de fluencia, así como realizar algunos comentarios acerca de la regla de endurecimiento que siguen.

Modelo de Russell y Khalili

El modelo propuesto por Russell y Khalili [3] está basado en la teoría de una superficie de fluencia plástica límite para generar una transición suave entre el comportamiento elástico y el elastoplástico, debido a su gran versatilidad y su precisión al reproducir el comportamiento esfuerzo-deformación para varios tipos, presentado un buen ajuste entre los resultados experimentales y analíticos. El modelo es una extensión de la propuesta realizada previamente por Russell y Khalili [4]. Basado en el marco del estado crítico, el modelo utiliza el concepto de esfuerzos efectivos de Bishop con el parámetro de Bishop que depende únicamente de

la succión. La ventaja de usar la ecuación de esfuerzos efectivos radica en que la deformación elástica y la resistencia al corte limitante del suelo pueden ser expresadas completamente en términos de un único esfuerzo efectivo en lugar de tener dos o tres variables de esfuerzo independientes. La plasticidad previa y posterior al pico es tomada en cuenta. La carga y la superficie de fluencia muestran la misma forma y son representadas por una función logarítmica con endurecimiento isotrópico, la cual a su vez depende de la deformación volumétrica. Una regla de mapeo radial simple centrada en el origen es usada para definir la proyección del estado de esfuerzos en la superficie fluencia.

Además, se adopta una regla de flujo no asociada con un potencial plástico obtenido de la integración de una regla basada en el endurecimiento-ablandamiento isotrópico del suelo, la matriz se relaciona con un cambio en la succión del suelo, así como en la deformación volumétrica. La regla de flujo depende de la posición del estado de esfuerzos con respecto a la línea del estado crítico (CSL), así como de la dirección del vector normal del potencial plástico. Esta característica del modelo asegura que se presentará contracción cuando el estado de esfuerzos esté por debajo de la línea del estado crítico (CSL) y que en el caso de que el estado de esfuerzos esté por encima de esta línea el suelo se mostrará expansión.

Para describir el módulo de endurecimiento, es dividido en dos partes: una para la superficie de fluencia y otra para la distancia entre la superficie de carga y la de fluencia. Este último módulo de endurecimiento puede definirse de forma arbitraria siempre y cuando sea nulo en la superficie de fluencia y utilice un parámetro que dependa de las condiciones iniciales. El modelo toma en cuenta los efectos de un suelo no saturado en la definición del estado crítico y también los efectos de la trituración de partículas con altos esfuerzos en suelos arenosos. También incorpora tanto la variación de la línea del estado crítico (CSL) como la de la de conso-



lidación isotrópica (ICVL), debido al endurecimiento por succión mediante una ecuación analítica escrita en términos de la succión y la deformación volumétrica de la muestra.

Por simplicidad son adoptadas notaciones triaxiales e histéresis hidráulica y son ignorados aquellos fenómenos dependientes del tiempo. Una desventaja de este modelo es que requiere de varios parámetros para su ajuste y funciones tales como: el exponente de la superficie de fluencia ($1/N$), un parámetro de estado inicial k_m , una función k_d para definir la disipación de la energía, una función que define la pendiente de la línea de compresión isotrópica dependiente de la succión ($\lambda(s)$) y una función que define el desplazamiento de la ICVL con la succión. Además, como el potencial plástico no cruza el eje de esfuerzo efectivo medio en ángulo recto, aparecen tensiones desviadoras durante la carga isotrópica.

Superficie de Fluencia

El modelo de plasticidad de la superficie límite presentado por los autores es una extensión de la que aparece en Russell y Khalili [4] que fue desarrollada inicialmente para describir el comportamiento esfuerzo-deformación para una arena de cuarzo saturada a través de un rango de esfuerzos, incluidos aquellos que son suficientes como para causar el aplastamiento de partículas y sometidos a distintas series de cargas. Las características subyacentes del modelo son suficientemente generales como para que éste también sea adecuado para describir el comportamiento de esfuerzo-deformación de un amplio rango de suelos no saturados.

El estado crítico actúa como una condición de referencia hacia la cual todos los estados se acercan con el aumento del esfuerzo cortante. Por lo tanto, el estado crítico tiene un papel importante en el modelo. A menudo se asume que la línea de estado crítico (CSL) es recta en los planos $v - \ln p'$ y $q - p'$ para arenas saturadas y arcillas, sin

embargo, hay evidencia experimental de que la CSL para arenas en el plano $u - \ln p'$ puede no ser recta, ya que se ve afectada por el aplastamiento de partículas cuando se someten a altos esfuerzos. Para este modelo se asume que la CSL para arenas saturadas toma una forma lineal segmentada en tres partes. Para el caso de las arcillas saturadas existe gran evidencia experimental que asegura que la relación entre el esfuerzo desviador y esfuerzo medio efectivo se aproxima a un valor constante a comparación de cuando se aplican esfuerzos superiores a los que ha experimentado el suelo en su historia geológica, por lo tanto la CSL es lineal y pasa por el origen, al adoptar el criterio de falla establecido por Mohr-Coulomb y definido por una pendiente M en función del ángulo de fricción interna del suelo en condiciones del estado crítico ϕ'_{cs} , donde ambas variables son variables materiales.

Es así que se asume una regla de flujo no asociada que garantiza que las deformaciones volumétricas plásticas para arcillas y arenas sean igual a cero en el estado crítico. La existencia de una región puramente elástica se ignora de tal manera que toda deformación es considerada elasto-plástica; el suelo siempre se encuentra fluyendo y el estado de esfuerzos se encuentra en la superficie de carga. También, la histéresis comúnmente observada en los ciclos de descarga-recarga de arcillas sugiere que la deformación no es puramente elástica. La deformación plástica se produce cuando el estado de esfuerzos, indicado mediante σ , recae sobre o dentro de la superficie de fluencia. Por simplicidad se considera que tanto la superficie de fluencia como la de carga son de la misma forma y son homologas en cuanto al origen en el plano $q - p'$. Además, se asume una regla simple de mapeo radial para el crecimiento de la superficie de fluencia, la cual establece que una línea recta que parte del origen y el estado de esfuerzo del suelo (σ) intersecta la superficie de falla en $\bar{\sigma}$ (como se muestra en la Figura 3), es σ ni se observa en ninguna figura. así que se deduce que los vectores normales

unitarios de la superficie de carga y la superficie de fluencia en σ y $\bar{\sigma}$ son lo mismo. En la Figura 3 se muestran de forma gráficas las superficies de fluencia y carga propuestas por [3] así como algunas de las condicionales que determina el modelo que proponen. En la Tabla 1 se enlistan los parámetros, que requiere el modelo, ordenados de acuerdo con su función.

Tabla 1. Lista de Parámetros para el modelo propuesto por [3].

Parámetro	Descripción
λ_0	Valor inicial de la pendiente de la línea de compresión
λ_{cr}	Valor de la pendiente durante el aplastamiento de partículas
λ_f	Valor final de la pendiente en esfuerzos extremadamente altos
M_{cs}	Pendiente de la línea del estado crítico (CSL), en función del ángulo de fricción del suelo en condiciones del estado crítico
K	Módulo de Bulk
G	Módulo de Corte
d	Función de dilatación
p_c'	Parámetro que controla el tamaño de la superficie de carga
\bar{p}_c'	Parámetro que controla el tamaño de la superficie de fluencia
N	Constante de curvatura
R	Constante material que representa la relación entre p' en la intersección de la superficie de carga con la línea $y = \dots$

Hidráulicos	c_m	Factor de compresibilidad de la estructura del suelo respecto a la succión
	$\gamma(s)$	Succión dependiente del valor del cambio en la línea límite de compresión isotrópica (LICL) no saturada a la línea límite de compresión isotrópica (LICL).
Acoplamiento	κ_d	Potencial plástico
	κ_m	Parámetro del módulo de endurecimiento

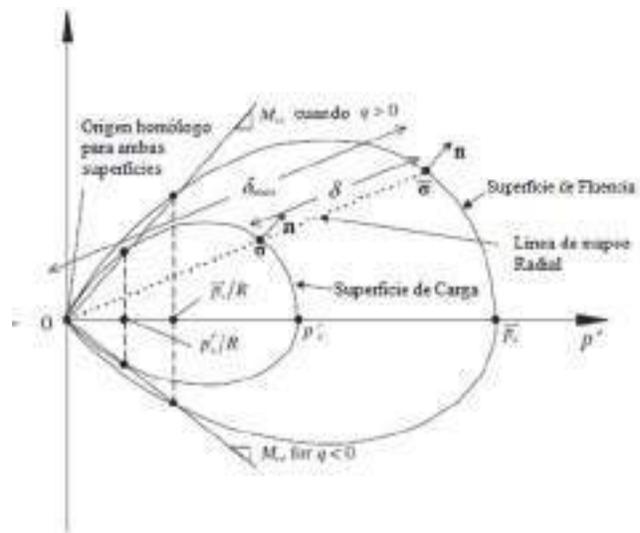


Figura 3. Superficie de carga, superficie de fluencia y línea de mapeo radial en el plano $q - p'$ propuesta por [3].

Las deformaciones plásticas ocurren cuando el estado de esfuerzos actuales del suelo σ se encuentra sobre o dentro de la superficie de fluencia, lo que se logra definiendo el módulo plástico como una función decreciente de la distancia entre σ y un punto en la imagen sobre la superficie de fluencia, denominado $\bar{\sigma}$. En la Figura 1 se puede apreciar la superficie de carga y de fluencia propuestas en el modelo de [4], ambas graficadas en el mismo plano $q - p'$ y con un origen homólogo para ambas superficies. Se asume que \bar{p}_c experimenta endurecimiento isotrópi-



co con cambios en s como también deformaciones volumétricas plásticas similares a las que mencionan Loret y Khalili [4], [10]. Para suelos colapsables el endurecimiento por succión ocurre como resultado de un incremento en \bar{p}'_c más rápido en comparación con \bar{p}' durante un aumento en la succión del suelo.

Modelo de Zhou y Sheng

Zhou y Sheng [5] proponen un modelo basado en la ecuación de Bishop para suelos no saturados. El modelo es capaz de reproducir el comportamiento mecánico típico de los suelos saturados en lo que se refiere a la variación de densidad inicial (o relación de sobreconsolidación), sin ningún otro tipo de parámetros más allá de los requeridos por el modelo modificado Cam-clay [6]. El modelo se extiende desde las condiciones de suelo saturado a condiciones no saturadas al utilizar el término de esfuerzos por saturación para simular el comportamiento hidromecánico totalmente acoplado de suelos compactados con diferentes densidades iniciales. La superficie de fluencia, superficie de subcarga y las correspondientes reglas o módulos de endurecimiento se generan primero en el espacio del esfuerzo efectivo medio de Bishop, el esfuerzo desviador y el grado efectivo de saturación $p' - q - S_e$. Al contrario que la mayoría de los modelos comunes donde la succión se usa como el tercer eje además del esfuerzo efectivo medio y el esfuerzo desviador, este modelo usa el grado efectivo de saturación como el tercer eje. Incluye una superficie de colapso bajo carga (LCYS) similar en forma a la del Modelo Básico de Barcelona, pero escrita en términos del grado efectivo de saturación. El índice de compresibilidad también depende del grado efectivo de saturación del suelo.

El modelo usa una regla de endurecimiento isotrópico común para la superficie de fluencia. Para el modelo hidráulico se emplea una ecuación de Van Genuchten modificada, que incluye la influencia del cambio de volumen en las curvas de retención de agua

en el suelo (SWRC). Los ciclos de secado y humedecimiento se pueden simular utilizando el modelo hidráulico [7]. La relación de vacíos inicial se considera como una variable clave para el comportamiento del suelo. Se requiere de dos parámetros de ajuste para el acoplamiento hidromecánico, además los fenómenos de endurecimiento por succión y el cambio de la ICVL y CSL con succión no se incluyen directamente en el modelo.

Tabla 2. Lista de Parámetros para el modelo propuesto por [5].

Parámetro		Descripción
Mecánicos	λ_0	Índice de compresibilidad elasto-plástico en suelos saturados
	κ	Índice de compresibilidad elástico en suelos saturados
	λ_d	Índice de compresibilidad elasto-plástico en suelos secos, puede ser tomado como el valor de κ si no se tienen datos disponibles
	M	Relación de esfuerzos en el estado crítico para suelos saturados
	ν	Relación de Poisson
	N en p_r	Punto de inicio de la línea de compresión normal
Hidráulicos	a_d, a_w, m, n	Límites de secado-humedecimiento (ecuación de Van Genuchten)
	b	Parámetro para comportamiento no lineal
Interacción hidromecánica	a_1	Primer parámetro de interacción hidromecánica
	a_2	Segundo parámetro de interacción hidromecánica

Este modelo requiere 13 parámetros, 6 para la respuesta mecánica del suelo, 5 para el comportamiento de la retención de agua del suelo y 2 para la interacción hidromecánica.

Superficie de fluencia

Con respecto a la modelación tanto de suelos saturados como no saturados, en especial a la interacción hidromecánica y a la transición entre el estado saturado al no saturado, se ha demostrado que las relaciones esfuerzo-saturación son más usadas que las relaciones esfuerzo-succión. Las variables constitutivas básicas para el modelo son el grado de saturación efectivo y el esfuerzo efectivo basado en la ecuación de Bishop. Distintos estudios experimentales han demostrado que el comportamiento hidráulico en suelos se rige por la succión, así como por la deformación volumétrica, debido a los esfuerzos netos. El modelo integra este último fenómeno en una función general para expresar el cambio en el grado de saturación efectivo. La deformación volumétrica causada por un cambio en la succión del suelo bajo un esfuerzo neto constante es contenida en esta función. Para calibrar algunos parámetros hidráulicos es necesario conocer la curva de retención de agua del suelo.

El modelo modificado Cam-Clay (MCC) es usado para extender la superficie de fluencia en el estado isotrópico (superficie de carga-colapso) a un estado de esfuerzos en tres direcciones. De forma análoga al modelo modificado Cam-Clay, la deformación plástica volumétrica es usada para controlar el endurecimiento de la superficie de fluencia, la cual en sí toma la forma elíptica de acuerdo con el MCC, la superficie de carga-colapso y una regla de endurecimiento. La superficie de fluencia de carga-colapso (L-C) describe la relación entre el límite elástico equivalente y el esfuerzo de fluencia en estados no saturados, la cual está controlada por el nivel de saturación efectivo (S_e) y el primer parámetro de interacción hidromecánico (α_1). La barra "-" se usa para diferenciar las variables vin-

culadas a la superficie de fluencia con las variables asociadas a la superficie de sub-carga, M es la relación de esfuerzos en el estado crítico, que se toma como una variable independiente de las condiciones de saturación y succión. Ambas superficies tanto de carga como de Fluencia son mostradas en la Figura 4.

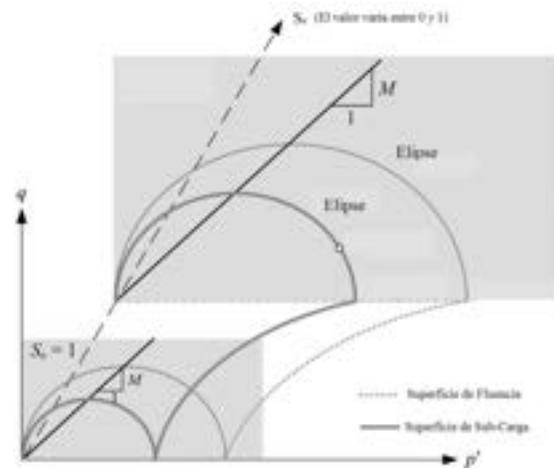


Figura 4. Superficie de fluencia propuesta por [7].

El modelo presenta una superficie de sub-carga en el plano tridimensional $p' - q - S_e$, la cual se asume que es análoga a la superficie de fluencia controlada por una función basada en la intersección entre el grado de saturación específico y el esfuerzo efectivo. La regla de endurecimiento menciona que si el punto del estado actual de esfuerzos se encuentra en la superficie compresión normal, en este caso, ni el pico de fuerza o ablandamiento ocurrirán. Si el suelo es compactado y el punto del estado de esfuerzos se encuentra debajo de la superficie compresión normal se presentará un ablandamiento. La magnitud de la fuerza máxima y el comportamiento de reblandecimiento depende del valor de la pendiente M .

Modelo de Ma y col.

El modelo se basa en una serie de observaciones experimentales para investigar el comportamiento hidráulico y mecánico de un suelo limoso compactado en condiciones no saturadas. Con estas observaciones, se pudo



establecer un modelo constitutivo elastoplástico de suelos dilatantes no saturados que es capaz de describir el efecto del acoplamiento de la histéresis de la curva de retención y la deformación plástica. Se desarrolla en el marco de la mecánica de suelos de estado crítico. Aunque tanto la histéresis mátrica, la deformación plástica de la estructura interna del suelo como su acoplamiento son de las principales preocupaciones, el modelo hace énfasis a la dilatación y ablandamiento del suelo no saturado bajo condiciones de corte.

El modelo presentado por Ma et al. [8] incorpora la ecuación de Bishop y el grado de saturación como parámetro de Bishop para calcular los esfuerzos efectivos. Este modelo está basado en la superficie elíptica del modelo modificado Cam-Clay (MCC). El modelo hidráulico Feng y Fredlund [6] se utiliza para simular los ciclos de secado y humedecimiento e incluye la dependencia de las curvas de retención suelo-agua en las deformaciones volumétricas plásticas. El modelo constitutivo usa una regla de flujo no asociada a través de un término de dilatancia. La regla de endurecimiento considera el efecto de las deformaciones plásticas volumétricas y desviadoras. La influencia de las deformaciones plásticas desviadoras se incluye por medio de un parámetro que depende del grado de saturación y succión. También considera una función de corrección que considera el efecto de endurecimiento de un material no saturado que depende del valor actual de varios parámetros como la succión, el grado de saturación y la deformación volumétrica plástica de la muestra. Este modelo no considera el cambio de la ICVL o CSL debido al endurecimiento por succión.

Superficie de fluencia

La relación esfuerzo-deformación se desarrolla a partir de la generalización del modelo modificado Cam-Clay (MCC), en el que la función de fluencia está dada por los valores de la presión de preconsolidación p_c , la cual en condiciones de total saturación es una

función de deformación volumétrica plástica y deformación desviadora plástica. Para el caso de condiciones parcialmente saturadas p_c depende de la succión matricial y el grado de saturación, así como la deformación volumétrica plástica y la deformación desviadora plástica. Por lo tanto, se sugiere aquí que la línea de estado crítico (CSL) para el caso de condiciones no saturadas es la misma que cuando el suelo se encuentra en condiciones saturadas, y la línea de falla simplemente está dada por el esfuerzo desviador q , en función de la pendiente de la línea del estado crítico M , la cual a su vez es independiente de la succión matricial o el grado de saturación.

Se ha demostrado que el suelo puede endurecerse aún más después de que ocurre la dilatación. Por lo tanto, al desarrollar una regla o módulo de endurecimiento, se debe tomar en cuenta el efecto de las deformaciones plásticas. Con base en los resultados experimentales, se puede mencionar que el suelo se vuelve más rígido cuando la succión matricial es más grande, y, por consiguiente, el efecto de endurecimiento de la deformación desviadora plástica se vuelve más evidente. Por lo tanto, aquí se propone la presión de preconsolidación inicial p_{c0} y un parámetro β definido como el coeficiente de proporcionalidad del efecto de endurecimiento por deformaciones plásticas desviadoras, el cual está en función de la succión y el grado de saturación. A partir de la función de endurecimiento propuesta, la superficie de fluencia aumenta por la disminución en el grado de saturación o por el aumento en la succión. Cuando el suelo está completamente saturado, el efecto de la capilaridad en el endurecimiento desaparece. Claramente, la función propuesta puede pasar del estado saturado al estado no saturado sin problemas, por lo que ambos estados se pueden describir en un solo marco. Además, se puede implementar numéricamente de forma directa.

Los parámetros para el modelo pueden ser divididos en tres grupos: los parámetros constitutivos convencionales, parámetros de

la curva de retención y los de acoplamiento.

Tabla 3. Lista de parámetros para el modelo propuesto por [8].

Parámetro	Descripción		
Relaciones Esfuerzo Deformación	λ	Pendiente de la línea de compresión	
	κ	Pendiente de la línea de recompresión	
	G	Módulo de corte	
	n	Parámetro adimensional que describe la contribución del parámetro de estado en la relación de esfuerzo de dilatación.	
	β_o	Coefficiente de proporcionalidad del efecto de endurecimiento por deformaciones plásticas desviadoras para suelo saturados y no saturados	
Curva de Retención Suelo-Agua	b_{DR}^0 d_{DR}^0 b_{WT}^0 d_{WT}^0	Parámetros del modelo de Feng y Fredlund	
	S_r^{irr}	Grado de saturación residual	
	c	Parámetro utilizado para describir el comportamiento	
	Acoplamiento	r m	Parámetros materiales para el endurecimiento por el efecto de no saturación
		α_{DR} α_{WT}	Parámetros para describir el efecto de la deformación en la Curva de retención Suelo-Agua

Para la calibración del modelo es necesario contar con algunos parámetros experimentales como es el caso de la curva de retención suelo-agua donde los valores de b_{DR}^0 , d_{DR}^0 , b_{WT}^0 , d_{WT}^0 son determinados por medio del proceso de adecuar la curva que más se asemeje a los datos experimentales usando

los límites de la curva de retención suelo-agua. El valor c también es obtenido al adecuar los valores numéricos con los experimentales y escoger el valor que mejor los aproxime.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo desarrollado por [3] presenta una superficie simple de fluencia en un marco del estado crítico que es adecuado para describir el comportamiento esfuerzo-deformación de una amplia gama de suelos no saturados. Esto es posible mediante el uso del concepto de esfuerzo efectivo y, específicamente, al adoptar una simple regla elástica-isotrópica. Se definieron funciones versátiles para la superficie de carga y la superficie de fluencia que pueden describir las diversas direcciones de carga de diferentes suelos. De la misma manera, se adoptó un potencial plástico ya que es adecuado para una amplia variedad de tipos de suelos, incluye un módulo de endurecimiento que toma en cuenta el endurecimiento isotrópico, debido a deformaciones plásticas y la succión. La versatilidad del modelo se destacó por su capacidad para simular con alta precisión el comportamiento esfuerzo-deformación de arcillas caoliníticas no saturadas sometidas a tres trayectorias de carga de prueba triaxial y el comportamiento esfuerzo-deformación de la arena no saturada sometida a dos trayectorias de carga de prueba triaxial y la ruta de carga de compresión oedométrica.

Por otro lado, [5] presenta un modelo constitutivo hidromecánico para suelos no saturados en varias densidades iniciales. El modelo se basa en la plasticidad de subcarga para suelos saturados y el enfoque del esfuerzo por saturación. Este modelo se reduce al modelo modificado Cam-clay si el suelo está normalmente consolidado y completamente saturado. El modelo constitutivo se propone en el espacio del esfuerzo efectivo de Bishop y el grado efectivo de saturación inicial, y la matriz de se deriva en el espacio de esfuerzos netos y saturación contra



la deformación y succión. El modelo propuesto entre las ventajas que ofrece es que es capaz de reproducir el comportamiento hidromecánico acoplado de suelos no saturados. Se introducen dos parámetros de interacción hidromecánica (a_1 y a_2) para cuantificar el efecto de la saturación en la compresibilidad de un suelo en condiciones no saturados y el efecto del cambio de volumen en la variación en la saturación. Además, se introduce una superficie de subcarga y un parámetro de endurecimiento unificado para cuantificar el efecto de densidad inicial en el comportamiento hidromecánico acoplado de suelos no saturados. El modelo requiere 13 parámetros, los cuales pueden ser fácilmente calibrados mediante pruebas de laboratorio. Las comparaciones entre las predicciones del modelo y los resultados de las pruebas para suelos no saturados y compactados a varias densidades iniciales confirman la validez del modelo constitutivo propuesto.

Mientras que para el caso de la propuesta realizada por [8] se demuestra que el factor clave que influye en la capacidad de retención de agua en un suelo es la relación de vacíos, y el estado de esfuerzos puede influir en la curva de retención suelo-agua únicamente cambiando la relación de vacíos, es decir, la deformación. Se realizó una serie de pruebas triaxiales para estudiar la resistencia y flujo de plástico con distintos valores de succión prestando especial atención en los cambios de volumen, encontrando que, durante la aplicación de esfuerzos cortantes, la deformación volumétrica se transforma de positiva (contracción) a negativa (dilatación). Se propone un modelo elastoplástico que acopla el comportamiento hidráulico y mecánico de los suelos no saturados en el marco del estado crítico del suelo. El modelo introduce el parámetro de estado en la relación de dilatación para dar cuenta del efecto de las condiciones iniciales incluida la relación de vacíos, estado de esfuerzos y condiciones de saturación. El comportamiento del mismo suelo con diferentes condiciones iniciales puede ser simulado usando solo un

conjunto de parámetros del material. Se propone una regla de flujo no asociada, similar a la deducida del comportamiento de la arena, y a su vez el predecir la deformación del volumen durante el proceso de corte basado en experimentación en suelos limosos.

El modelo introduce la curva de retención suelo-agua no sólo para describir la histéresis capilar en los suelos no saturados que experimentan arbitrariamente en los ciclos de humedecimiento-secado, sino también para caracterizar el efecto de la historia hidráulica en la deformación de la estructura interna del suelo a través de una función de endurecimiento. La regla de endurecimiento de la presión de preconsolidación considera el efecto de la deformación plástica y el efecto de la succión matricial en la dilatación. También se tiene en cuenta el efecto de la deformación plástica sobre la curva de retención suelo-agua. De acuerdo con la simulación de los resultados de la prueba, el modelo se puede verificar para reflejar las deformaciones características de suelos limosos no saturados con una alta precisión.

La ecuación de Bishop para esfuerzos efectivos ha permitido unificar la condición de falla de los suelos no saturados en una línea para cualquier valor de succión. Con estos valores se puede obtener el parámetro λ de Bishop y de ahí el esfuerzo efectivo del suelo, sin embargo, es necesario proponer una ecuación para la deformación volumétrica que utilice pocos parámetros y sea capaz de reproducir los aspectos principales del comportamiento volumétrico de los suelos no saturados, tales como la denominada rigidez por succión, la cual sucede al aumentar la succión en el suelo cuando se somete a incrementos del esfuerzo medio neto así como su posterior reblandecimiento ante cargas elevadas, su rápida estabilización volumétrica bajo incrementos de succión y su posterior comportamiento elástico a altas succiones. Además, el uso de los esfuerzos efectivos facilita la representación del comportamiento volumétrico de los suelos al igual que el estado crítico de muestras suje-

tas a distintas húmedas, lo que genera diferentes valores de succión como una familia de líneas paralelas que muestran la misma pendiente. La ecuación podría conformar un marco teórico unificado para el comportamiento de los suelos tanto saturados como no saturados. Los modelos elastoplásticos basados en el principio de los esfuerzos efectivos de Bishop buscan integrar el fenómeno del acoplamiento hidromecánico y deben acoplarse con un modelo basado en el estado crítico y así sea posible simular el comportamiento hidráulico del suelo.

Aunque existen varios modelos que buscan reproducir el comportamiento de los suelos no saturados, no todos son capaces de simular ciertas particularidades de estos materiales. En los últimos años se han desarrollado modelos que consideran una superficie de fluencia que crece de forma isotrópica, sin embargo, experimentalmente se ha demostrado que no sucede así.

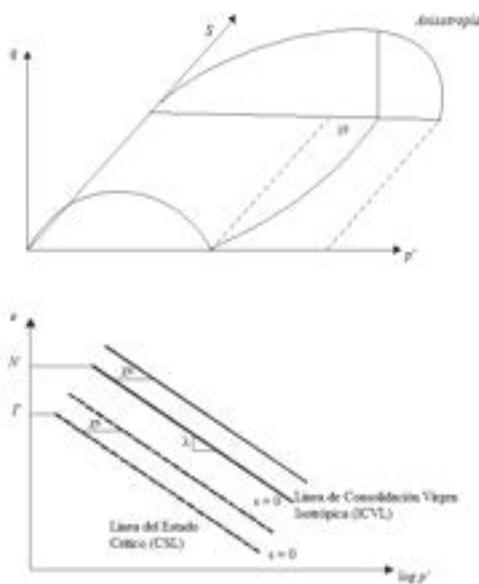


Figura 5. a) Crecimiento isotrópico de la superficie de fluencia. b) Desplazamiento de la línea del estado crítico en función del valor de la succión y el parámetro de bishop.

Existe un potencial de deformaciones plásticas que toma la forma de la superficie de fluencia que se muestra en la Figura 5a, donde se grafica el espacio $q - p' - s$. El tamaño

de la superficie de fluencia depende de la succión y del esfuerzo de preconsolidación. También se ha demostrado que cuando el suelo se encuentra en estado crítico y la succión del suelo aumenta, la línea del estado crítico se desplaza en función del valor de la succión como se muestra en la Figura 5b.

Esto implica que el endurecimiento de la superficie de fluencia en los modelos para suelos no saturados debe ser de tipo anisotrópico para tomar en cuenta el desplazamiento de la línea del estado crítico con la succión, es decir, la superficie de fluencia debe cambiar de forma conforme crece la succión.

CONCLUSIONES

La modelación en suelos no saturados plantea establecer una mecánica de suelos general con la que podamos predecir el comportamiento general de los suelos. Estos modelos deben utilizar pocos parámetros y deben ser aplicables a todo tipo de suelos, sin limitaciones asociadas a sus condiciones de saturación. La modelación ha tenido un importante crecimiento en los últimos años al incluir los fenómenos de endurecimiento por succión, el acoplamiento hidromecánico y la histéresis de las curvas de retención, los cuales nos han ayudado a mejorar notablemente los resultados, sin embargo, algunos modelos involucran muchos parámetros que pueden llegar a ser hasta 40 e incluso algunos de éstos a su vez requieren ser calibrados previamente. Esto último complica su aplicación práctica. Por lo tanto, todavía es una tarea pendiente el establecer modelos sencillos que utilicen pocos parámetros.

Además, se debe asegurar que se mantenga la simetría de la matriz de rigidez en los modelos constitutivos ya que resulta bastante ventajoso para el análisis basado en el método de elementos finitos. En la sección de resultados y discusión son establecidas las bases para un modelo que incluya una superficie de fluencia que adopte diferen-



tes formas (endurecimiento anisotrópico) y la condición del desplazamiento del punto del estado crítico en la superficie de fluencia, debido al fenómeno de endurecimiento por succión, así como una matriz de rigidez simétrica y el uso de pocos parámetros.

REFERENCIAS

[1] Bishop A.W. y Donald I.B. "The experimental study of partly saturated soil in the triaxial apparatus", *Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech.*, Paris I: 13-21. 1961.

[2] Roscoe, K.H. & Burland, John. On the Generalized Stress-Strain Behavior of Wet Clays. 1968.

[3] Russell A. R., Khalili N. "A unified bounding surface plasticity model for unsaturated soils." *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, pp 181-212, 2006.

[4] Loret B, Khalili N. "An effective stress elastic-plastic model for unsaturated porous media." *Mechanics of Materials*; 34:97-116, 2002.

[5] Zhou A and Sheng D. "An advanced hydro-mechanical constitutive model for unsaturated soils with different initial densities." *Computers Geotech*; 63: 46-66, 2015.

[6] Feng M and Fredlund DG. "Hysteresis influence associated with thermal conductivity sensor measurements". *52nd Canadian Geotechnical Conference and Unsaturated Soil Group, Proceedings from Theory to Practice of Unsaturated Soil Mechanics*, Can Geotech Soc, Richmond BC, Canada; 651-657, 1999.

[7] Sheng D and Zhou A. "Coupling hydraulic with mechanical models for unsaturated soils." *Can Geotech J*; 48: 826-840, 2011.

[8] Ma T, Wei C, Wei H and Li W. "Hydraulic and mechanical behavior of unsaturated silt: experimental and theoretical characterization." *Int J Geomech*; 16(6): D4015007:1-13, 2015.

[9] Wheeler SJ, Sivakumar V. "An elastoplastic critical state framework for unsaturated soil." *Geotechnique*, pp 35-53, 1995.

[10] Loret B, Khalili N. A three-phase mo-

del for unsaturated soils." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*; 24:893-927, 2000.

[11] Russell AR, Khalili N. "A bounding surface plasticity model for sands exhibiting particle crushing." *Canadian Geotechnical Journal*, pp 1179-1192, 2004.

[12] Roscoe KH, Burland JB. On the generalised stress-strain behavior of 'wet' clay. In: Heyman J, Leckie FA, editors. *Engineering plasticity*. Cambridge, England: Cambridge University Press; p. 535-609, 1968.

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE GOX INMOVILIZADA CON FCME₂-LPEI PARA SU USO POTENCIAL APLICACIÓN EN UN BIOSENSOR DE GLUCOSA TIPO PARCHÉ

Behavior analysis of GOx immobilized with FcMe₂-LPEI for
potential application in a glucose patch biosensor

Dulce Victoria Estrada Osorio^{1*}, Ricardo Antonio Escalona Villalpando¹
Janet Ledesma García¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro

*Autora de correspondencia
dulce.estradao@hotmail.com

RESUMEN

El proceso de inmovilización de la enzima Glucosa Oxidasa (GOx) puede modificar su actividad enzimática, ya que al inmovilizarse con un polímero redox o mediador electroquímico ayuda a la transferencia de electrones generada en la oxidación de glucosa hacia la superficie del electrodo. El polímero redox utilizado para este trabajo fue basado en ferroceno (modificado con lineal dimetilferroceno polietilenimina, FcMe₂-LPEI) y glucosa oxidasa como bio ánodo. Para la evaluación electroquímica se llevó a cabo el método de tres electrodos utilizando como contra electrodo un carbón poroso (Sigracet®), electrodo de pseudoreferencia una película de Ag/AgCl y electrodo de trabajo FcMe₂-LPEI/GOx. Las reacciones electroquímicas se llevaron a cabo en una solución de buffer de fosfato (PBS) de pH 5.7 (0.1 M), y las voltamperometrías cíclicas (CV) se realizaron en una ventana de potencial de -0.2 a 0.3 E/V contra un electrodo de Ag/AgCl a 5 mV s⁻¹. De la metodología consistió en utilizar el PBS en ausencia y presencia de glucosa para establecer su actividad y ser medido por VC bajo condiciones de laboratorio (temperatura de 21°C ± 2°), de pH y presión atmosférica. Se observó un incremento en el pico de oxidación del FcMe₂-LPEI debido a la transferencia de electrones de la enzima hacia el mediador redox. En este trabajo se reporta la comparación entre ambos dispositivos analizados para comprobar el incremento en sus propiedades catalíticas y como perspectiva para utilizarse como biosensor tipo parche o adherido en la piel.

Palabras clave: glucosa oxidasa, polímero redox, microfluídico, biosensor.

ABSTRACT

The immobilization process of the enzyme Glucose Oxidase (GOx) can modify the characteristics of the electrochemistry reaction of the enzyme, when it is immobilized with a redox polymer or electrochemical mediator it helps to enhance

de electrochemical qualities of itself. The redox polymer used in this work was ferrocene-based (dimethylferrocene- modified linear polyethylenimine, FcMe₂-LPEI) as bioanode and Glucose Oxidase. A model with three electrodes (counter electrode (carbon fibers (Sigracet®)), work electrode (clean and FcMe₂-LPEI/GOx) and reference electrode (Ag/AgCl)) to measure the potential difference generated in the redox reaction of the enzyme. The electrochemical reactions were performed in a Phosphate Buffer Solution (PBS) with pH 5.7, and the cyclic voltammetry (CV) were analyzed in a potential window of -0.2 to 0.3 E/V s Ag/AgCl with 150 mV/s. To obtain comparative signals, the experiments were performed in a clean electrode and later the FcMe₂-LPEI/GOx electrode was analyzed, both experiments were under the same laboratory conditions (temperature 21°C ± 2°), pH conditions and potential conditions. It was observed an improvement in the characteristics in both processes (reduction and oxidation) of the work electrode with the immobilized enzyme with this modified polymer. In this work is reported the comparison between both analyzed devices to prove the increase in the qualities and to be tested in a patch biosensor later.

Keywords: glucose oxidase, redox polymer, microfluidic, biosensor.

INTRODUCCIÓN

En el área de la salud, continuamente se buscan mejorar los procesos de análisis y monitoreo de biomarcadores importantes en el ser humano, los cuales tienen como finalidad tener un control más certero, con mayor accesibilidad y comodidad para el usuario. Especialmente se buscan dispositivos de monitoreo continuo, no invasivos, de pequeño tamaño y eficaces en el análisis, tal es el caso del desarrollo de biosensores que detectan cantidades muy pequeñas de biomarcadores en el sudor [1], en las lágrimas [2] o en la saliva [3].

Un ejemplo de la aplicación de estas tecnologías es el análisis continuo de la cantidad de glucosa como biomarcador que sirve para monitorear a individuos que padecen

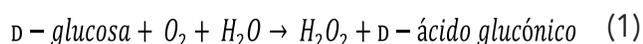


algún tipo de diabetes, para prevenir y evitar desniveles de la misma sustancia que pudiera afectar directamente a su salud física. Este tipo de análisis usualmente se realizan en sangre, lo que sugiere extraer la misma, el uso de biosensores tipo parche puede evitar la incomodidad de los individuos en este proceso.

Los biosensores electroquímicos son dispositivos integrados capaces de otorgar información cuantitativa específica o semi-cuantitativa utilizando reconocimiento biológico de algún elemento [4]. El uso de especies enzimáticas como elemento biológico para llevar a cabo la tarea de reconocimiento de otras especies de interés se ha popularizado y ha demostrado tener múltiples resultados favorables para seguirse utilizando de dicha forma.

Al estudiar específicamente el caso de la construcción de biosensores electroquímicos utilizados para la detección de glucosa, se han reportado múltiples resultados provechosos del uso de la enzima glucosa oxidasa (GOx) [5-7] (véase Figura 1), incrementando la cantidad de los mismos en los últimos años por su gran selectividad, bajo costo y su relativamente fácil obtención. La GOx (EC 1.1.3.4) es una enzima que cataliza la oxidación de la D-glucosa de acuerdo con la siguiente reacción [8]:

Glucosa oxidasa



Los biosensores son usualmente diseñados con grandes cargas enzimáticas para asegurar que exista una actividad biocatalítica suficiente para su adecuado funcionamiento, a su vez a la enzima se le provee con un ambiente favorable para mantener por ciertos periodos de tiempo esta actividad sin afectar la calidad de información buscada [8]. Así como éste existen diferentes puntos clave que se pueden modificar para mejorar la actividad de la enzima que se esté utilizando.

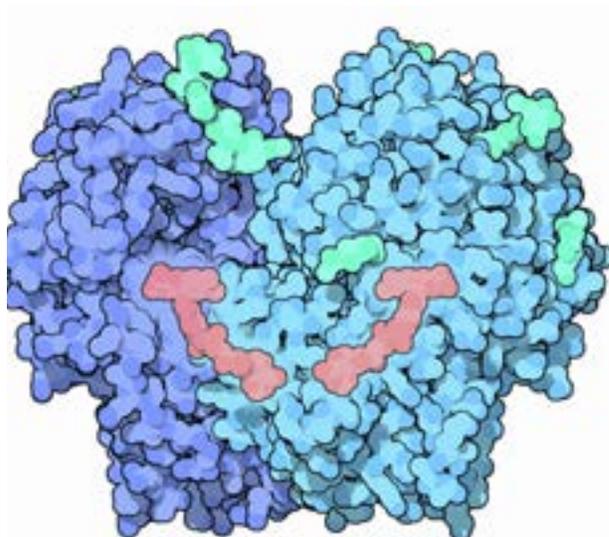


Figura 1. Estructura de dímero de Glucosa oxidasa (Azul claro y oscuro) acomplejado con Dinucleótido Flavina Adenina (FAD) (salmón) y glucanos (aguamarina). Fuente: PGDB (<http://rcsb.org/pdb/>)

Entre los más comunes se encuentran: maximizar la densidad de carga a través de la modificación en el diseño de diferentes materiales para los electrodos [9-11] (base en la que se depositará la enzima), mejoras directamente en el diseño reduciendo tamaños [12] (diseños microTAS, lap-on-a-chip, micro o nanofluidicos) y también se encuentran las mejoras que se realizan en el proceso de inmovilización de las enzimas [13].

El uso de polímeros o mediadores redox entre enzimas se ha popularizado en los últimos años, debido a que dichos compuestos potencializan las capacidades conductoras de las enzimas para aprovechar de mejor forma la reacción electroquímica que sucede cuando el biosensor (basado en enzimas) se pone en contacto con el analito. Un polímero redox es definido como macromoléculas formadas por la unión mediante enlaces covalentes de uno o más monómeros [14] funcionalizados con grupos redox, en los que la movilidad de la carga de los recubrimientos con polímeros redox puede modularse con el potencial aplicado a los grupos en estado oxidado y en estado reducido se igualan [15]. El ferroceno es una molécula bastante estudiada desde su descubrimiento y ha sido bastante atractiva para estudiar debido

a su bajo costo, fácil modificación y que es un compuesto no tóxico. El ferroceno (Fc) tiene fórmula $(C_5H_5)_2Fe$ y es un compuesto organometálico, cuando los átomos de carbono de un ligando orgánico forman enlaces covalentes con un átomo metálico [16], el cual tiene una estructura en la que el ión ferroso se encuentra posicionado entre dos anillos ciclopentadieno [17]. Este compuesto se ha catalogado como una opción altamente popular en el ámbito de desarrollo de biosensores, debido a que cumple con gran mayoría de los requerimientos necesarios para funcionar como mediador ideal en la catálisis enzimática redox [18].

Al aplicar un compuesto organometálico a un polímero redox se pueden estudiar las reacciones electroquímicas que están ocurriendo en el biosensor. En la Figura 2 se muestra el mecanismo de reacción ocurrido cuando un compuesto de este tipo es utilizado en la inmovilización de la enzima glucosa oxidasa para su potencial uso en un biosensor de glucosa. Teóricamente el ferroceno mejora la transferencia de la enzima para tener un mejor análisis cuantitativo de glucosa en una solución y una mayor sensibilidad.

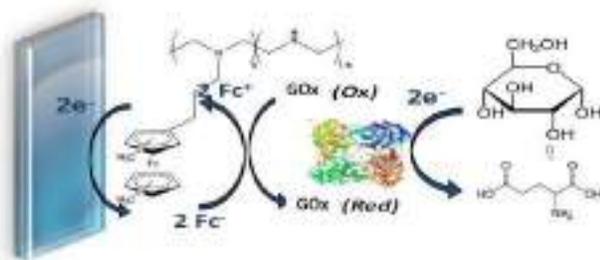


Figura 2. Mecanismo de reacción de polímero redox.

Al tener en cuenta lo descrito en el párrafo anterior sobre las capacidades de ciertos polímeros redox para su potencial aplicación en biosensores, en este trabajo se analizó un polímero basado en poli (etilenimina) lineal (LPEI) y ferroceno (FcMe₂-LPEI) para utilizarse en la inmovilización de la Glucosa Oxidasa (GOx) en un prototipo de biosensor tipo parche para su posterior aplicación para detectar glucosa en sudor.

METODOLOGÍA, MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales para inmovilización enzimática

Todas las sustancias utilizadas fueron de grado reactivo y sin modificaciones. El ferroceno (FcMe₂-LPEI), la glucosa oxidasa (GOx, Sigma-Aldrich), el etilenglicol diglicidil éter (EDGE (7.5 %)) se obtuvieron de Polysciences, Inc. Solución de Buffer de Fosfato (PBS, pH 5.7). Estas sales se consiguieron de JT-Baker.

Materiales para construcción de prototipo de biosensor

Para construir los electrodos se utilizó un papel de fibras de carbono (Sigracet®) y un electrodo de Ag/AgCl cortado a medida, así mismo se utilizó cinta Micropore™ transparente como base para los electrodos y así obtener un diseño tipo parche. Para las conexiones eléctricas se utilizaron caimanos que se conectan directamente al potencióstato.

Equipo de análisis

Las pruebas electroquímicas de potencial constante se realizaron en un potencióstato de la serie SP de BioLogic Science Instruments.

Inmovilización de glucosa oxidasa

Para realizar la inmovilización de la GOx con el FcMe₂-LPEI, se siguió la siguiente metodología: se comenzó por disolver 0.5 mg de GOx en 36 μ L de PBS pH 5.7 y se agitó hasta conseguir una solución homogénea. Posteriormente se depositaron 84 μ L de FcMe₂-LPEI y 4.5 μ L de EDGE (7.5 %) y se agitó durante aproximadamente 2 minutos.

Construcción de Sensor tipo parche

El diseño de los electrodos para el prototipo del biosensor tipo parche se desarrolló a partir del tamaño, los materiales. Por medio de la distribución de los electrodos se obtuvo la eficacia necesaria.

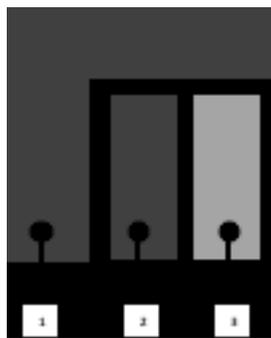


Figura 3. Propuesta de diseño de biosensor tipo parche.

Como se observa en la Figura 3, el biosensor cuenta con 3 electrodos necesarios para su funcionamiento:

-Contra electrodo: fabricado con papel de fibras de carbón, que recibe la corriente aplicada y mide la corriente como una caída de tensión [19]. Este electrodo requiere ser el de mayor área comparada con los otros dos para trabajar correctamente.

-Electrodo de trabajo: se utiliza como base el mismo papel de fibras de carbón, sin embargo, aquí es donde se encuentra depositada la solución de FcMe₂-LPEI/GOx. En este electrodo es donde ocurre la reacción electroquímica de interés, que para este caso particular la reacción es la oxidación de la Glucosa.

-Electrodo de referencia: se utilizó un electrodo de Ag/AgCl.

Los electrodos fueron construidos y dispuestos sobre una cinta tipo Micropore™ transparente, que es una cinta microporosa de grado médico. Al disponer los electrodos en esta cinta como lucen en la Figura 1, se consolida el diseño tipo parche del biosensor. La intención de este prototipo era de construirse con un diseño microfluídico para su posterior análisis.

Proceso de depósito de FcMe₂-LPEI/GOx en electrodo

Para realizar el depósito de la solución primero se debe aislar una pequeña parte del electrodo para dividir la parte donde se encontrará la solución y la demás área del mismo. Para aislar el electrodo se puede utilizar

cualquier material no conductor, como cinta adhesiva, parafina, etc. Para este prototipo se utilizó cinta adhesiva transparente, tal como se ilustra en la Figura 4.



Figura 4. Ilustración de aislado de electrodo de trabajo.

Una vez aislado el electrodo se procede a depositar la solución FcMe₂-LPEI/GOx (10μL) en la parte superior del electrodo, se coloca de esta manera para que se tenga cercanía con mayor área del contra electrodo y también posicionarse cerca del electrodo de referencia. La solución depositada se deja secar por aproximadamente 24 h en refrigeración.

Síntesis de ferroceno con quitosano

Para la síntesis comparativa se realizó el siguiente procedimiento: Fc-COOH (0.18mM) se disolvió en 15 mL de metanol y se le agregaron NHS ((0.27mM) y EDC (0.54mM) mientras se efectuaba una agitación constante. Se dejó por 4 h y se notó el cambio de color de naranja intenso a un color cercano al café. Después de esta agitación se le agregó CHIT (0.39mM) disuelto en 15 mL de ácido acético (0.1M) y se dejó agitando por una hora y posteriormente se le agregó NaBH₄ (0.36mM). Después se dejó en agitación por 24 h. y a esta solución se le agregaron aproximadamente 15 mL de una solución de hidróxido de sodio para formar los precipitados que posteriormente fueron filtrados y lavados con agua desionizada y metanol. Los productos se dejaron secando por 24 h al aire y pasado el tiempo se rasparon del papel filtro para su extracción y para diluirlos en una solución de ácido acético de 1% w. Una vez concluido este proceso se notaron 2 cosas principalmente: 1) el producto seco tiene consistencia de escarcha muy fina y si-

milar a un polvo y 2) al momento de disolver los productos se forma una consistencia parecida a una gelatina.

Estos productos se depositaron en un electrodo de carbón vítreo para realizar su análisis, se utiliza una celda electroquímica con una solución de PBS a pH 7.4, utilizando un electrodo de referencia de calomel saturado y un contra electrodo de alambre de platino.

Pruebas de voltamperometría cíclica

Las señales de corriente generadas por la reacción electroquímica de la enzima se midieron utilizando pruebas de voltamperometría cíclica (CV). El rango de potencial fue de -0.1 a 0.5 (vs. Ag/AgCl) a una velocidad de barrido 5 mV s^{-1} utilizando como electrolito soporte una solución de buffer pH 5.7 (0.1 M). Se realizaron mediciones repetitivas limpiando la superficie de los electrodos y repitiendo las mismas condiciones. Todos los experimentos se llevaron a cabo en condiciones de laboratorio a una temperatura de $21 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La síntesis obtenida del polímero con la enzima en una solución líquida, ideal para utilizarse como una tinta que se puede depositar fácilmente sobre el electrodo y que el papel de fibras de carbono puede absorber sin dificultad alguna.

El electrodo con FcMe₂-LPEI/GOx se caracterizó examinando los picos redox que pertenecen al mediador (FcMe₂). En la Figura 5 se muestra el dispositivo construido con los electrodos en conjunto, en la que se aprecia un pequeño cambio de color en la parte superior del electrodo de trabajo, ya que se tiene depositada la enzima inmovilizada.

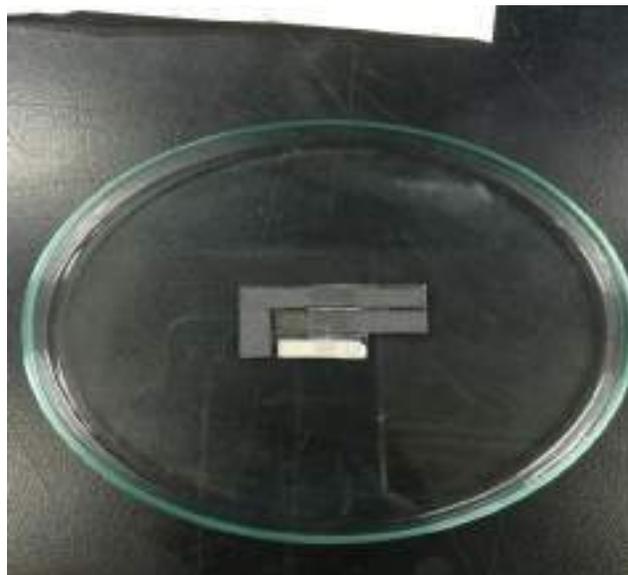


Figura 5. Prototipo de dispositivo de biosensor de glucosa, contra electrodo de fibras de carbono, electrodo de trabajo FcMe₂-LPEI/GOx depositado sobre papel de fibras de carbono y electrodo de referencia Ag/AgCl.



Figura 6. Prototipo de dispositivo de biosensor de glucosa (FcMe₂-LPEI/GOx) conectado al potencióstato para su análisis. El área de trabajo de los electrodos se encuentra sumergida en PBS pH 5.7.

Una vez construido el dispositivo con la GOx inmovilizada y depositada en el electrodo de trabajo y este mismo correctamente aislado, se procedió a realizar las pruebas de Voltamperometría Cíclica (CV) en el potencióstato. Para estas pruebas, cabe mencionar que se utilizaron dos prototipos, uno con la FcMe₂-LPEI/GOx y el otro "limpio", es decir, únicamente con el polímero, para comparar los resultados obtenidos y cotejar el funcionamiento con la GOx inmovilizada.

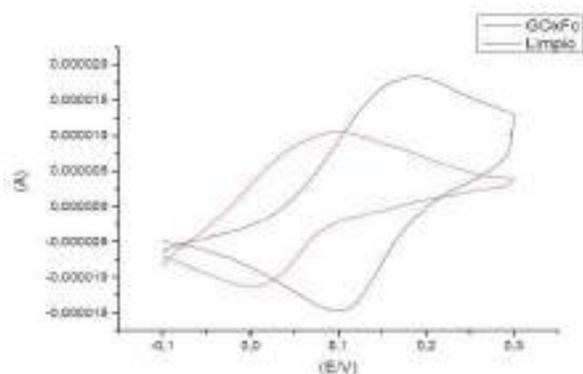


Figura 7. Pruebas CV de prototipo de biosensor con FcMe₂-LPEI/GOx (línea color negro) y señal de blanco (línea color rojo). Rango de escaneo 150 mV/s, PBS pH 5.7, Ag/AgCl como electrodo de referencia, 21°C

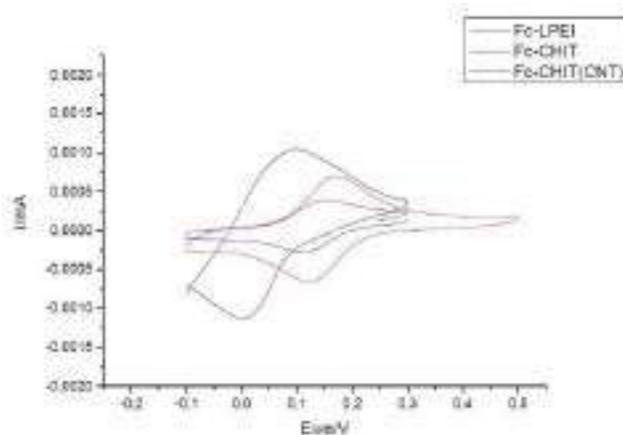


Figura 8. Pruebas CV de prototipo de biosensor con diferentes polímeros redox: ferroceno con LPEI y GOx (línea color negro), ferroceno con quitosano y GOx (línea color rojo) y ferroceno con quitosano y nanotubos de carbono y GOx (línea color azul). Todos bajo solución de PBS pH 5.7, 21°C

En la Figura 7 se presenta el voltamperograma obtenido de las señales de reacción electroquímica de la FcMe₂-LPEI/GOx. Se puede observar que los valores de la corriente fueron constantemente menores en el dispositivo limpio; la corriente máxima fue de 10.43 μ A y la mínima de -11.38 μ A. Las corrientes analizadas para el dispositivo con la enzima, con una corriente máxima de 18.31 μ A y una mínima de -14.77 μ A, sugieren que el polímero está funcionando en un rango aceptable y comparable con otros trabajos reportados.

En este mismo voltamperograma se observa un desplazamiento del potencial mostrando el pico de reducción en 3 mV para el electrodo limpio y en 105 mV para el electrodo de FcMe₂-LPEI/GOx, mientras los picos de oxidación se encuentran en 103 mV para el electrodo limpio y en 185 mV en el electrodo con el polímero y la enzima. Durante la experimentación se analizaron otros polímeros redox para generar resultados comparativos que justifiquen el uso de este polímero en la inmovilización de la GOx. Entre las opciones a analizar, se realizó la síntesis de ferroceno con quitosano y de ferroceno con quitosano y nanotubos de carbono (CNT) para comparar el funcionamiento del ferroceno en ambas condiciones (quitosano y LPEI). Todas las síntesis tienen la enzima inmovilizada para hacer una comparación correcta.

CONCLUSIONES

Se logró comprobar que la reacción electroquímica generada es reversible, lo que sugiere que se obtiene la misma cantidad de productos que reaccionaron que al inicio de la reacción química. Lo anterior ocasiona que esta síntesis sea altamente recomendable para aplicarse en un biosensor y que no se generen pérdidas en la reacción. En este trabajo se mostró el comportamiento de un electrodo que funciona con la enzima glucosa oxidasa inmovilizada con el FcMe₂-LPEI y que presentó mejor comportamiento que los electrodos previamente analizados. Con estos resultados se puede concluir que este prototipo tiene expectativas altas de funcionar como biosensor de glucosa, debido a que se pudo apreciar el incremento en las capacidades electroquímicas del mismo, aun así se requiere mayor experimentación para comprobar que es viable su uso en aplicaciones de éste tipo.

Así mismo, cabe mencionar que se pudo observar una disminución en la corriente de la síntesis con quitosano, lo que se puede deber a una hidrólisis del polímero debido al tiempo que pasó en la solución de ácido acético, a pesar de estas condiciones, se

aprecia claramente que la síntesis con LPEI tiene una corriente considerablemente mayor que las otras dos síntesis analizadas. Esto indica que el rendimiento es mayor y justifica su uso para el biosensor de glucosa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo durante toda esta investigación.

Así mismo se agradece el aporte y apoyo de los miembros del Laboratorio Nacional de Micro y Nanofluídica del Estado de Querétaro.

REFERENCIAS

- [1] S. Anatasova, B. Crewther, P. Bembnowicz, V. Curto, H. MD. Ip, B. Rosa and G. Z. Yang, "A wearable multisensing patch for continuous sweat monitoring", *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 93, 2017, p. 149-145.
- [2] S. R. Corrie, J. W. Coffey, J. Islam, K. A. Markey and M. A. F. Kendall, "Blood, sweat and tears: developing clinically relevant protein biosensors for integrated body fluid analysis", *Analyst*, 2015, 140, p. 4350-4364.
- [3] W. Zhang, Y. Du and M. L. Wang, "On-chip highly sensitive saliva glucose sensing using multilayer films composed of single-walled carbon nanotubes, gold nanoparticles, and glucose oxidase", *Sensing and Bio-Sensing Research*, vol. 4, 2015, p. 96-102.
- [4] A. Conlisk, *Essentials of micro and nanofluidics: with applications to the biological and chemical sciences*, New York: Cambridge Press, 2013.
- [5] F. Su, L. Zhang, X. Kong, F. Lee, Y. Tian and D. R. Meldrum, "Ratiometric glucose sensing based on fluorescent oxygen films and glucose oxidase", *Sensing and Bio-Sensing Research*, vol 14, 2017, p. 1-6.
- [6] C. O. Ania, A. Gomis-Berenguer, J. Dentzer and C. Vix-Guteri, "Nanoconfinement of glucose oxidase on mesoporous carbon electrodes with tunable pore sizes", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 808, Jan. 2018, p. 372-379.
- [7] W. Zhang, Y. Du and M. L. Wang, "Non-invasive glucose monitoring using saliva nano-biosensor", *Sensing and Bio-Sensing Research*, vol. 4, June 2015, p. 23-29.
- [8] D. G. Buerk, *Biosensors Theory and Applications*, Taylor & Francis Group, 1993, CRC Press.
- [9] A. Walcarius, S. D. Minteer, J. Wang, Y. Lin and A. Merckoci, "Nanomaterials for bio-functionalized electrodes: recent trends", *J. Mater. Chem. B*, 2013, 1, 4878.
- [10] M. Romero-Arcos, M. G. Garnica-Romo and H. E. Martínez-Flores, "Characterization of Amperometric Laccase Biosensor Based on Carbon Nanotube", *Procedia Technology*, vol. 27, 2017, p. 279-281.
- [11] M. S. Rahman, Md. S. Anower, L. B. Bashar and K. A. Rikta, "Sensitivity analysis of graphene coated surface plasmon resonance biosensors for biosensing applications", *Sensing and Bio-sensing Research*, vol. 16, Nov. 2017, p. 41-45.
- [12] R. A. Escalona-Villalpando, R. C. Reid, R. D. Milton, L. G. Arriaga, S. D. Minteer and J. Ledesma-García, "Improving the performance of lactate/oxygen biofuel cells using a microfluidic design", *Journal of Power Sources*, vol. 342, 2017, p. 546-552.
- [13] A. S. Campbell, C. Dong, F. Meng, J. Hardinger, G. Perhinschi, N. Wu and C. Z. Dinu, "Enzyme Catalytic Efficiency: A function of Bio-Nano Interface Reactions", *Appl. Mater. Interfaces*, 2014, 6 (8), p. 5393-5403.
- [14] J. W. Nochilson, *The Chemistry of Polymers*, 3ra. Edición, University of Greenwich, 2006.
- [15] S. Alegret, M. del Valle and A. Merkoçi, *Sensores electroquímicos*, Universitat Autònoma de Barcelona, Servicio de Publicaciones, 2004.
- [16] G. A. Carriedo U. y D. M. San José, *Curso de iniciación a la química organometálica*, Servicio de Publicaciones, Universidad de Oviedo.
- [17] G. Wilkinson, M. Rosenblum, M. C. Whiting and R.B. Woodward, "The structure



of iron bis-cyclopentadienyl", *J. Am. Chem. Soc.*, 74, 8, 1952, p. 2125-2126.

[18] N. Palomera, J. L. Vera, E. Meléndez, J. E. Ramirez-Vick, M. S. Tomar, S. K. Arya and S. P. Singh, "Redox active poly(pyrrole-N-ferrocene-pyrrole) copolymer based mediator-less biosensors", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 658, 2011, p. 33-37.

[19] A. Hickling, "Studies in electrode polarization. Part IV: The automatic control of the potential of a working electrode", *Transactions of the Faraday Society*, 38, 1942, p. 27-33.

La presente edición de
Perspectivas de la Ciencia y la Ingeniería
fue maquetada en Diseño Editorial de la Facultad de Ingeniería
de la Universidad Autónoma de Querétaro
por Alejandro Zamorano Gómez
El cuidado de la edición estuvo a cargo de
María Fernanda Hernández, Daniela Pérez y Soid Lazlo Ruiz.
Se publicó en diciembre de 2019
en Santiago de Querétaro, Qro., México.

