

Balance hidrológico para el llenado de los tajos.
Transformación lluvia-escorrentía a nivel diario.

Estado del arte sobre el diseño y construcción
de puentes de armadura para situaciones
de emergencia con materiales compuestos
por polímeros reforzados con fibras
de vidrio (GFRP).

Desarrollo de una herramienta computacional
para la evaluación del comportamiento
no lineal de muros de concreto reforzado.

Evaluación del cambio producido en la
temperatura zonal del departamento del
Cesar debido a la explotación extensiva de
minerales a cielo abierto.

Un libro de historia para el tiempo presente.



CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

PRESIDENTE JAVIER BOTERO ÁLVAREZ

VOCALES GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS
GONZALO JIMÉNEZ ESCOBAR
ARMANDO PALOMINO INFANTE
RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI
RICARDO RINCÓN HERNÁNDEZ
ROBERTO RÍOS MARTÍNEZ
JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS
JAVIER ALBERTO CHAPARRO PRECIADO
(representante de los profesores)
PEDRO PABLO VERGARA NEIRA
(representante de los estudiantes)

RECTOR HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ

SECRETARIA GENERAL CLAUDIA JEANNETH RÍOS REYES

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

DIRECTOR JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

COMITÉ EDITORIAL GERMÁN ACERO RIVEROS
CLAUDIA JEANNETH RÍOS REYES
PAULA XIMENA RÍOS REYES
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS
EDUARDO SARMIENTO PALACIO

DIRECCIÓN EDITORIAL CRISTINA SALAZAR PERDOMO

EDICIÓN **DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN**
JORGE CAÑAS SEPÚLVEDA
CORRECCIÓN DE ESTILO
ELKIN RIVERA GÓMEZ
TRADUCCIÓN Y CORRECCIÓN DE ESTILO EN INGLÉS
DAVID PEÑA CITA

DIRECCIÓN COMERCIAL EDITORIAL ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

Versión digital disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

AUTOPISTA NORTE AK 45 # 205-59
TEL.: (57-1) 668 3600, EXT. 533
revista@escuelaing.edu.co
BOGOTÁ, D.C., COLOMBIA

LA ESCUELA Y LA REVISTA NO SON RESPONSABLES DE LAS IDEAS Y CONCEPTOS EMITIDOS POR LOS AUTORES DE LOS TRABAJOS PUBLICADOS. SE AUTORIZA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS ARTÍCULOS DE LA REVISTA SI SE CITAN LA FUENTE Y EL AUTOR.

5 / EDITORIAL

Infraestructura

Jairo Alberto Romero Rojas

7-16

Balance hidrológico para el llenado de los tajos. Transformación lluvia- escorrentía a nivel diario

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz - Andrés Humberto Otálora Carmona - William Ricardo Aguilar Piña

En este artículo se presentan un modelo conceptual, los cálculos, los resultados, las conclusiones y las recomendaciones para diferentes escenarios de llenado de un tajo de desarrollo minero a cielo abierto, modelo utilizado particularmente en el proyecto minero La Loma, localizado en el departamento del Cesar, que explota en la actualidad la empresa Drummond Ltd.

17-26

Estado del arte sobre el diseño y construcción de puentes de armadura para situaciones de emergencia con materiales compuestos por polímeros reforzados con fibras de vidrio (GFRP)

Jhon Fredy Cajicá Salazar - Jaime Erasmo Garzón Moreno

Los puentes con materiales compuestos (polímeros reforzados con fibras, FRP) han tenido un desarrollo notable recientemente para pasarelas peatonales o prototipos de puentes vehiculares investigados experimentalmente con ensayos estáticos y dinámicos antes de ponerlos en servicio. En el caso de los puentes vehiculares para situaciones de emergencia, se tiene principalmente como potencial aplicación una solución innovadora de un prototipo de puente modular híbrido FRP-acero de armadura espacial con vigas triangulares invertidas, que consta de un tablero ortotrópico de aluminio y vigas con cordones inferiores de perfiles tubulares circulares, diagonales del alma y verticales GFRP.

27-34

Desarrollo de una herramienta computacional para la evaluación del comportamiento no lineal de muros de concreto reforzado

Fabio Andrés Morales Ortiz - Sandra Rocío Jerez Barbosa

Dado el aumento en la construcción de sistemas estructurales de muros portantes de concreto reforzado o sistema industrializado en Colombia, así como el crecimiento de la población de las ciudades donde es un sistema estructural predominante, y considerando además que Colombia se encuentra localizada en una zona de amenaza sísmica alta, es necesario generar herramientas de uso libre que permitan fomentar el interés en estudiantes de ingeniería y faciliten la comprensión, análisis e investigación sobre el comportamiento no lineal de los elementos que componen estos sistemas estructurales.

35-43

Evaluación del cambio producido en la temperatura zonal del departamento del Cesar debido a la explotación extensiva de minerales a cielo abierto

Juan Carlos Melo Luna - William Ricardo Aguilar Piña

Este trabajo tiene como fin evaluar la incidencia de la minería extensiva a cielo abierto en el comportamiento histórico de la temperatura en el departamento del Cesar, por medio del estudio de datos históricos de estaciones climatológicas terrestres para el periodo comprendido entre 1981 y 2019, incluyendo como variable principal la temperatura y variables secundarias como la altitud, brillo solar, latitud, humedad relativa, punto de rocío e información geográfica del departamento y su zona circundante.

Contenido

45-47

Un libro de historia para el tiempo presente

José Camilo Vásquez Caro

En mi opinión, el libro está bien escrito y su historia está bien narrada. El autor va hilando muchos problemas, visiones del pasado, y proponiendo soluciones y respuestas a grandes preguntas y enigmas de la humanidad.

49 / ALCANCE Y POLÍTICAS

Editorial

Infraestructura

JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería

jairo.romero@escuelaing.edu.co

La infraestructura vial en Colombia está íntimamente ligada con la necesidad de proveer un óptimo transporte masivo a la gente y permitir el crecimiento en densidad de población de las áreas urbanas.

Los candidatos a cargos públicos, como alcaldes, gobernadores y presidentes, desconocen la necesidad de formular planes detallados para el desarrollo de una infraestructura de transporte adecuada.

La provisión de recursos suficientes para infraestructuras importantes, como la aeroportuaria, vial, ferroviaria, fluvial y marítima, es un propósito que no debe ignorar ningún dirigente gubernamental.

El populismo, postura política que busca ganarse la simpatía de la población mediante el ofrecimiento de medidas de gobierno populares, tales como los servicios públicos subsidiados o gratuitos, ha contribuido al atraso a la hora de implementar servicios adecuados de transporte, con la consecuente inmovilidad ciudadana y la insatisfacción permanente por la pérdida de tiempo y la falta de una buena producción de trabajo, incomodidad y carencia de sitios de esparcimiento adecuados.

La congestión del tráfico en Bogotá demuestra que el sistema vial de la capital del país está totalmente taponado, agravado por el crecimiento de la población y por la inexistencia de soluciones reales para resolver dicho problema. Nuestra tasa de crecimiento ha sido mayor que nuestra capacidad para construir capacidad de transporte.

Vale la pena señalar que la exigencia de un límite máximo de velocidad en las vías de Bogotá incrementa la congestión vehicular, y que un desarrollo de infraestructura para transporte masivo compartido entre bici-

cletas, motos y vehículos no es apropiado por razones de seguridad.

Uno de los propósitos propuestos en los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), de proveer energía asequible y no contaminante, supone eliminar todas las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) del sector del transporte, así como también modificar todos los medios de transporte terrestre, aéreo, fluvial y marítimo; esto requiere hacer una transición muy bien planeada, que no conduzca a crear nuevas desigualdades sociales.

Entre las estrategias que se deben evaluar y planear, hay que incluir las siguientes:

Planeación urbana y regional que asegure la creación de centros de trabajo, de ventas, de escuelas, de entretenimiento, de salud y de servicios esenciales cercanos a la población y que mejoren el acceso al lugar de trabajo.

Mejoramiento de la eficiencia en el transporte público (por ejemplo, los costos de transporte público no se deben incrementar).

Presentación de opciones de acceso económico factible a vehículos eléctricos (carros, camiones, locomotoras, buques y aviones).

Así las cosas, eliminar las fuentes de energía convencionales sin contar con los medios necesarios para financiar la infraestructura requerida para la transición energética conducirá inevitablemente a que haya que pagar más por la electricidad; esto incrementará la pobreza e impedirá el crecimiento económico imprescindible para hacer una transición segura hacia la tecnología de cero emisiones de GEI.

Balance hidrológico para el llenado de los tajos. Transformación lluvia-escorrentía a nivel diario

Hydrological balance for pit filling. Daily rain-runoff transformation

HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ¹ - ANDRÉS HUMBERTO OTÁLORA CARMONA² - WILLIAM RICARDO AGUILAR PIÑA²

1. Profesor titular de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, D.C., Colombia.
2. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, D.C., Colombia.

alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co - andres.otalora@escuelaing.edu.co - william.aguilar@escuelaing.edu.co

Recibido: 22/07/2021 Aceptado: 15/08/2021

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se presentan un modelo conceptual, los cálculos, los resultados, las conclusiones y las recomendaciones para diferentes escenarios de llenado de un tajo de desarrollo minero a cielo abierto, modelo utilizado particularmente en el proyecto minero La Loma, localizado en el departamento del Cesar, que explota en la actualidad la empresa Drummond Ltd.

El objetivo del llenado de este tajo es restablecer el estado natural de la zona para mitigar los efectos causados a la biósfera. Para realizar dicho llenado se requirió evaluar el balance hidrológico a nivel diario en las cuencas que tributan al tajo en sus zonas norte y sur. La estimación diaria de los caudales de escorrentía se hizo usando los modelos de lluvia-escorrentía GR4J, metodología desarrollada en Francia, y el modelo integrado del *software* HEC-HMS de tanques sucesivos. Los límites topográficos de las áreas aportantes al sistema se han definido a partir del estado antrópico de la zona, establecido de acuerdo con las actividades propias de la explotación.

Palabras claves: llenado de tajos, balance hidrológico, modelo GR4J, modelo HEC-HMS.

Abstract

This article presents a conceptual model, the calculations, the results, the conclusions and recommendations for different scenarios of filling an open pit, model used particularly in the mining project: "La Loma", located in the department of Cesar which Drummond Ltd. operates now.

The objective of filling this pit is to return and restore the natural state of the zone to mitigate the effects of the biosphere. The study of the hydrological balance was necessary at a daily level in the basins that discharge to the pit in its north and south zones. The estimation of flow rates on a daily basis was made using flow rates from rainfall models GR4J, methodology developed in France and the integrated model of the successive of tanks of the software HEC-HMS. The topographic limits of the contributing areas to the system have been defined from the anthropic state of the area, defined in accordance with the activities of the exploitation.

Keywords: pit filling, hydrological balance, GR4J and HEC-HMS models.

INTRODUCCIÓN

En este artículo se presentan un modelo conceptual, los cálculos y los resultados para diferentes escenarios de llenado de un tajo de desarrollo minero a cielo abierto, modelo utilizado particularmente en el proyecto minero La Loma, localizado en el departamento del Cesar, que explota en la actualidad la empresa Drummond Ltd.

El objetivo del llenado de este tajo es restablecer el estado natural de la zona para mitigar los efectos causados a la biósfera. Para realizar dicho llenado, se requirió evaluar el balance hidrológico a nivel diario en las cuencas que tributan al tajo en sus zonas norte y sur. La estimación diaria de los caudales de escorrentía se hizo usando los modelos de lluvia-escorrentía GR4J, metodología desarrollada en Francia, y el modelo integrado del *software* HEC-HMS de tanques sucesivos.

Los límites topográficos de las áreas aportantes al sistema se han definido a partir del estado antrópico de la zona, establecido de acuerdo con las actividades propias de la explotación. En general, estas áreas de drenaje corresponden a zonas de disposición de material extraído, disposición que define el drenaje superficial y el manejo de la escorrentía.

En el desarrollo y la construcción del modelo se utilizaron los registros de la precipitación representativa de cada una de las cuencas que drenan al tajo, a partir de la ponderación de varias estaciones pluviográficas cercanas a la zona de estudio, teniendo en cuenta la influencia de cada estación en cada cuenca. Se estimaron los valores de evapotranspiración potencial a partir de los registros de temperatura de las estaciones climatológicas de la zona.

Definido el modelo conceptual para realizar las correspondientes modelaciones de llenado del tajo, se definieron tres escenarios básicos para analizar las características espaciales y temporales del llenado, de acuerdo con las variables hidrológicas involucradas en la operación.

LLENADO DEL TAJO. MODELO CONCEPTUAL DE BALANCE HIDROLÓGICO DIARIO

El balance hidrológico para una cuenca hidrográfica dada se determina a partir de todas las entradas y salidas en un volumen de control establecido, el cual, para esta investigación, permite el llenado del tajo en las zonas norte y sur del proyecto minero La Loma. Utilizando

la ecuación fundamental de la hidrología a nivel diario es posible definir el balance en el volumen de control, en la siguiente forma:

$$I - O = \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

Donde:

I: todas las entradas de agua a nivel diario al volumen de control (m^3).

O: todas las salidas de agua a nivel diario al volumen de control (m^3).

$\frac{dV}{dt}$: cambio temporal del almacenamiento en el volumen de control ($m^3/\text{día}$).

En este modelo de llenado para los escenarios 1 y 2, que corresponden al llenado de la zona norte del tajo y que se explican más adelante, se han definido las siguientes entradas y salidas en el volumen de control:

$$I = P_{\text{zona_Norte}} + q_e + q_{\text{sub}} \quad (2)$$

$$O = \text{EVP}_{\text{zona_Norte}} \quad (3)$$

Donde:

$P_{\text{zona_Norte}}$: precipitación directa diaria sobre la superficie del tajo en su zona norte (m^3).

q_e : escorrentía directa, proveniente de las cuencas afe-rentes del tajo en su zona (m^3).

q_{sub} : aportes subterráneos que consideran infiltración y flujos subsuperficiales (m^3).

$\text{EVP}_{\text{zona_Norte}}$: evapotranspiración directa diaria del tajo en su zona norte (m^3).

En este modelo se han considerado otras variables del ciclo hidrológico, correspondientes a la infiltración y el flujo subsuperficial en el aporte subterráneo neto y la escorrentía directa. En el caso de los aportes subterráneos, los valores netos de entrada corresponden a estudios anteriores, cuyos valores se han suministrado como caudales diarios de aportes al tajo.

Para el escenario 3, que corresponde al llenado del tajo en la zona sur, en el modelo se ha previsto adicionar los caudales de rebose provenientes de la zona norte del tajo a partir del 2048, año en que comenzará el llenado de la zona sur de dicho tajo. Teniendo presentes estas consideraciones, se han definido las entradas y salidas de la zona sur del tajo de la siguiente manera:

$$I = P_{\text{zona_sur}} + q_e + q_{\text{sub}} + \Delta Q \quad (4)$$

$$O = \text{EVP}_{\text{zona_sur}} \quad (5)$$

Donde:

$P_{\text{zona_sur}}$: precipitación diaria directa en la superficie del tajo en su zona sur (m^3).

q_e : escorrentía directa, proveniente de las cuencas aferentes del tajo en su zona sur (m^3).

q_{sub} : aportes subterráneos que consideran infiltración y flujos subsuperficiales (m^3).

$O = \text{EVP}_{\text{zona_sur}}$: evapotranspiración directa diaria del tajo en su zona sur (m^3).

ΔQ : caudales provenientes de la zona norte del tajo (m^3).

Tal como ya se comentó, existen tres escenarios de llenado, los cuales definirán la forma y aplicación de la ecuación fundamental del balance hidrológico descrito anteriormente.

A continuación se puede observar un diagrama de flujo general, en el cual se describen gráficamente las variables de entrada y salida presentes en el balance hidrológico en el tajo (figura 1).

Además, en la figura siguiente se presentan estas mismas variables hidrológicas pero en un esquema básico de la ubicación general de las variables en el tajo, tanto en su zona norte como en su zona sur (figura 2).

RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN HIDROCLIMATOLÓGICA

Para disponer de la información hidroclimatológica de la zona de estudio y hacer el balance hidrológico a nivel diario, se procedió a revisar y adquirir, para la zona de estudio, los datos de estaciones climatológicas especiales, ordinarias, pluviométricas y pluviográficas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). Se seleccionaron todas aquellas estaciones con años de registro suficientemente extensos.

En total, se obtuvieron 27 estaciones con datos de temperatura, precipitación y evaporación a nivel diario, para todo el periodo de registro de las estaciones, variables necesarias para la estimación de la escorrentía superficial de las áreas aferentes al tajo. Posteriormente, se realizó una depuración preliminar de los datos, mediante la cual se eliminaron aquellos registros errados y se

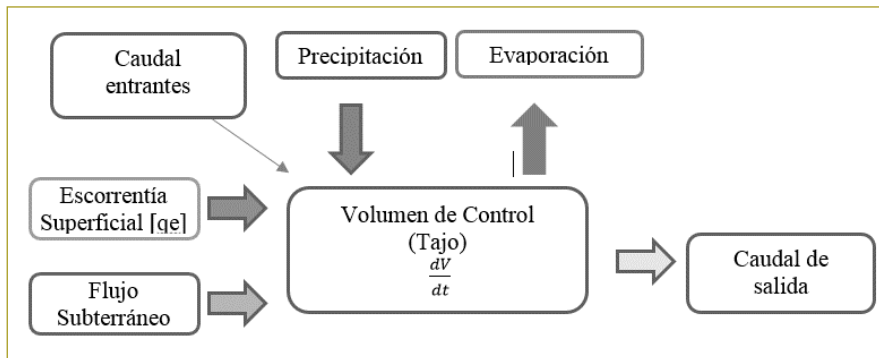


Figura 1. Diagrama de flujo de las variables del balance hídrico en el tajo. Zonas norte y sur.

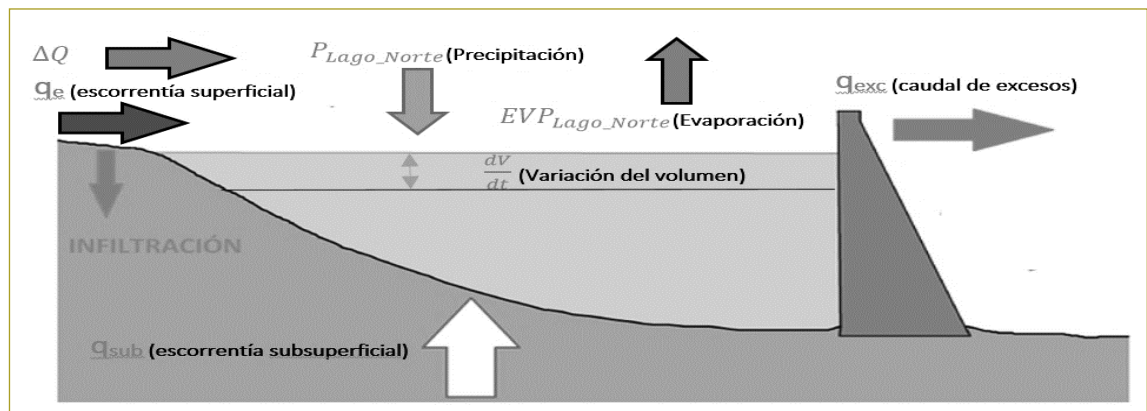


Figura 2. Esquema general del balance hidrológico en el tajo. Análisis de llenado a diario.

identificaron los registros faltantes, para posteriormente extenderlos, teniendo en cuenta los procedimientos que se describen en este artículo.

DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS CUENCAS DE DRENAJE

Las cuencas hidrográficas definidas para la evaluación de la escorrentía que se conducirá al tajo en las zonas norte y sur son, en general, superficies cuya topografía se han establecido con base en la manera como Drummond Ltd. debe disponer del material estéril extraído. Es una topografía cambiante, según la explotación minera, razón por la cual los parámetros físicos para su caracterización, tales como el área, el perímetro, la pendiente media, el índice de compacidad y el factor de forma, se podrán evaluar a partir de la configuración final de dichas superficies, principalmente los sistemas de drenaje, para iniciar el llenado del tajo.

Las cuencas definidas para este estudio tienen superficies relativamente pequeñas (inferiores a 15 km²), dimensiones que hacen poco probable la atenuación de los picos de escorrentía ante la presencia de eventos extremos de lluvia. La caracterización de los caudales medios diarios en las cuencas se ha establecido a partir de la información disponible de mediciones de caudal en las piscinas usadas para la incorporación de la escorrentía hacia los cauces naturales, tomando como referencia las curvas de duración.

Con la utilización de ArcGis, y a partir de la topografía de la zona de estudio, se han construido para el tajo la curva de Elevación - área superficial y la curva de Elevación - volumen, información útil que permite evaluar la evolución del llenado del tajo para los escenarios establecidos.

A continuación se presentan las curvas de Elevación - área superficial para las zonas norte y sur del tajo (figuras 3 y 4). Igualmente, se muestran las curvas de Elevación - volumen para las zonas norte y sur de dicho tajo (figuras 5 y 6).

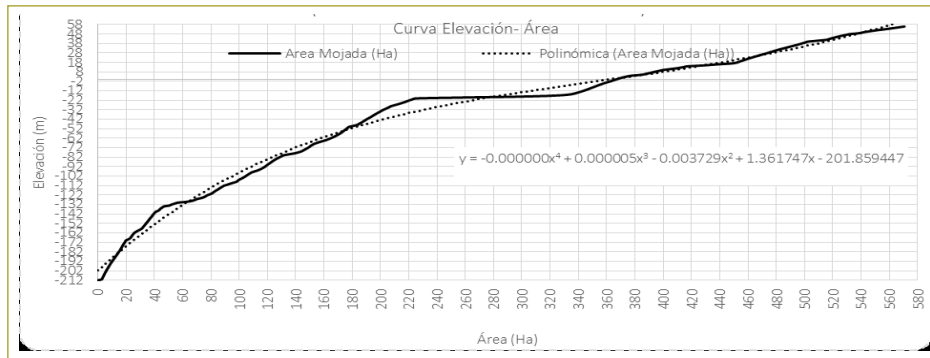


Figura 3. Curva Elevación - área. Zona norte del tajo. Proyecto La Loma.

Figura 4. Curva de Elevación - área. Zona sur del tajo. Proyecto La Loma.

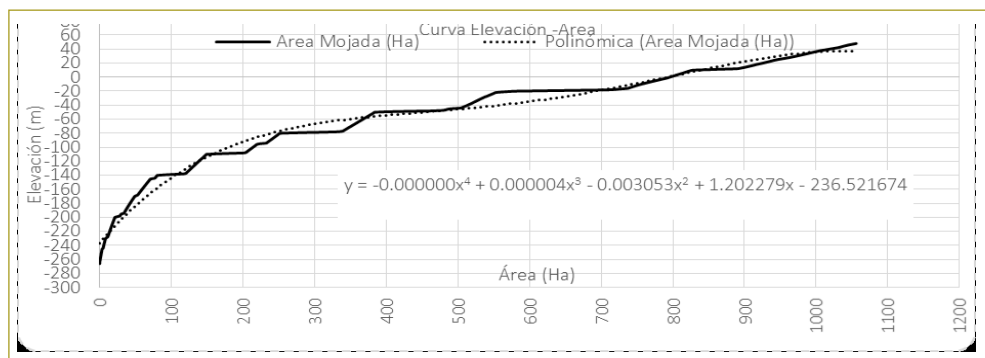


Figura 5. Curva de Elevación - volumen. Zona norte del tajo. Proyecto La Loma.

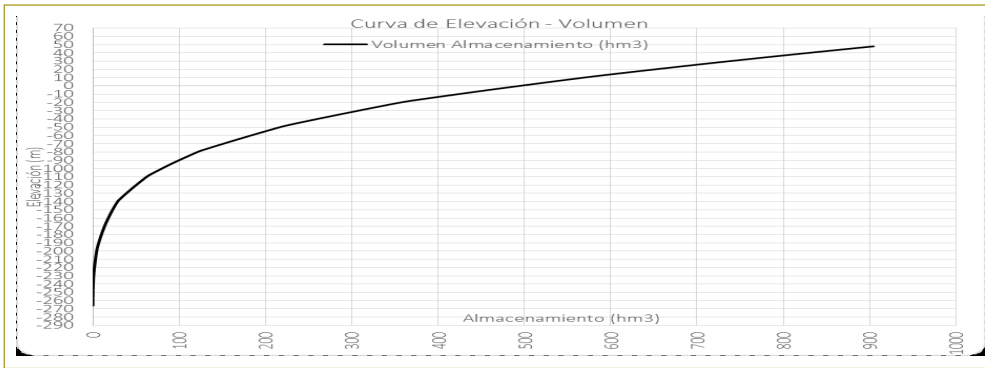
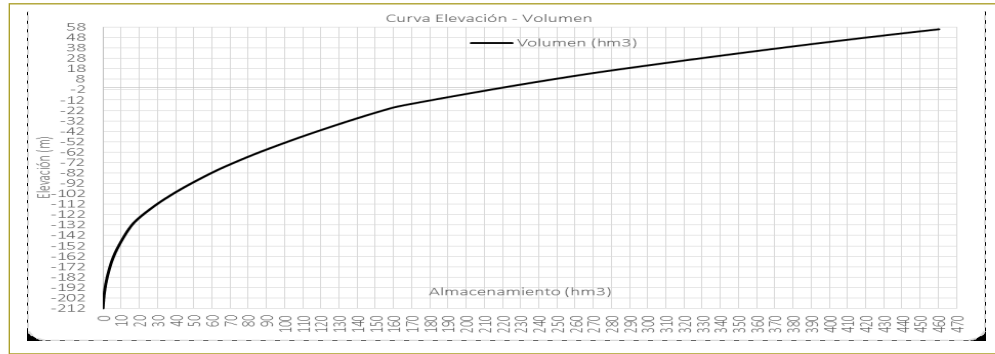


Figura 6. Curva de Elevación - volumen. Zona sur del tajo. Proyecto La Loma.

ESCENARIOS DE LLENADO DEL TAJO

Teniendo en cuenta el secuenciamiento del plan minero propuesto por Drummond Ltd., se han establecido tres escenarios de llenado del tajo, presentados en los términos de referencia de estos estudios.

A continuación se describen en detalle estos tres escenarios de modelación del llenado, que incluyen el llenado de su zona norte y de su zona sur.

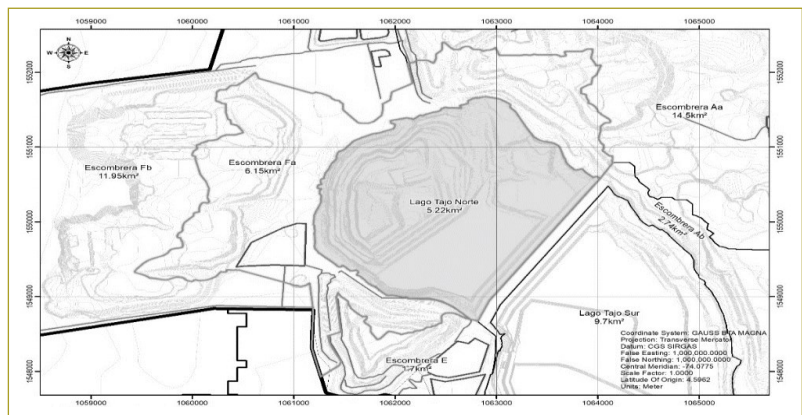
Escenario 1: Llenado de la zona norte del tajo con la escorrentía directa de las áreas aferentes, la precipitación directa y el flujo de aguas subterráneas

Este escenario corresponde al llenado, a nivel diario, de la zona norte del tajo, teniendo en cuenta la precipitación directa sobre la superficie de dicha zona, la evaporación y la escorrentía superficial proveniente del área denominada “Escombrera Fa”, área que en la actualidad drena naturalmente al tajo y los aportes subterráneos.

A renglón seguido se muestra en detalle el área correspondiente a la zona norte del tajo y a la cuenca Fa, aportante. El área superficial total del tajo en su zona norte

es de 5,22 km², en tanto que la cuenca Fa tiene un área superficial total de 6,15 km². La escorrentía directa de esta cuenca se conducirá al tajo por medio de un sistema de drenaje, cuya descarga se hará en un solo punto que se encuentra en el límite de la cuenca Fa y la cuenca E (figura 7).

Figura 7. Esquema general de las áreas de drenaje para el escenario 1. Zona norte del tajo.



Escenario 2: Llenado de la zona norte del tajo con la escorrentía directa de las áreas aferentes, la escorrentía captada de la “Escombrera Aa”, la precipitación directa y el flujo de aguas subterráneas

Este escenario corresponde al llenado de la zona norte del tajo, tomando en cuenta la precipitación directa en la zona norte del tajo, más la escorrentía superficial proveniente del área llamada “Escombrera Fa”, cuenca que descarga naturalmente al tajo, y una entrada adicional del caudal de escorrentía proveniente de la “Escombrera Aa”, la cual se encuentra al norte de dicho tajo, considerando que resulta sencillo dirigir esta escorrentía a la zona norte del tajo. También se tienen presentes en este escenario los aportes correspondientes a los flujos subterráneos.

En la figura siguiente (figura 8) se muestra en detalle el área correspondiente a la zona norte, a la cuenca Fa y a la cuenca denominada Aa, cuenca que posee un área superficial total de 14,5 km². La escorrentía directa de la cuenca Aa se podrá conducir al tajo por medio de un sistema de drenaje que captará la escorrentía en esta zona de escombrera y la dirigirá a un punto de descarga situado al norte de esta parte del tajo.

Escenario 3: Llenado de la zona sur del tajo con la escorrentía directa de áreas aportantes al tajo sur, los flujos subterráneos y los excedentes del tajo norte.

Una vez realizado el llenado de la zona norte del tajo a la cota establecida, se iniciará el llenado de la zona sur. En esta zona sur del tajo se comenzará el llenado a partir del año 2048, fecha en la que se espera finalizar la explotación del tajo y el dique que separa la zona norte de la zona sur.

Para este escenario habrá que considerar, adicionalmente, la escorrentía proveniente de la zona norte del tajo y la precipitación sobre las áreas denominadas Ab, B, C, D, E, cuyas áreas son 2,74 km², 1,48 km², 3,79 km², 6,72 km² y 1,7 km², respectivamente. En la figura siguiente, estas áreas de drenaje se presentan de manera detallada (figura 9).

De acuerdo con lo definido en la topografía, se tuvo en cuenta la cota 48 msnm como la cota de rebose en esta zona. Los excedentes se transportarán y descargarán al realineamiento # 4 del arroyo San Antonio. El sistema de rebose de la zona norte se mantendrá como un sistema de evacuación adicional, ya que permitirá un rebose cuando el nivel de esta zona supere la cota de 55 msnm

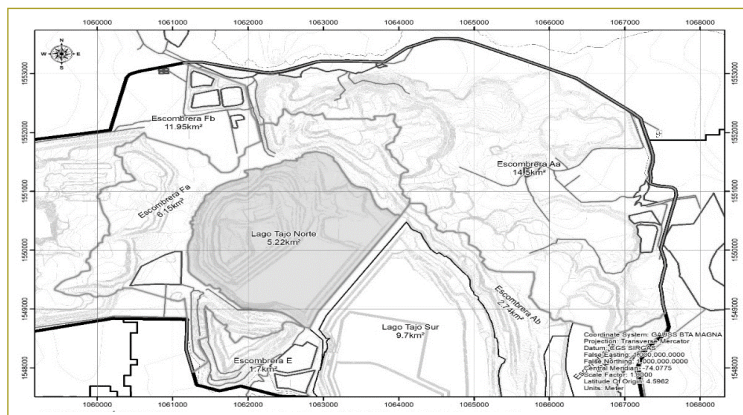


Figura 8. Esquema general de las áreas de drenaje para el escenario 2. Zona norte del tajo.

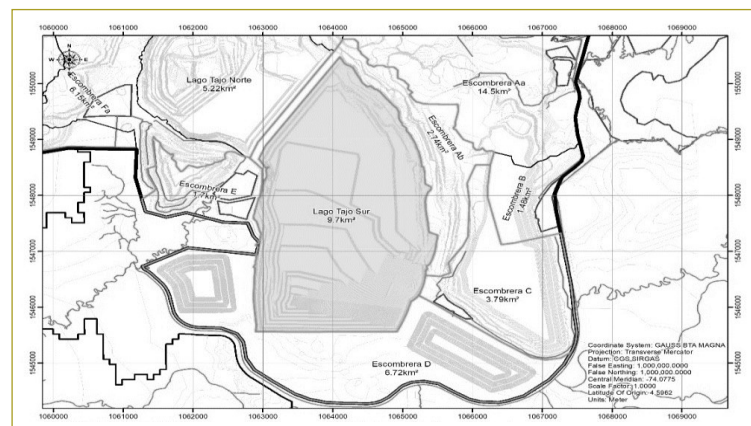


Figura 9. Esquema general de las áreas de drenaje para el escenario 3. Zona sur del tajo.

ante eventos extremos. De acuerdo con la topografía disponible de la zona, las cuencas Aa, D y E descargan directamente a la zona sur del tajo, mientras que las cuencas B y C descargarán mediante un canal hasta conectar con el realineamiento # 4 del arroyo San Antonio.

MODELOS LLUVIAS-ESCORRENTÍA. MÉTODO GR4J Y MODELO HEC-HMS

El GR4J es un modelo lluvia-escorrentía agregado, de cuatro parámetros y resolución diaria (Perrin et al., 2003), que es una opción a los modelos tradicionales a largo plazo. Es un modelo basado en la representación de la retención del suelo a partir de dos tanques y dos hidrogramas unitarios. Las variables utilizadas para la estimación de la escorrentía son las siguientes: x1, capacidad máxima del tanque de producción (mm); x2, coeficiente de intercambio de aguas subterráneas (mm); x3, capacidad máxima para el tránsito en canales (mm); x4 y el tiempo base del hidrograma unitario UH1 (días).

Dichos parámetros se calibraron para la zona de estudio, calibración que se explicará en detalle más adelante. Esta metodología se basa en la estimación de la escorrentía superficial diaria, a partir de datos diarios de precipitación y evapotranspiración.

La segunda metodología utilizada para la modelación de la escorrentía a nivel diario es el modelo integrado de HEC-HMS, metodología que se fundamenta en el análisis de cinco tanques sucesivos, los cuales representan distintos niveles de retención de la precipitación. Los dos primeros tanques representan la retención superficial, en tanto que los tres tanques restantes representan la condición de infiltración, percolación y nivel freático en el suelo.

En razón de la dificultad de calibración de los diferentes parámetros del suelo y de la falta de información para completar todos los valores de entrada solicitados por el modelo HEC-HMS, se tomó la decisión de descartar esta metodología de cálculo como método de estimación de la escorrentía superficial, dejando como única metodología el modelo GR4J, modelo cuya calibración se explica en detalle más adelante.

CALIBRACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO GR4J

Para la determinación de los parámetros X1, X2, X3 y X4, correspondientes a los coeficientes propios del

suelo, se ha realizado una calibración del modelo, a partir de la información de campo disponible. Se han calculado estos cuatro parámetros de tal forma que los datos generados por la metodología GR4J se asemejen a los valores de escorrentía diaria medidos en una de las cuencas que, de acuerdo con la información suministrada, reproducen adecuadamente las características de la escorrentía. Utilizando la curva de duración de caudales de los registros, se minimizó el error entre la desviación estándar de las series generadas para la cuenca Ab y la desviación estándar de los registros históricos de los siete años de registros de escorrentía diaria, manteniendo el promedio de la serie histórica y el promedio de los valores generados.

Para comenzar con unos valores semilla e iniciar el proceso de optimización de los parámetros X1, X2, X3 y X4 del modelo, se usaron los parámetros determinados en la estación La Salda, de la cuenca del río Aburrá, los cuales se calibraron en el estudio denominado *Calibración del modelo lluvia-escorrentía. Agregado GR4J. Aplicación: cuenca del río Aburrá*, que llevó a cabo la Universidad Nacional de Colombia (2007).

A renglón seguido se muestran los valores iniciales y calibrados de los parámetros del modelo GR4J para la cuenca “Escombrera Ab”, posterior al proceso de optimización (tabla 1).

Tabla 1
Valores iniciales y calibrados de los parámetros X1, X2, X3 y X4. Modelo GR4J

Variable	Valores iniciales supuestos	Valores de la calibración
X1(mm)	1226,70	800
X2(mm)	1,27	0,80
X3(mm)	225,06	18,00
X4(días)	1,16	10,90
So/R1	0,40	0,00
Ro/X3	0,40	0,00

La calibración de los parámetros X1, X2, X3 y X4 se realizó tratando de conservar la media y la desviación de la serie histórica y de la serie generada con GR4J, así como buscando que las curvas de duración fueran similares, es decir, manteniendo la tendencia de mínimos y la misma configuración.

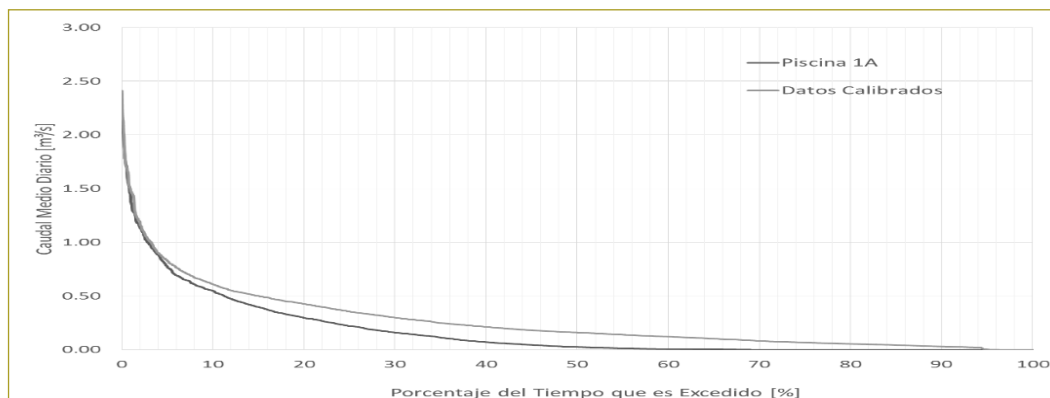


Figura 10. Curvas de duración de caudales diarios de la piscina 1A y la cuenca "Escombrera".

A continuación se puede observar cómo la calibración permitió mantener la tendencia de dicha curva, modelando correctamente los valores extremos de escorrentía (figura 10).

Para evaluar la calidad de la calibración de los parámetros del modelo, se presenta una comparación de algunos parámetros estadísticos, correspondientes a los resultados de escorrentía obtenidos con el modelo GR4J y los valores de escorrentía medidos de la misma piscina 1A (tabla 2).

Como se puede observar, el promedio y la desviación estándar de la modelación son bastantes cercanos a la media y la desviación de los registros de la piscina 1A. Adicionalmente, el coeficiente de correlación (R^2) entre las curvas de duración es muy cercano a la unidad, lo cual demuestra que los resultados estimados se ajustan bastante bien a los registros históricos de caudales en la cuenca.

Utilizando la serie conformada por los registros históricos y las series sintéticas de precipitaciones, y considerando que los valores estimados para los parámetros X1, X2, X3 y X4 son adecuados, se procedió a calcular la escorrentía directa en cada una de las cuencas que drenan las zonas norte y sur del tajo, expresada como una altura de la lámina de agua.

A continuación se presentan los resultados del modelo GR4J, correspondiente a la escorrentía superficial determinada para una de las cuencas que drenan el tajo (figura 11).

ANÁLISIS DE RESULTADOS - LLENADO DEL TAJO

Escenario 1

Para el escenario 1, con áreas de drenaje que descargan naturalmente a la zona norte del tajo y con los aportes subterráneos, se define como día de inicio del llenado del tajo el 1.º de enero de 2019. Los resultados permiten concluir que, para finales del mes de agosto del 2074, el tajo alcanzaría la cota máxima de 56 msnm, establecida para el llenado, cota correspondiente a la cresta del dique que se deberá construir. Con este primer escenario, se tardarían 55 años en llenar la zona norte del tajo.

A renglón seguido, se presenta el comportamiento de los niveles del tajo en el tiempo, con inicio del llenado en el año 2019 y final en el año 2074 (figura 12).

Escenario 2

Para el escenario 2, en el que están las áreas de drenaje que descargan naturalmente a la zona norte del tajo, más la escorrentía superficial, proveniente de la escombrera

Tabla 2

Parámetros estadísticos de la optimización de las variables X1, X2, X3 y X4. Datos generados y registros históricos de la cuenca Aa

Variable	Modelación GR4J	Registros piscina 1A	Error porcentual (%)
Desviación (m³/s)	0,294	0,295	0,29
Caudal pico (m³/s)	2,41	2,23	7,92
Coefficiente correlación entre las curvas de duración (R^2)	0,977		-

Figura 11. Escorrentía diaria de la cuenca Aa, nivel multianual. Modelo lluvia-escorrentía GR4J.

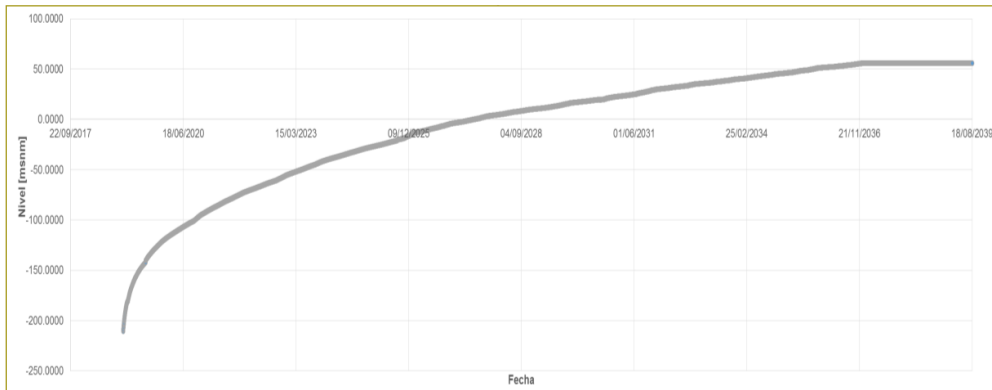
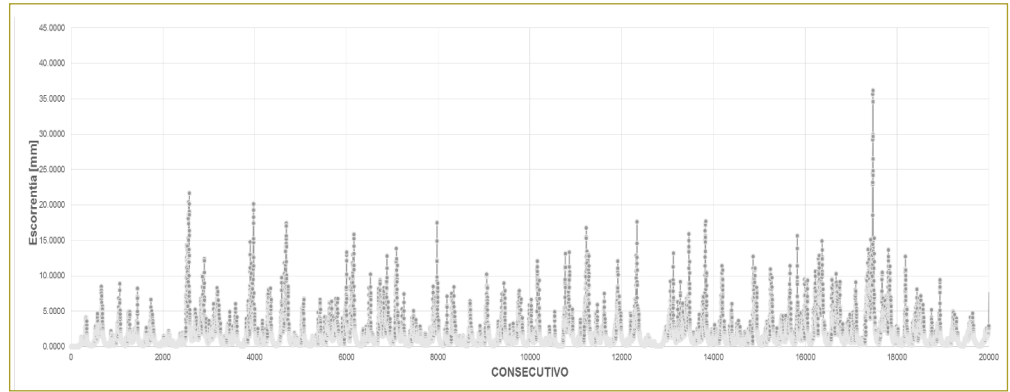


Figura 12. Curva de llenado de la zona norte del tajo (escenario 1). Registros históricos extendidos con los datos sintéticos (flujo subterráneo).

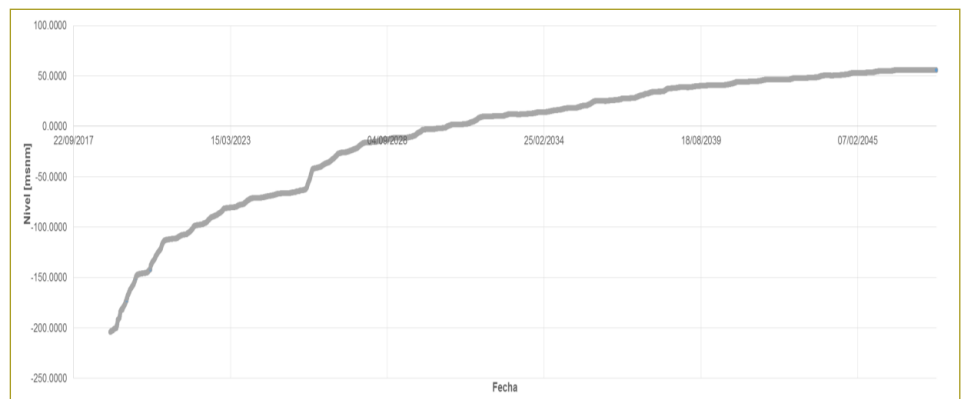
ubicada al norte, junto con los aportes de escorrentía subterránea, se tiene que iniciando el llenado el 1.º de enero de 2019, para mediados del mes de mayo del 2046 el tajo alcanzaría la cota máxima de llenado de 56 msnm. Al agregar la cuenca “Escombrera Aa”, se reduciría el tiempo de llenado del tajo en su zona norte en aproximadamente 28 años.

En la figura siguiente se puede apreciar el comportamiento de los niveles de la zona norte del tajo en el tiempo, con inicio del llenado en el año 2019 y final en el año 2046 (figura 13).

Escenario 3

Finalmente, para el escenario 3, el cual corresponde al análisis del llenado de la zona sur del tajo con la escorrentía directa de las áreas de drenaje denominadas Aa, Ab, B, C, D y E, los excesos de la zona norte del tajo y el flujo subterráneo que ingresa a esta zona, se obtiene que para principios del mes de septiembre del año 2067 se alcanzaría la cota máxima de 48 msnm, al iniciar el llenado de esta zona el 1.º de enero del año 2048, fecha de finalización de la construcción del dique definido por Drummond Ltd. en su plan minero

Figura 13. Curva de llenado de la zona norte del tajo (escenario 2). Registros históricos extendidos con los datos sintéticos (flujo subterráneo).



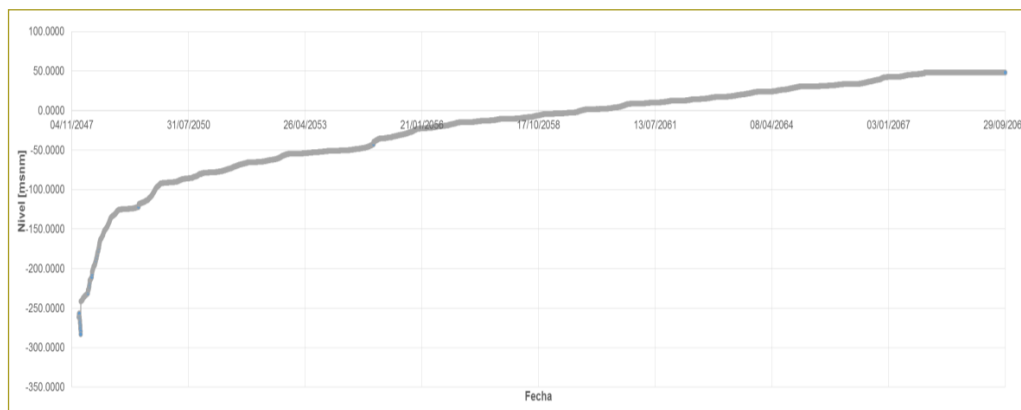


Figura 14. Curva de llenado de la zona sur del tajo (escenario 3). Registros históricos extendidos con los datos sintéticos (flujo subterráneo).

y que separará la zona sur de la zona norte del tajo. Se requieren 19 años para llenar la totalidad del volumen de la zona sur del tajo.

A continuación se presenta el comportamiento de los niveles de la zona sur del tajo en el tiempo, con inicio del llenado en el año 2048 y final en el año 2067 (figura 14).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como resultado de los estudios efectuados, las metodologías utilizadas y los análisis realizados para el llenado del tajo del proyecto minero La Loma, se presentan las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Los valores diarios de precipitación para las cuencas se han obtenido a partir de las series históricas disponibles de estaciones existentes en la zona del proyecto, cuyos datos se han verificado y contrastado adecuadamente.
- Para la transformación de la lluvia en escorrentía se ha utilizado un modelo sencillo de dos tanques, el GR4J. La calibración adecuada del modelo ha sido posible gracias a la información recopilada de la escorrentía por Drummond Ltd., en una cuenca de drenaje minero cuyo caudal es aforado diariamente en una piscina y que, de acuerdo con la información suministrada, simula en forma adecuada el compor-

tamiento diario de la escorrentía de las cuencas involucradas en los estudios. Por su sencillez, este modelo no considera de manera explícita las condiciones de flujo no estacionario, derivadas principalmente de los procesos realizados una vez que el agua se infiltra o percola. En otras palabras, se ha usado un modelo agregado y permanente.

- Parte de la calibración del modelo GR4J exigió garantizar parámetros estadísticos correspondientes a la media y a la desviación estándar de los datos generados con el modelo y los datos medidos. Igualmente, las curvas de duración obtenidas de la calibración aseguran la presencia de caudales mínimos con la frecuencia establecida en la serie observada y con la tendencia definida por la curva de duración obtenida de las mediciones en la piscina 1A.

REFERENCIAS

- Carvajal, F. & Roldán, E. (2007). *Calibración del modelo lluvia-escorrentía. Agregado GR4J. Aplicación: cuenca del río Aburrá*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (2018). *Caracterización del área de influencia (componente hidrología e hidráulica) requerida para la modificación de la licencia ambiental del proyecto La Loma para el periodo 2019-2048*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Centro de Estudios Hidráulicos.
- Monsalve Sáenz, G. (1995). *Hidrología en la ingeniería*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Estado del arte sobre el diseño y construcción de puentes de armadura para situaciones de emergencia con materiales compuestos por polímeros reforzados con fibras de vidrio (GFRP)

State of the art of the design and construction of truss bridges for emergency situations using materials composed by glass fiber reinforced polymers (GFRP)

JHON FREDY CAJICÁ SALAZAR¹ - JAIME ERASMO GARZÓN MORENO²

1. Estudiante de la maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Estructural de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, D.C., Colombia.

2. Profesor titular de la maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Estructural de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, D.C., Colombia.

jhon.cajica@mail.escuelaing.edu.co - jaime.garzon@escuelaing.edu.co

Recibido: 24/07/2021 Aceptado: 18/08/2021

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

Los puentes con materiales compuestos (polímeros reforzados con fibras, FRP) han tenido un desarrollo notable recientemente para pasarelas peatonales o prototipos de puentes vehiculares investigados experimentalmente con ensayos estáticos y dinámicos antes de ponerlos en servicio. En el caso de los puentes vehiculares para situaciones de emergencia, se tiene principalmente como potencial aplicación una solución innovadora de un prototipo de puente modular híbrido FRP-acero de armadura espacial con vigas triangulares invertidas, que consta de un tablero ortotrópico de aluminio y vigas con cordones inferiores de perfiles tubulares circulares, diagonales del alma y verticales GFRP. El desarrollo más reciente alcanza una luz de 51,0 m, con barras tensores inferiores GFRP y arrojamientos de celosía (diagonales GFRP y transversales de aluminio) que unen el cordón inferior de las vigas triangulares, con el fin de mejorar la resistencia a flexión y torsión.

Palabras claves: puente de emergencia, GFRP, totalmente compuesto, FRP.

Abstract

Bridges with FRP composite materials have had a remarkable development recently for pedestrian walkways or vehicular bridge prototypes that have been initially investigated experimentally with static and dynamic tests before being put into service. In the case of vehicular bridges for emergency situations, the main potential application is an innovative solution of a prototype FRP-Steel hybrid modular bridge with spatial reinforcement with inverted triangular beams, consisting of an orthotropic aluminum deck and beams with lower chords of circular tubular profiles, diagonal web, and vertical GFRP. The most recent development reaches a span of 51,0 m with GFRP lower tension bars and lattice braces (GFRP diagonal and aluminum cross braces) that join the lower chord of the triangular beams in order to improve resistance to bending and torsion.

Keywords: emergency bridge, GFRP, composite, FRP.

INTRODUCCIÓN

En este artículo se presenta un estado del conocimiento sobre la aplicación de materiales compuestos por polímeros reforzados con fibras (FRP).

En el ámbito internacional existen estructuras con materiales FRP ya construidas, pero generalmente son de pequeñas luces, debido a que son muy pocos los estándares o códigos de diseño.

Se sabe que los materiales compuestos FRP presentan muchas ventajas en comparación con materiales tradicionales, como su alta relación resistencia/peso, gran resistencia a la corrosión y a fenómenos ambientales, baja conductividad eléctrica y magnética, pero también se sabe que son vulnerables a fenómenos de incendio, fatiga y fluencia. No obstante lo anterior, son materiales muy versátiles en dimensiones, y propiedades físicas, mecánicas y químicas.

Los perfiles pultruidos tubulares circulares con materiales FRP se pueden utilizar para resistir fuerzas principalmente axiales, en un sistema estructural de armadura espacial con conexiones y tablero en acero.

MATERIALES COMPUESTOS

Las fibras sintéticas con matrices poliméricas se suelen denominar materiales compuestos (Ruano & Ruano, 2015).

Las fibras son, por lo general, filamentos largos de carbono o vidrio como materiales más usados y con diámetros del orden de las micras; también soportan la totalidad de la carga por su elevada resistencia a la tracción en comparación con la matriz polimérica que envuelve y protege a las fibras, al tiempo que transfieren la tensión entre fibras. Las matrices poliméricas tipo epoxi son las más usadas en aplicaciones estructurales por su estabilidad termoquímica, y se clasifican en termoestables y termoplásticas. Las termoestables, como el epoxi, son las más utilizadas en ingeniería mecánica.

El porcentaje en volumen de fibras de un material compuesto es superior al 60 %, regularmente, y el resto suele ser polímero.

Los diseños apropiados con compuestos FRP ofrecen beneficios adicionales, como resistencia a explosiones, golpes y fatiga, con interferencias acústicas y magnéticas reducidas (GangaRao, 2016).

La resistencia a la tracción de los compuestos GFRP es de aproximadamente el mismo orden del acero

(170-240 MPa). La desventaja de estos materiales es su reducida resistencia al fuego y su vulnerabilidad a varios fenómenos de daño y modos de falla complejos. También los materiales GFRP tienen un módulo de elasticidad bajo (aproximadamente, 1/8 del módulo del acero), lo que genera grandes deformaciones y fenómenos de pandeo importantes. Debido a su bajo peso y esbeltez, las estructuras de FRP también son sensibles al pandeo aeroelástico (Aloci & Valvo, 2019).

Una de las propiedades más relevantes de estos materiales es su comportamiento elástico anisótropo en comparación con el acero, que es un material isótropo. El origen de la anisotropía se debe a la diferencia de rigidez entre la matriz y las fibras con su direccionamiento. La resistencia mecánica de la matriz es, en gran medida, menor que la de las fibras; por tal motivo, los materiales compuestos presentan mayor resistencia y rigidez en la dirección de las fibras y menor en la dirección opuesta, lo que lleva a una mayor complejidad en el cálculo tensional.

Otra de las grandes propiedades de los materiales compuestos es la relación resistencia/peso, que es de tres a cinco veces mayor que la del acero estructural.

El panel tipo “sandwich” es un compuesto híbrido, conformado por un núcleo central y dos capas rígidas en los extremos. Estas capas proveen un gran momento de inercia para la resistencia a la flexión, mientras se reduce el peso por el núcleo central aligerado.

MÉTODOS DE FABRICACIÓN

Los primeros puentes con materiales compuestos se construyeron usando un proceso de fabricación básico de laminado húmedo. Más tarde se utilizó un proceso de pultrusión, que involucra una tracción continua de los filamentos de fibras y capas a través de un baño de resina y posteriormente en un molde caliente. En la última década se ha empleado el proceso de infusión al vacío, que utiliza la presión negativa de vacío para infusión de fibras secas con resina, la cual es colocada en un molde y sellada en una cámara hermética. La infusión al vacío resulta en un alto precio por unidad de peso del material más que la pultrusión (Pyrzowski & Miśkiewicz, 2017).

PUENTES DE EMERGENCIA

Actualmente, los puentes de emergencia estandarizados más utilizados son el puente Bailey y el puente D. Un problema clave de los puentes de acero son los grandes costos de inspección y reparación necesarios para mitigar la corrosión (Blaga, Dos Santos, Bancila & Amancio-Filho, 2015).

Los materiales GFRP tienen, en comparación con el acero, un módulo de elasticidad más bajo, una resistencia al cizallamiento más baja y una ductilidad deficiente. Sin embargo, mediante la incorporación de perfiles GFRP en una configuración de armadura espacial, es una forma estructural con alta rigidez debido a la distribución de cargas, en la que los miembros están sometidos principalmente a fuerzas axiales en lugar de fuerzas cortantes. Con el diseño de los miembros a compresión en una armadura espacial, se toma la ventaja de su estabilidad para introducir un comportamiento a grandes deformaciones no lineales mediante el pandeo progresivo de los miembros en compresión (Yang, Bai & Ding, 2015). A modo de comparación, el tiempo de montaje del puente de armadura pesada (HTB) utilizado en China, con una viga de celosía con cordones de acero, es de 240 minutos y pesa 402,5 kN. También el puente de viga mediana (MGB), del Reino Unido, tiene un tiempo de montaje de 200 minutos y pesa 403,0 kN.

El puente propuesto FRP-acero presenta ventajas en comparación con los puentes tradicionales para casos de emergencia. Uno de los desarrollos recientes de un puente de 51 m con una armadura espacial híbrida GFRP-aluminio peso solo 162,0 kN, con un tiempo de montaje estimado de 160 minutos (Mao et al., 2019) (figura 3).

RESISTENCIA AL FUEGO

En la mayoría de los casos, el criterio limitante para la resistencia al fuego es la temperatura de transición vítrea de la resina en las zonas sometidas a compresión, y se puede alcanzar a temperaturas de alrededor de los 100 °C. Se ha encontrado que se puede evitar la protección contra el fuego en sistemas estructurales redundantes (estáticamente indeterminados), donde las fallas locales no causan el colapso de la estructura (Correia, Bai & Keller, 2015).

USO DE MATERIALES COMPUESTOS

Los compuestos de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP) surgieron en las últimas dos décadas como materiales adecuados para construcción, y su propósito principal no es reemplazar materiales tradicionales, sino ser aplicados como una alternativa eficiente (Blaga et al., 2015).

No hay claridad sobre el primer puente compuesto GFRP. Algunos dicen que es Ginzi Highway, de 12 m de luz en Bulgaria (figura 1), y otros afirman que es el puente Miyun, en Beijing (China), ambos construidos en 1982. Se estima que aproximadamente 300 puentes en todo el mundo se construyen en su totalidad con plásticos reforzados con fibras (estructuras totalmente FRP). Las ventajas de elementos de puentes GFRP son la facilidad de producción, transporte e instalación, así como un mantenimiento mínimo (Blaga et al., 2015).



Figura 1. Puente compuesto Ginzi Highway, en Bulgaria (tomada de Blaga et al., 2015).

El uso de los materiales compuestos en la ingeniería civil ha tenido un aumento importante en las últimas dos décadas, sobre todo en puentes, estructuras de arquitectura singular y estructuras *off-shore*. Países como Estados Unidos, Japón, Suiza y Dinamarca cuentan ya con varios puentes y estructuras de ingeniería hechos con materiales compuestos, pero por la ausencia de normativas de diseño son de pequeñas luces. Muchas de estas estructuras están basadas en diseños de los materiales tradicionales, lo cual no es muy recomendado porque en la bibliografía especializada se recomienda la búsqueda de formas óptimas que aprovechen al máximo las características anisótropicas de estos materiales, cumpliendo con los estándares de servicio y seguridad establecidos (Ruano & Ruano, 2015).

Los materiales compuestos presentan grandes ventajas en la aplicación para puentes peatonales. Empezaron a utilizarse en la década de los ochenta pero eran muy costosos para competir en la industria de la construcción. Las primeras aplicaciones fueron principalmente para reforzamiento y rehabilitación de estructuras de puentes existentes usando láminas y tiras. El material más común en la construcción es el polímero reforzado con fibras de vidrio GFRP (Pyrzowski & Miśkiewicz, 2017).

CONEXIONES DE PERFILES GFRP

Las conexiones de elementos GFRP desempeñan actualmente un papel central en las actividades de investigación y desarrollo de la comunidad de diseño estructural. *A priori*, solo hay tres formas de unir materiales y piezas y dependen de fuerzas mecánicas o químicas, o utilizan fuerzas físicas. Las técnicas de unión para aplicaciones estructurales GFRP son la unión adhesiva, la sujeción mecánica y las conexiones atornilladas híbridas; también la soldadura, pero solamente en el caso de polímeros termoplásticos y algunas geometrías de juntas (Blaga et al., 2015).

Hoy en día, existe una técnica de unión con alta eficiencia de conexión para tubos de FRP pultruidos, denominada conexión de dientes preapretados (PTTC). Esta conexión tiene una capacidad de transferir una gran fuerza axial por el esfuerzo interlaminar de los materiales compuestos de FRP, que es mayor que el de la resina pura, en tanto que el esfuerzo de compresión radial mejora la resistencia al corte interlaminar (Zhang, Zhao, Li, Tao & Gao, 2018).

PUNTES CON MATERIALES COMPUESTOS FORMADOS POR FRP

Las pasarelas totalmente compuestas se han realizado principalmente mediante una de dos tecnologías de fabricación: moldeo por transferencia de resina asistido por vacío (VARTM) o su variación estadounidense: proceso de moldeo por infusión de resina de compuestos Seemann (SCRIMP) y pultrusión. Las estructuras totalmente compuestas se han fabricado con vidrio, carbono, aramida y otros compuestos de fibra, pero en la mayoría de los casos las fibras de vidrio brindan la mejor relación calidad/precio (es decir, la capacidad de cumplir con

los criterios de diseño requeridos al menor costo). La resina de éster de vinilo es la opción predominante para la matriz que une las fibras. Es rentable y duradera por un largo tiempo de servicio (Siwowski, Kulpa, Rajchel & Poneta, 2018).

El desarrollo de puentes FRP en Indonesia sigue los lineamientos de lo que se ha establecido para puentes vehiculares y peatonales en Estados Unidos en los años ochenta.

Entre los aspectos que hay que tomar en cuenta en los materiales FRP están el deterioro debido al aumento de temperatura, sobre todo con cargas de compresión y cortante, y la exposición por más de 3000 horas a los rayos ultravioleta, algo muy importante en países tropicales (Sidik & Irawan, 2020).

La mayoría de las aplicaciones directas de compuestos FRP para puentes son para tableros de tráfico vehicular. En otras aplicaciones, debido a la falta de guías o códigos, se hizo un uso mínimo de vigas totalmente compuestas como miembros principales para puentes vehiculares. Los materiales compuestos son frágiles en el sentido de ser linealmente elásticos hasta la falla, por lo que se proponen sistemas combinados con materiales tradicionales como el concreto o el acero. En el 2003, en Estados Unidos ya había más de mil puentes peatonales FRP construidos, de modo que el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) redactó una guía sobre puentes FRP y la AASHTO publicó las especificaciones de la guía para el diseño de puentes peatonales FRP.

En la década de los noventa, la armada estadounidense desarrolló un puente militar compuesto (CAB) como una alternativa más ligera frente a los clásicos puentes de acero. En Canadá, se desarrolló un sistema de puente GFRP rápidamente desplegable, con una alta capacidad de carga. En Malasia, se diseñó un puente portátil usando materiales compuestos FRP para operaciones de rescate de desastres y defensa (Hung, Sung, Chang, Yin & Yeh, 2016).

Varios investigadores contribuyeron a la investigación y el desarrollo de sistemas sándwich de FRP para fines estructurales y se centraron en mejorar los materiales del núcleo, ya sea mediante manipulación celular (CM), cara corrugada (CF), refuerzo de fibra (FR), disposición geométrica (GA), introducción de un sistema de capa intermedia (IL) o híbridos (H) para fabricar compuestos sándwich de mayor rendimiento (Manalo, Aravinthan, Fam & Benmokrane, 2017).

Los modos de falla de los sistemas sándwich de FRP dependen principalmente de la naturaleza del material del núcleo, pues los núcleos de espuma comúnmente utilizados tienen baja resistencia y módulo de cizallamiento y compresión. Por lo tanto, muchos investigadores han dedicado esfuerzos significativos para desarrollar o modificar el material del núcleo, con el fin de producir sistemas sándwich con rendimientos más altos. El refuerzo localizado y la introducción de fibras para mejorar las propiedades del núcleo de espuma implican un proceso complejo, como el tejido o la tecnología de inyección, que puede incrementar aún más el costo de producción, al igual que la cantidad de resina recogida durante el moldeo, lo que aumenta el peso del panel. La capa intermedia aumenta la cantidad del material utilizado, lo que sube el costo. La rigidez aumentada, al utilizar una estructura de núcleo compleja, se obtiene con un costo de mecanizado añadido y materiales desperdiciados.

Estos aspectos son importantes y deben abordarse en el desarrollo de nuevos materiales de núcleo para avanzar en el uso de sistemas sándwich FRP en aplicaciones de ingeniería civil (Manalo et al., 2017).

La fatiga es un aspecto crítico en el diseño de sistemas sándwich FRP bajo cargas repetitivas. Os-good (1982) y Hale & Amir (2014) encontraron que es necesario limitar la carga máxima aplicada, la cual no debería exceder el 35 % y el 21 % de la resistencia estática última para los sistemas sándwich de FRP con nervios, y el 30 % y el 45 % para aquellos sin nervios en descarga completa y en carga completamente invertida, respectivamente, para lograr una vida útil de fatiga de dos millones de ciclos. Thomas, Jan, Julia & Michael (2014) realizaron ensayos de fatiga en vigas GFRP con núcleo de madera de balsa a gran escala, con una junta adhesiva en el centro, para el puente Avançon bajo cargas al 10 % y 60 % de la carga de falla, y no mostraron signos de daños durante cinco millones de ciclos, que corresponden a una vida útil de cien años del puente.

La durabilidad de los sistemas sándwich FRP depende de algunas variables, como la temperatura elevada, la resistencia al fuego, la luz ultravioleta y la entrada de álcalis u otro líquido, como algunas de las propiedades en servicio más importantes que deben tenerse en cuenta al utilizar materiales compuestos de FRP en aplicaciones de ingeniería civil.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE MATERIALES COMPUESTOS FRP

Debido a la complejidad en la concepción de los materiales compuestos, no se pueden usar las técnicas de análisis y diseño de los materiales convencionales; para esto hay que definir el problema y las especificaciones del elemento que se va a diseñar, porque el número de combinaciones es ilimitado y la experimentación resulta ser costosa. Actualmente, se utilizan modelos matemáticos de optimización y métodos numéricos para predecir y simular su comportamiento, y hasta el momento parecen ser las herramientas adecuadas para el diseño de piezas compuestas (Reguera & Florencia, 2013).

Se debe conocer el comportamiento del material, y una de las dificultades es determinar las propiedades efectivas del material compuesto a partir de las propiedades de las fibras y de la matriz. Los materiales compuestos son anisótropos, lo que genera que sus propiedades varíen según la dirección y posición consideradas. Para modelar el comportamiento mecánico de estos materiales se deben estudiar los mecanismos microestructurales entre los constituyentes. Así se obtiene un modelo micromecánico que representa al material como un homogéneo equivalente para determinar las propiedades elásticas de la lámina. Los nombrados modelos macromecánicos establecen las relaciones constitutivas de una lámina a partir de las propiedades efectivas mencionadas. Las relaciones constitutivas de tensiones y deformaciones de una lámina de material anisótropo se pueden determinar a partir de la expresión (1):

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & Q_{14} & Q_{15} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & Q_{24} & Q_{25} & Q_{26} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & Q_{34} & Q_{35} & Q_{36} \\ Q_{41} & Q_{42} & Q_{43} & Q_{44} & Q_{45} & Q_{46} \\ Q_{51} & Q_{52} & Q_{53} & Q_{54} & Q_{55} & Q_{56} \\ Q_{61} & Q_{62} & Q_{63} & Q_{64} & Q_{65} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Donde se necesita determinar las veintiuna constantes Q_{ij} para definir la relación constitutiva de tensiones y deformaciones. Sin embargo, es evidente que existen laminados multicapa de FRP, donde hay múltiples capas ortótropas con dos planos de simetría ortogonales entre sí y un tercer plano perpendicular a ellos.

Un laminado es balanceado si para una capa orientada con las fibras en dirección $+\theta$ existe otra capa idéntica con las fibras en dirección $-\theta$. Para que un laminado sea simétrico debe haber una capa $+n$ y otra idéntica $-n$. Un

laminado *cross-ply* posee fibras orientadas únicamente a 0° y 90° , por lo que puede ser balanceada y simétrica o asimétrica.

Una de las teorías más utilizadas para analizar el comportamiento de vigas curvas y rectas de pared delgada construidas con materiales FRP es el principio de Hellinger-Reissner, que considera la deformación por corte debida a flexión y alabeo no uniforme. Esta formulación es una extensión del modelo propuesto por Cortinez y Piován (2002, 2006) para la consideración de vigas curvas de pared delgada sujetas a un estado arbitrario de tensiones iniciales, siendo estrictamente válida para laminaciones simétricas y balanceadas, ortótropas y *cross-ply*.

PROTOTIPOS EXPERIMENTALES DE PUENTES FRP

Se desarrolló un puente de armadura espacial híbrido FRP-aluminio, con vigas de celosía triangulares invertidas. Los aspectos más importantes del nuevo puente incluyen un tramo de 24 m de luz y la capacidad de transportar un camión de cuatro ruedas con un peso de 50 kN. Se consideró un coeficiente de impacto μ de aproximadamente 0,122 (Zhang & Li, et al., 2019) (figura 2). Durante los ensayos no se escuchó el ruido de ninguna grieta del acero o materiales de GFRP durante la carga estática del puente prototipo de 24 m, y la inspección visual después del ensayo no presentó evidencia de grietas en los laminados de GFRP y las líneas de soldadura.

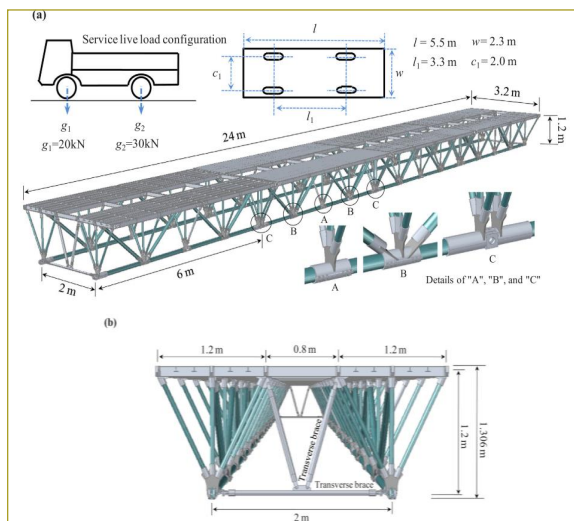


Figura 2. Diseño conceptual de puente prototipo de 24 m con el sistema de armadura espacial híbrida de FRP-aluminio (tomada de Zhang & Li et al., 2019).

De acuerdo con los resultados de deformación estructural, el puente tiene un comportamiento casi lineal que se encuentra dentro del rango elástico. Los esfuerzos axiales son mayores que los esfuerzos de flexión en todas las secciones del puente. De este modo, los esfuerzos de flexión en toda sección transversal son casi iguales a cero y, por lo tanto, pueden despreciarse. Los estados de esfuerzos en los elementos de la armadura generalmente satisfacen las características mecánicas axiales de los compuestos de GFRP pultruidos unidireccionales, con baja resistencia al cortante interlaminar, de manera tal que los perfiles tubulares GFRP pultruidos son adecuados como elementos para el cordón inferior de la armadura del puente.

Sin embargo, con la carga asimétrica fuera del eje, se encontró una gran diferencia en los esfuerzos axiales para los cordones inferiores de la viga izquierda y derecha, con valores de aproximadamente 2,3 veces mayores para la viga izquierda en comparación con la derecha. Esto se debe, particularmente, al momento de torsión generado por la carga vertical excéntrica.

Los esfuerzos axiales en los elementos diagonales del alma fueron casi iguales a cero. Para este caso donde se analizó la sección de flexión pura, la fuerza cortante equivalente en la viga es cero, por lo que los esfuerzos axiales dentro de los elementos diagonales del alma son casi iguales a cero.

Se propone un puente de armadura espacial híbrido con perfiles FRP y tablero de aluminio de 54 m (Yan et al., 2018). El puente de cordones de celosía propuesto está ensamblado por nueve unidades modulares y luego reforzado con dos cordones, utilizado principalmente en trabajos de rescate de emergencia para tráfico vehicular liviano; está diseñado para soportar una carga vehicular de 250 kN.

Con fundamento en un trabajo anterior de un puente similar, con 12 m de longitud (Zhang et al., 2014), se diseñó y construyó una estructura de cordones ligeros con una viga compuesta de armadura cajón para un puente de emergencia con longitud de 51 m y capacidad de carga vehicular de 200 kN (Mao et al., 2019) figura 3.

El peso total del puente es de aproximadamente 162 kN, con un tiempo estimado de montaje de unos 160 minutos.

Se hizo el ensayo de carga a flexión de la estructura en escala de tamaño real, con la condición simplemente apoyada. Para simular la carga se colocaron cuatro

durmientes en madera para soportar directamente la carga aplicada por bloques de acero en diferentes configuraciones para cuatro etapas de carga (110, 160, 210 y 230 kN), para una carga total, incluyendo factor de impacto (0,15) de 230 kN. Los procesos de carga y descarga se realizaron con la ayuda de una grúa pórtico. De acuerdo con los resultados esfuerzo-deformación, se observa que las deformaciones longitudinales en los elementos presentan una respuesta lineal-elástica, como se esperaba. También se observó que los elementos están sometidos principalmente a esfuerzos axiales, que son mucho menores que la resistencia del material para todos los miembros instrumentados.

Se presentan resultados similares en un estudio posterior sobre el mismo puente de armadura espacial híbrida FRP-aluminio de 51 m (Zhang et al., 2020) (figura 3). Dentro de una misma configuración experimental se ensayaron dos condiciones de carga estática: la carga simétrica con respecto al eje del puente, y la carga asimétrica con una excentricidad de 300 mm con respecto al eje. De este modo, se puede hacer una comparación razonable.

Con arreglo a las condiciones de ensayo en el sitio y la seguridad de la carga, el programa experimental se realizó con la aplicación de cargas estáticas con incrementos para medir la respuesta en seis pasos de carga (20, 70, 120, 170, 200 y 230 kN). Antes de iniciar

el ensayo se aplicó una carga de 70 kN tres veces para minimizar errores de fabricación y montaje.

Según los resultados de la respuesta carga-desplazamiento, no se considera el desplazamiento menor promedio en los apoyos. Se observa que la respuesta es lineal elástica bajo el estado límite de servicio para las dos vigas triangulares.

En la condición de carga excéntrica, la viga izquierda presenta un desplazamiento mucho mayor que la derecha. La diferencia en la deformación vertical entre las dos vigas es de 18,1-19,7 %. Se encontró, conforme al ensayo, un desplazamiento máximo en el centro del puente para la carga de servicio de 200 kN de 364,4 mm, un valor inferior al desplazamiento admisible de 425 mm ($L/120$), de acuerdo con el Código de Diseño (1988).

Conforme a los resultados de la respuesta torsional, se puede ver que se propuso una variación lineal elástica bajo carga de servicio, como se proyectaba. La estructura propuesta presenta una resistencia a la torsión mayor que la viga compuesta de celosía simple.

La rigidez a la flexión global del puente de armadura con cordones inferiores a 51 m es aproximadamente 3,77 veces mayor que la viga compuesta de celosía simple, pero solo 1,23 veces mayor para la rigidez a la torsión global del puente.

Con el fin de validar el modelo de elementos finitos, se compararon los resultados numéricos y experimen-

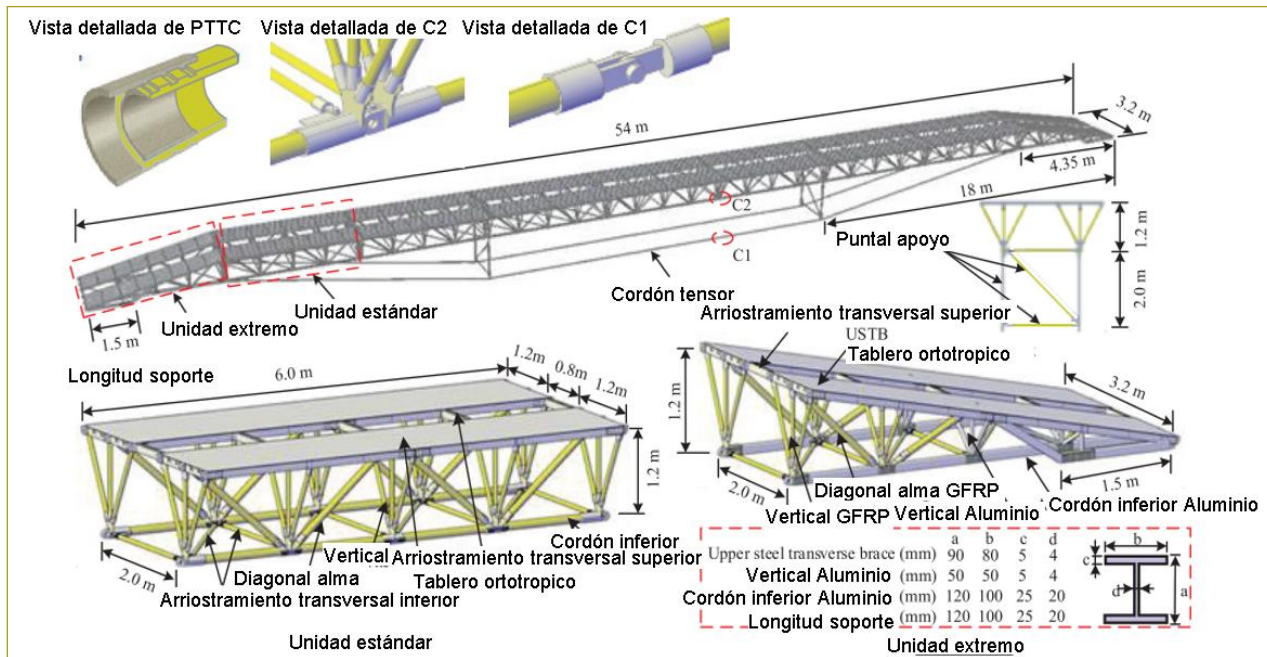


Figura 3. Concepto de diseño del puente (tomada de Mao et al., 2019).

tales para los desplazamientos verticales en el centro del puente. En este caso, para las cargas excéntricas, las diferencias fueron de 1,6 % y 0,84 % para la viga triangular izquierda y derecha, respectivamente. Así mismo, para el valor D (diferencia de valores de desplazamiento vertical entre la viga izquierda y la derecha) bajo cargas excéntricas se presenta una diferencia máxima del 11,78 % entre los resultados numéricos y experimentales. Se observa que los valores numéricos son ligeramente mayores que los experimentales.

ANÁLISIS NUMÉRICO DE Puentes FRP

En este caso, se hizo un análisis de elementos finitos para conocer el efecto de la variación del módulo elástico de diferentes elementos FRP del puente (figura 3) sobre la deformación bajo cargas excéntricas críticas. Se organizaron cuatro grupos de modelos de elementos finitos, con el objetivo de incrementar el módulo elástico del elemento analizado de 50 a 150 Gpa, en intervalos de 10 Gpa, manteniendo fijas las propiedades en el resto de los elementos, tal como en el modelo validado anteriormente en la estructura experimental.

Más adelante se muestra la influencia de la variación del módulo elástico sobre el desplazamiento vertical en el centro del puente para los elementos diagonales del alma, los arriostramientos inferiores, el cordón inferior y los tensores del cordón (figura 4a). Se observa que la influencia en el incremento del módulo elástico sobre las diagonales del alma y los arriostramientos inferiores

no presenta cambios sobre el desplazamiento vertical. Sin embargo, para los elementos del cordón inferior y los tensores del cordón se registra una disminución notable en el desplazamiento vertical con el incremento del módulo elástico. Este análisis de sensibilidad muestra que se puede mejorar la rigidez a la flexión global del puente con un aumento en el módulo elástico para los miembros FRP de los tensores del cordón.

Igualmente, se muestra la influencia de la variación del módulo elástico sobre el ángulo torsional máximo en el centro del puente de diferentes elementos FRP. Los tensores del cordón y los arriostramientos inferiores tuvieron mayores variaciones que los demás elementos FRP, de tal manera que se puede mejorar la rigidez torsional global del puente al optimizar las propiedades GFRP con un incremento del módulo elástico de los tensores del cordón y los arriostramientos inferiores (figura 4b).

COMPARACIÓN DE RESULTADOS ANALÍTICOS, NUMÉRICOS Y EXPERIMENTALES

En la página siguiente se puede apreciar la gráfica carga-desplazamiento para diferentes curvas de los resultados teóricos, experimentales y numéricos (figura 5).

La curva con la leyenda “T1” corresponde a la ecuación analítica para el cálculo de la deflexión de una viga triangular invertida de armadura espacial híbrida FRP-aluminio (Zhang & Li, et al., 2019). La curva de la leyenda “T2” corresponde a la solución teórica de un

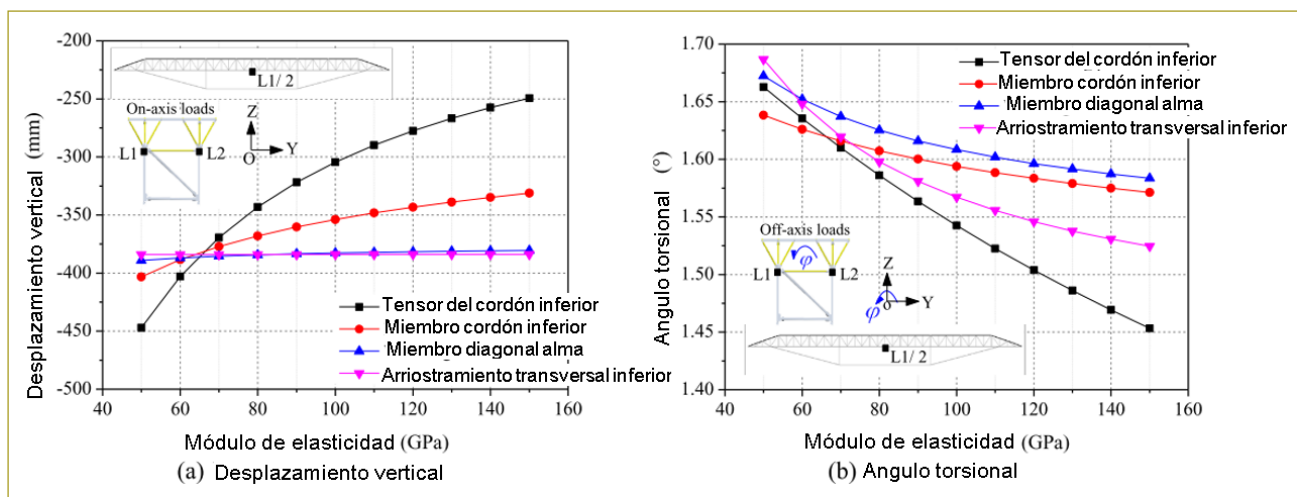


Figura 4. Influencia en el cambio del módulo elástico de diferentes elementos FRP sobre la deformación del puente (tomada de Zhang et al., 2020).

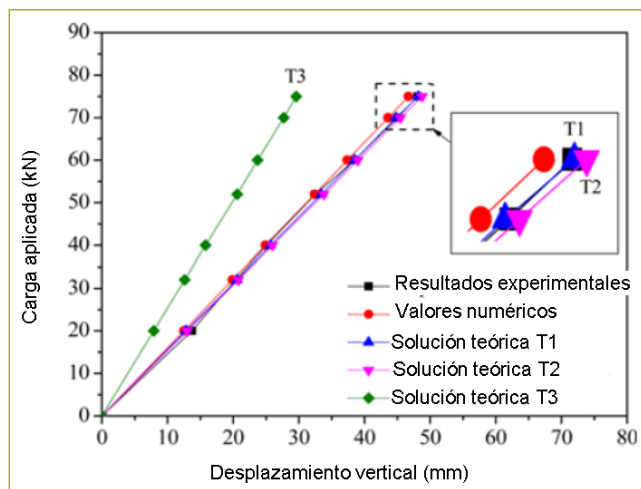


Figura 5. Solución teórica de la curva de carga-desplazamiento y su comparación con los resultados experimentales y las simulaciones numéricas (tomada de Zhang, Li, Shao & Fan, 2019).

estudio anterior (Li, Zhang, Zhao & Deng, 2015). La curva con la leyenda “T3” corresponde a la ecuación de deflexión (Zhang & Li, et al., 2019) con la solución teórica, sin considerar la deformación a cortante de la lámina del alma equivalente para la deflexión total de la viga I. También se presentan los resultados experimentales y numéricos mencionados anteriormente. En las soluciones teóricas T1 y T2 sí se tuvo en cuenta esta deformación cortante.

La diferencia máxima entre T3 y los resultados experimentales es de 38,5 %. Esto se debe a que no se consideró la deformación por cortante de las diagonales del alma de GFRP en la deflexión total de la estructura.

Por el contrario, a T3, la solución teórica T1 se aproxima bien a los resultados experimentales y numéricos con una diferencia extremadamente pequeña, lo que demuestra la validez del modelo teórico simplificado (Zhang & Li, et al., 2019). La razón de esto es que se consideró la deformación por cortante de la lámina del alma equivalente en la deflexión total.

IMPLEMENTACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS POR POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS EN COLOMBIA

En Colombia, estos materiales compuestos se están empleando en diferentes áreas, como la industrial, el mobiliario, en metalmecánica y en construcción, sobre todo en remodelación de viviendas, pero en realidad no se están utilizando como material principal estructural:

además, existen muy pocas empresas que realizan la producción de materiales compuestos por polímeros reforzados con fibras de vidrio para diferentes aplicaciones, panorama que nos muestra que Colombia necesita más investigación en el uso de estos materiales para aplicaciones netamente estructurales, sobre todo para entregarlos en situaciones de emergencia por su versatilidad en las relaciones resistencia/peso, ofreciendo las ventajas de una construcción modular de fácil transporte a sitios remotos y de difícil acceso.

El camino que hay que seguir para poder empezar a utilizar los materiales compuestos por polímeros reforzados con fibras de vidrio en Colombia para aplicaciones estructurales donde los elementos principales son perfiles y paneles sándwich para vigas, losas, armaduras, consiste en comenzar con la academia por medio de trabajos de investigación en los campos analítico y experimental.

Existen referencias internacionales sobre el uso de materiales compuestos FRP que se pueden aplicar para el diseño de este tipo de estructuras.

Un documento que se publicó como una recopilación de guías de diseño en Europa para el cálculo de estructuras FRP es *Prospect for New Guidance in the Design of FRP* (Ascione et al., 2016), y es de libre acceso. El alcance de esta guía de diseño es el siguiente:

- Aplica para partes termoestables FRP con al menos 15 % de fibras en volumen.
- Se puede utilizar para el diseño de estructuras FRP de perfiles, losas, láminas y paneles sándwich.
- Estructuras en las que no se permiten microfisuras no se tratan en esta guía.
- En la guía no se incluyen barras de refuerzo FRP, cables o refuerzos externos para estructuras empleando FRP.
- Los elementos estructurales que se tienen en cuenta se realizan mediante los siguientes procesos principales de fabricación: preimpregnado, pultrusión, moldeo por compresión, moldeo por transferencia de resina, bobinado de filamentos y laminado manual. También se incluyen las estructuras sándwich, que consisten en un núcleo (espuma, madera o panel) cubierto por láminas frontales de FRP.

Existe además una guía de diseño para puentes peatonales FRP de la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), *Guide*

Specifications for Design of FRP Pedestrian Bridges (1.ª ed., 2008), que se puede comprar en la página web.

CONCLUSIONES

- En la actualidad, hay un gran número de puentes vehiculares de gran importancia construidos con materiales FRP, y en su mayoría son híbridos, en los que la cimentación y la subestructura se construyen con concreto, en tanto que la superestructura tiene losa de concreto y vigas FRP. Estas estructuras han registrado un buen comportamiento, dada su corta edad de construcción.
- Para los puentes desplegados que deben enfrentar situaciones de emergencias con materiales de polímero reforzado con fibras de vidrio (GFRP) o fibras híbridas vidrio/carbono (HFRP), se han desarrollado prototipos experimentales de armaduras espaciales con vigas de celosía triangulares invertidas, como una solución eficiente desde el punto de vista de la rigidez global para la optimización en el uso de los materiales, aprovechando su gran resistencia longitudinal para soportar principalmente fuerzas axiales en perfiles tubulares circulares.
- En este artículo se pretende estimular el inicio de la investigación en el uso de los materiales compuestos de polímeros reforzados con fibras en Colombia, como estructuras para casos de emergencia, dadas sus ventajas de bajo peso y gran resistencia, entre otras, en comparación con materiales tradicionales.
- Cabe destacar que hoy en día las mejores soluciones se presentan, en la mayoría de los casos, como diseños y construcciones híbridas de los materiales compuestos y tradicionales, como el acero y el concreto.

REFERENCIAS

- Aloci, C., & Valvo, P. S. (2019). Feasibility study of a hybrid FRP-steel cable-stayed pedestrian swing bridge. *Engineering Structures*, 189, 359-372. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.087>.
- Ascione, L., Caron, J.-F., Godonou, P., Van IJselmuiden, K., Knippers, J., Mottram, T., ... Tromp, L. (2016). Prospect for New Guidance in the Design of FRP. In *Eur 27666 En*. <https://doi.org/10.2788/851558>
- Blaga, L., Dos Santos, J. F., Bancila, R., & Amancio-Filho, S. T. (2015). Friction Riveting (FricRiveting) as a new joining technique in GFRP lightweight bridge construction. *Construction and Building Materials*, 80, 167-179. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.001>.
- Correia, J. R., Bai, Y., & Keller, T. (2015, September 1). A review of the fire behaviour of pultruded GFRP structural profiles for civil engineering applications. *Composite Structures*, 127, 267-287. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.03.006>.
- GangaRao, H. (2016). Infrastructure Applications of Fiber-Reinforced Polymer Composites. In *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing, Materials, and Applications: Second Edition* (pp. 675-695). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8.00032-8>.
- Hung, H. H., Sung, Y. C., Chang, K. C., Yin, S. H., & Yeh, F. Y. (2016). Experimental testing and numerical simulation of a temporary rescue bridge using GFRP composite materials. *Construction and Building Materials*, 114, 181-193. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.199>.
- Mathieson, H., & Amir, F. (2014). Static and Fatigue Behavior of Sandwich Panels with GFRP Skins and Governed by Soft-Core Shear Failure. *Journal of Composites for Construction*, 18(2), 4013046. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000445](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000445).
- Sidik, I., & Irawan, R. (2020). Structural behavior of open truss FRP bridge without side support. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 930(1), 012040. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/930/1/012040>.
- Siwowski, T., Kulpa, M., Rajchel, M., & Poneta, P. (2018). Design, manufacturing and structural testing of all-composite FRP bridge girder. *Composite Structures*, 206, 814-827. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.048>.
- Thomas, K., Jan, R., Julia, de C., & Michael, O.-A. (2014). GFRP-Balsa Sandwich Bridge Deck: Concept, Design, and Experimental Validation. *Journal of Composites for Construction*, 18(2), 4013043. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000423](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000423).
- Yan, X., Zhao, Q., Zhao, D., Ke, M., Zeng, Z., & Zhang, D. (2018). Experimental investigation of bending stiffness of a novel 54m FRP space truss string bridge. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 452(2). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/452/2/022103>.
- Yang, X., Bai, Y., & Ding, F. (2015). Structural performance of a large-scale space frame assembled using pultruded GFRP composites. *Composite Structures*, 133, 986-996. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.07.120>.
- Zhang, D., Li, F., Shao, F., & Fan, C. (2019). Evaluation of Equivalent Bending Stiffness by Simplified Theoretical Solution for an FRP-aluminum Deck-truss Structure. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 23(1), 367-375. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-1093-4>.
- Zhang, D., Lv, Y., Zhao, Q., & Li, F. (2019). Development of lightweight emergency bridge using GFRP-metal composite plate-truss girder. *Engineering Structures*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109291>.
- Zhang, D., Yuan, J., Zhao, Q., Li, F., Gao, Y., Zhu, R., & Zhao, Z. (2020). Static performance of a new GFRP-metal string truss bridge subjected to unsymmetrical loads. *Steel and Composite Structures*, 35(5), 641-657. <https://doi.org/10.12989/scs.2020.35.5.659>.
- Zhang, D., Zhao, Q., Huang, Y., Li, F., Chen, H., & Miao, D. (2014). Flexural properties of a lightweight hybrid FRP-aluminum modular space truss bridge system. *Composite Structures*, 108, 600-615. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.09.058>.
- Zhang, D., Zhao, Q., Li, F., Tao, J., & Gao, Y. (2018). Torsional behavior of a hybrid FRP-aluminum space truss bridge: Experimental and numerical study. *Engineering Structures*, 157, 132-143. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.12.013>.

Desarrollo de una herramienta computacional para la evaluación del comportamiento no lineal de muros de concreto reforzado

Development of a computational tool for assessing the non-linear behavior of reinforced concrete walls

FABIO ANDRÉS MORALES ORTIZ¹ - SANDRA ROCÍO JEREZ BARBOSA²

1. Magíster en Ingeniería Civil.

2. Profesora de la Maestría en Ingeniería Civil.

fabio.morales@mail.escuelaing.edu.co - sandra.jerez@escuelaing.edu.co

Recibido: 26/07/2021 Aceptado: 22/08/2021

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

Dado el aumento en la construcción de sistemas estructurales de muros portantes de concreto reforzado o sistema industrializado en Colombia, así como el crecimiento de la población de las ciudades donde es un sistema estructural predominante, y considerando además que Colombia se encuentra localizada en una zona de amenaza sísmica alta, es necesario generar herramientas de uso libre que permitan fomentar el interés en estudiantes de ingeniería y faciliten la comprensión, análisis e investigación sobre el comportamiento no lineal de los elementos que componen estos sistemas estructurales.

En atención a lo anterior, se desarrolla una herramienta computacional, en la versión 2.0, del *software* momento - curvatura, donde se programaron dos módulos: uno para la conceptualización de los diagramas momento curvatura de muros de concreto reforzado, orientado a consolidar el conocimiento y el módulo de ejecución que permite generar, a través de la librería de Opensees para Python, diagramas por medio de modelos de fibras. Se validaron los módulos comparándolos con los resultados obtenidos en el *software* Xtract, como programa de referencia.

Palabras claves: muros de concreto reforzado, análisis no lineal, Opensees, diagramas momento-curvatura.

Abstract

Given the increase in the construction of structural systems of concrete load-bearing walls in Colombia, the growth of the population of the cities where it is a predominant structural system and considering that the country is located in an area of high seismic hazard, it is necessary to generate free-use tools that foster interest in engineering students and facilitate understanding, analysis, and research on the non-linear behavior of the elements that make up these structural systems. Considering the above, a computational tool is developed to build moment- curvature curves, with two modules: one for the conceptualization of the diagrams of reinforced concrete walls, aimed at consolidating knowledge; and the execution module that allows to generate, through the Opensees library for Python, diagrams by means of fiber models. The validation of the modules was carried out by comparing them with the results obtained in the Xtract software, as a reference program.

Keywords: reinforced concrete walls, non-linear análisis, Opensees, moment-curvature diagrams.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas estructurales aporricados han sido sustituidos a escala mundial por sistemas más rígidos lateralmente, construidos con base en muros estructurales. Actualmente, el sistema industrializado de muros portantes es de gran importancia en Colombia, en especial en proyectos de vivienda multifamiliar. Al tercer trimestre de 2018, del área de construcciones iniciadas para vivienda en las principales ciudades del país, un 36 % corresponde al sistema estructural de muros de concreto reforzado.

Debido a que Colombia está localizada en el cinturón de fuego del Pacífico, zona de amenaza sísmica considerable, de acuerdo con los estudios de amenaza sísmica realizados por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), cerca del 40 % de los colombianos se encuentra en zonas de amenaza sísmica alta y 47 % de la población del país está ubicada en zonas de amenaza sísmica intermedia; es decir, el 87 % de la población del país se encuentra bajo un nivel de riesgo sísmico considerable (Correal, 2016). Por ende, todas las edificaciones se deben construir y diseñar para que desarrollen un comportamiento sismorresistente.

En el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) se considera la ductilidad de cada uno de los sistemas estructurales que allí se contemplan y se definen los parámetros de diseño mínimos requeridos, de acuerdo con la zona de amenaza sísmica donde se encuentre cada uno de ellos.

Una estructura dúctil es aquella capaz de disipar energía a través de la deformación inelástica de los elementos estructurales que la componen; esto quiere decir que una vez que sea sometida a un sismo de magnitud considerable, posiblemente presente fisuras y daños en sus elementos estructurales. En el caso de muros portantes de concreto reforzado, experiencias reportadas en informes de terremotos ocurridos en países con zonas de alta amenaza sísmica, como Chile y Nueva Zelanda, han identificado fallas frágiles, concentradas en los elementos de borde e inestabilidad lateral fuera del plano (Daza Rodríguez & Civil, 2018).

Si esperamos que las estructuras sufran algún tipo de daño en un evento sísmico, es fundamental comprender y analizar el comportamiento no lineal de los elementos que componen este sistema estructural, para garantizar así que se cumpla el fin primordial de

salvaguardar las vidas humanas ante la ocurrencia de un sismo fuerte (AIS, 2010).

Para hacer un análisis no lineal es clave tener conocimiento de la relación momento - curvatura de las secciones que componen los elementos estructurales, con el fin de conocer la ductilidad por curvatura μ_{ϕ} y la capacidad máxima a flexión M_u (Jaramillo & Cortés, 2016). Con el desarrollo de un *software* para la conceptualización del comportamiento no lineal por medio de la obtención de diagramas de momento-curvatura se busca contribuir a la comunidad académica en el estudio del comportamiento inelástico de estructuras, ya que no todos los programas cuentan con un amplio desarrollo de herramientas que permitan identificar en su totalidad los esfuerzos que podrían presentarse en un elemento estructural (Jaramillo & Cortés, 2016).

En lo referente a programas de análisis estructural que permitan obtener los diagramas momento-curvatura se identificaron algunos, como SAP, ETABS, CSI-COL, Robot Estructural, Exacad, DDCgeW3, Cumbia y Xtract; la mayoría con la limitación de ser *softwares* de tipo comercial, con licencias de alto costo; por otro lado, dentro del desarrollo académico específico de este sistema estructural, solamente se presenta un proyecto enfocado en muros estructurales de 20 cm x 120 cm, con diferentes áreas de refuerzo, denominado *Obtención de diagramas momento - curvatura por medio de macros en Excel* (Fabián et al., 2015), aplicando las teorías de diseño por capacidad de Park, Paulay & Priestley para muros de concreto reforzado.

En algunos programas de cálculo estructural se han implementado herramientas que permiten obtener gráficas del comportamiento no lineal de los muros de concreto reforzado, pero la mayoría no son libres, lo que limita su uso por parte de la comunidad de estudiantes. También se identificó que ninguno de estos programas tiene fines educativos, lo que significa que sirven para desarrollar las gráficas de comportamiento, pero sin aportar a la comprensión de los fenómenos que están detrás de esas gráficas.

Este proyecto comprende el desarrollo de una herramienta didáctica y amigable con el usuario, que le facilite comprender el comportamiento inelástico de los muros de concreto reforzado. Adicionalmente, con esta herramienta se pretende contribuir al estudio y el diseño por medio del análisis no lineal de este sistema

estructural, al igual que hacer más atractivo este tema para la comunidad académica en general.

MARCO TEÓRICO

Modelos constitutivos de los materiales

Se requiere definir las curvas esfuerzo-deformación que permitan describir el comportamiento de los materiales.

Concreto reforzado

Se empleó el modelo de Mander et al. (1988) para concreto confinado e inconfinado.

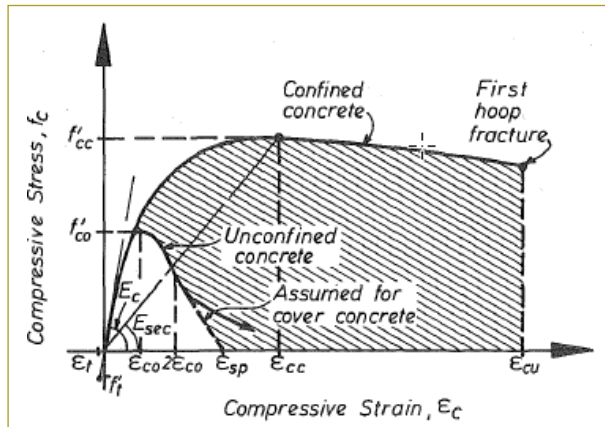


Figura 1. Modelo de esfuerzo-deformación propuesto para la carga monótona de concreto confinado e inconfinado (Mander et al., 1988).

f'_{co} : resistencia a la compresión del concreto inconfinado.

f'_{cc} : resistencia a la compresión del concreto confinado.

ϵ_{co} : deformación unitaria de la máxima resistencia a compresión del concreto confinado.

ϵ_{sp} : deformación unitaria en la que el concreto inconfinado se astilla y no soporta más carga.

ϵ_{cc} : deformación unitaria de la máxima resistencia a la compresión del concreto confinado.

ϵ_{cu} : deformación unitaria máxima del concreto confinado.

E_c : módulo de elasticidad del concreto, de acuerdo con lo indicado en la NSR-10, sección C.8.5.1 (AIS, 2010).

E_{sec} : módulo de elasticidad secante del concreto.

ϵ_t : deformación unitaria de rotura por tracción del concreto.

f'_t : resistencia a la tensión del concreto inconfinado.

Acero

Varilla corrugada de refuerzo

Se emplea el modelo desarrollado por Yun & Gardner (2017).

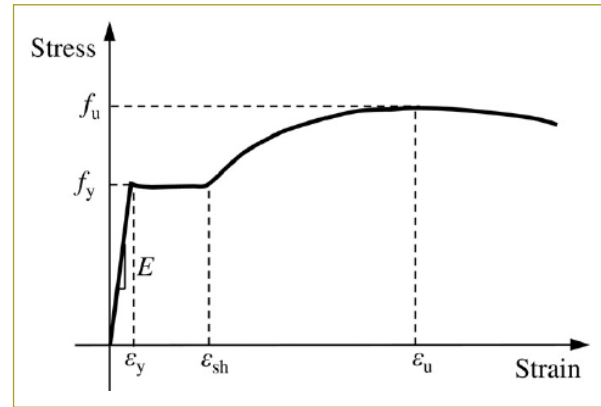


Figura 2. Curva típica de esfuerzo-deformación para acero al carbono laminado en caliente (Yun & Gardner, 2017).

ϵ_u : deformación unitaria máxima del acero.

ϵ_{sh} : deformación unitaria del acero justo antes de iniciar el endurecimiento por deformación.

ϵ_y : deformación unitaria correspondiente al esfuerzo de fluencia del acero.

f_y : esfuerzo de fluencia del acero.

f_u : resistencia última del acero.

E : módulo de elasticidad del acero.

Malla de acero electrosoldada

Se consideró la malla de acero como opción de refuerzo de los muros, empleando el modelo constitutivo definido por Carrillo et al. (2019).

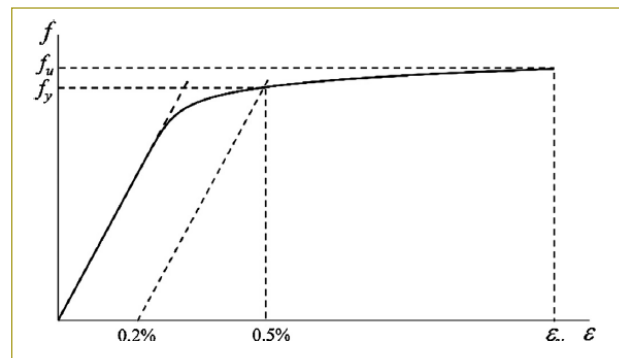


Figura 3. Curva típica de esfuerzo-deformación para acero al carbono laminado en caliente (Carrillo et al., 2019).

ϵ_u : deformación unitaria máxima del acero.
 f : esfuerzo de tensión correspondiente a ϵ .
 f_u : resistencia última del acero.
 E_s : módulo de elasticidad del acero

$$\phi = \frac{M_{cr}}{\epsilon_c * I}$$

METODOLOGÍA

La metodología empleada para el cálculo del diagrama momento-curvatura es la siguiente:

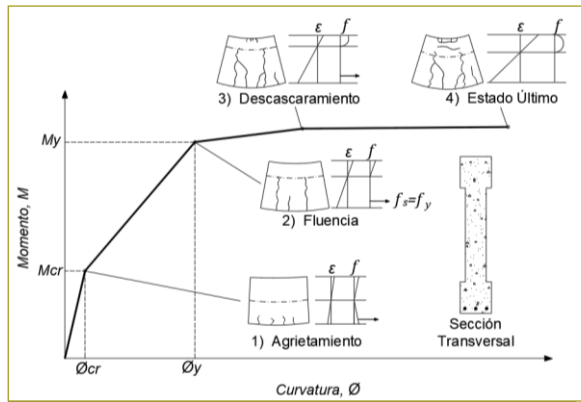


Figura 4. Curva momento-deformación típica.

Punto 1: Agrietamiento

Corresponde al inicio de la fisuración de la fibra más alejada y es determinado por la resistencia máxima a tensión del concreto del recubrimiento

$$E_c = 4700 * \sqrt{f'_c}$$

según C.8.5 NSR-0 (AIS 2010)

$$f_r = 0,62 * \sqrt{f'_c}$$

ecuación C.9-10 NSR-10 (AIS 2010)

$$\epsilon_c = \frac{f_r}{E_c}$$

$$M_{cr} = \frac{f_r * I}{y_t}$$

ecuación C.9-9 NSR-10 (AIS 2010)

$$\phi = \frac{\epsilon_c}{y_t}$$

Donde:

f_r : módulo de ruptura del concreto.
 M_{cr} : momento de fisuración.
 E_c : módulo de elasticidad del concreto.
 ϵ_c : deformación unitaria.
 ϕ : curvatura.
 y_t : fibra en tensión

Punto 2: Fluencia

Determinado por el límite de fluencia alcanzado por el refuerzo en tensión.

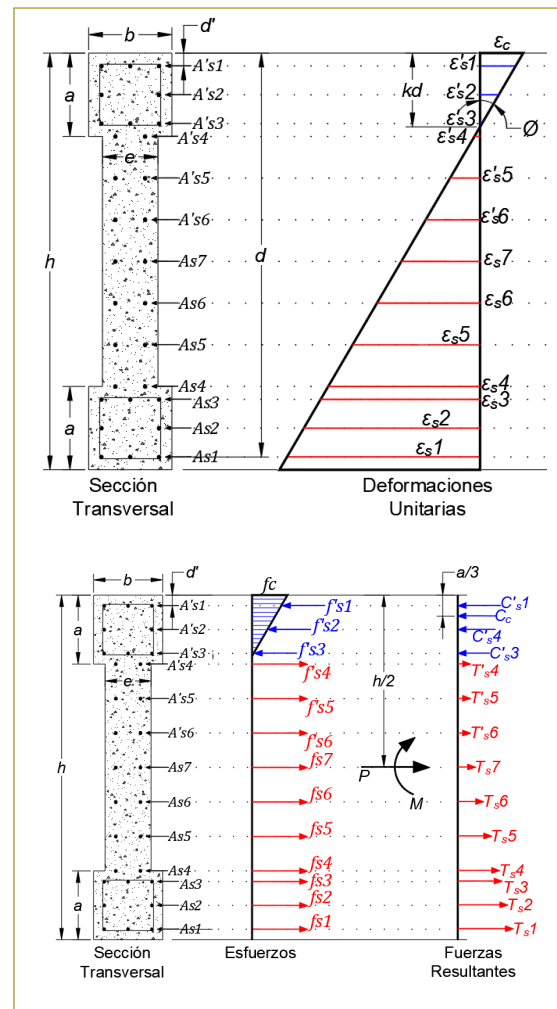


Figura 5. Esfuerzos y deformaciones para secciones lineales agrietadas.

$$\sum \vec{f} = 0 : P + T_s 1 \dots T_s n - C'_s 1 \dots C'_s n - q = 0$$

$$M = P * \frac{h}{2} - C'_s * d' - C_c * \frac{kd}{3} + T_s * d$$

- C_c : fuerza del concreto a compresión.
- C'_s : fuerza del acero de refuerzo en compresión.
- T_s : fuerza del acero de refuerzo en tensión.
- A_s : área de acero de refuerzo en tensión.
- A'_s : área de acero de refuerzo en compresión.
- d' : distancia del borde de la sección al centroide del acero de refuerzo a compresión.
- d : distancia del borde de la sección al centroide del acero de refuerzo a tensión.
- kd : distancia del borde de la sección al eje neutro de la sección.

Finalmente, se obtiene la curvatura.

$$\phi = \frac{\epsilon_c}{kd}$$

Para secciones sin solicitaciones de carga axial, se emplea el método de la sección transformada:

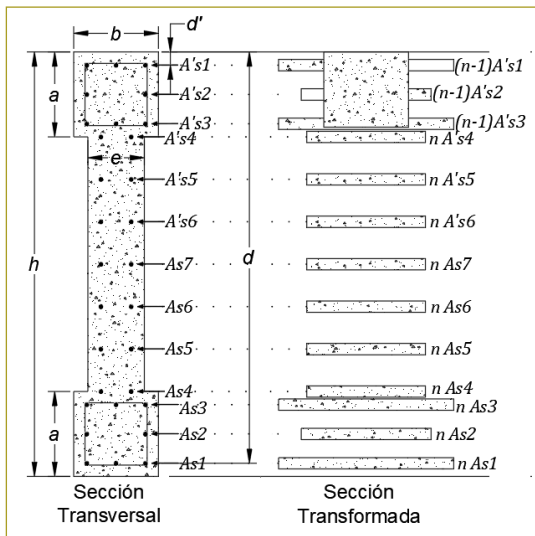


Figura 6. Sección transformada fisurada para el caso de carga axial nula (adaptado de Jack Moehle, 2015).

$$n = \frac{E_s}{E_c}$$

$$I_{cr} = \frac{b(kd)^3}{3} + (n-1) * A'_s 1 * (kd - d')^2 + \dots + (n-1) * A'_s 6 * (kd - d'6)^2 + n * A_s 1 * (d - kd)^2 + \dots + n * A_s 7 * (d - kd7)^2$$

$$M = \frac{1}{n} * \frac{f_y * I_{cr}}{(d - kd)}$$

$$\phi = \frac{M}{E_c * I_{cr}}$$

Punto 3: Descascaramiento

Determinado por el momento en el cual el concreto a compresión del recubrimiento alcanza una deformación unitaria de 0,004 e inicia el descascaramiento.

Para calcular el momento se emplea lo descrito en el punto 2, usando el bloque de compresión en vez de una distribución triangular de esfuerzos en el concreto.

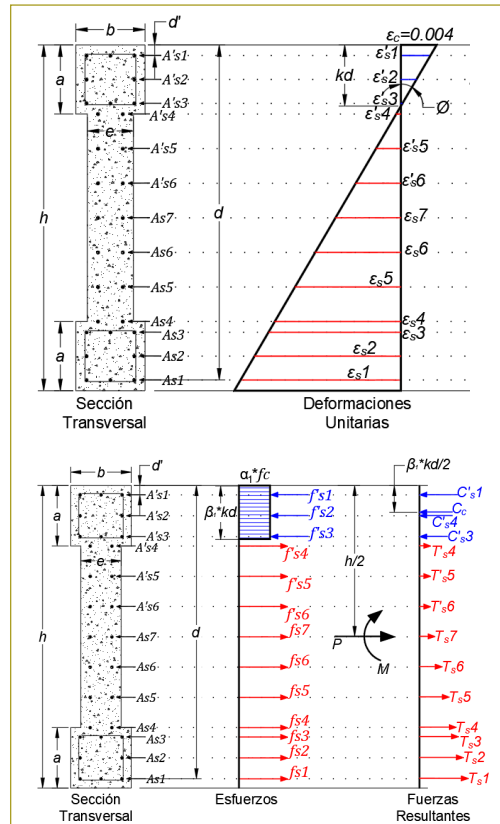


Figura 7. Parámetros del bloque de compresión (adaptado de Jack Moehle, 2015).

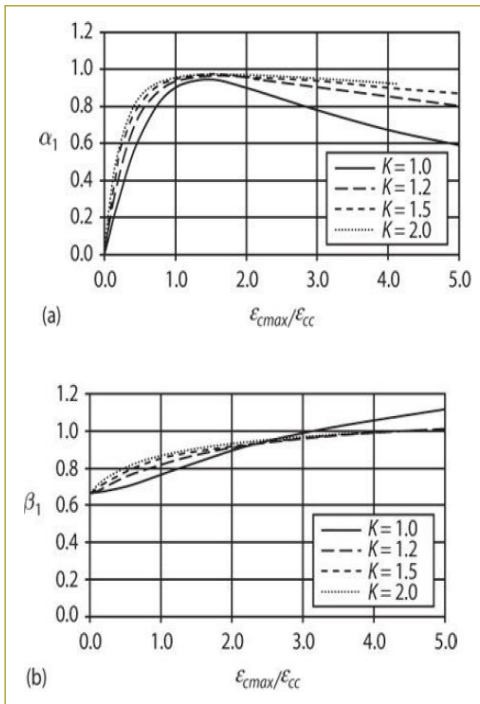


Figura 8. Parámetros α_1 y β_1 del bloque de compresión (adaptado de Jack Moehle, 2015).

$$\sum \vec{f} = 0 : P + T_s - C'_s - C_s = 0$$

$$M = P * \frac{h}{2} - C'_s * d' - C_c * \frac{kd}{2} + T_s * d$$

Punto 4: Último estado de servicio

El cuarto punto del diagrama estará dado cuando se iguale el esfuerzo último de alguno de los materiales que componen la sección, ya sea el núcleo de concreto confinado o el acero por tensión.

$$\sum \vec{f} = 0 : P + T_{s1} + \dots + T_{sn} - C'_s - C_s - C_{cc} = 0$$

$$M = P * \frac{h}{2} - C'_s * d' - C_{cc} * \left(d' - \frac{kd}{2} \right)$$

$$- C_c * \left(\text{centroide} + \frac{kd_{sp}}{2} \right) + T_s * d$$

$$\phi = \frac{\epsilon_c}{kd}$$

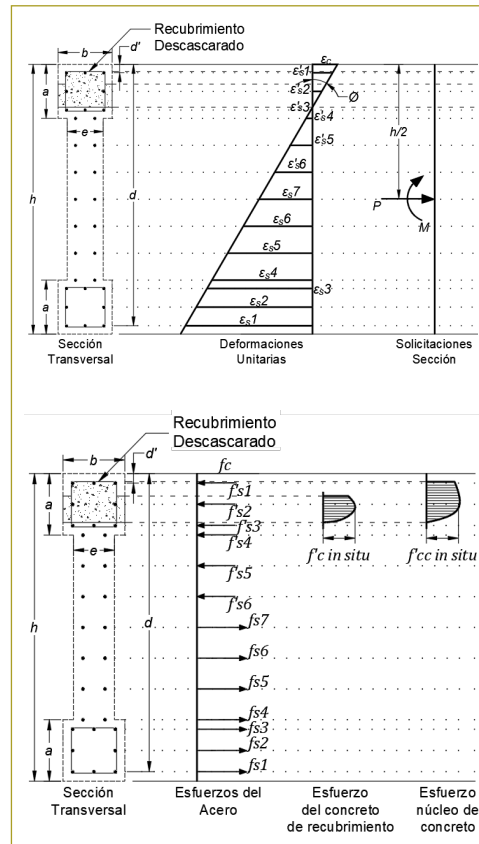


Figura 9. Acciones internas después del descascarado del recubrimiento (adaptado de Jack Moehle, 2015).

RESULTADOS

Para el desarrollo del programa momento-curvatura se empleó el lenguaje de programación Python, en el cual se realizaron el módulo de conceptualización y el módulo de ejecución aplicando la librería de Openseespy para Python (Zhu et al., 2018).

Se hizo la programación para el cálculo de las siguientes configuraciones de muros y tipos de refuerzo:

- Muro no confinado con refuerzo sencillo con malla electrosoldada y también con varillas.
- Muro no confinado reforzado con doble malla electrosoldada o refuerzo doble con varilla.
- Muro confinado con varilla.
- Muro no confinado con refuerzo sencillo con malla electrosoldada y con elementos de borde.
- Muro no confinado con refuerzo doble con malla electrosoldada y con elementos de borde.
- Muro no confinado con refuerzo sencillo con varilla y con elementos de borde.

- Muro no confinado con refuerzo doble con varilla y con elementos de borde.
- Muro confinado con varilla y con elementos de borde.

Módulo de conceptualización. Para el desarrollo del módulo de conceptualización se realizó la programación del método manual construyendo el diagrama momento curvatura con cuatro puntos.

Módulo de ejecución. Para el desarrollo del módulo de ejecución se hizo la programación correspondiente a cada una de las rutinas requeridas para ejecutar la librería para Python de Opensees denominada Openseespy, la cual permite analizar por modelos de fibras.

Adicionalmente, se validó el módulo de ejecución comparando los diagramas con los obtenidos por medio del programa Xtract.

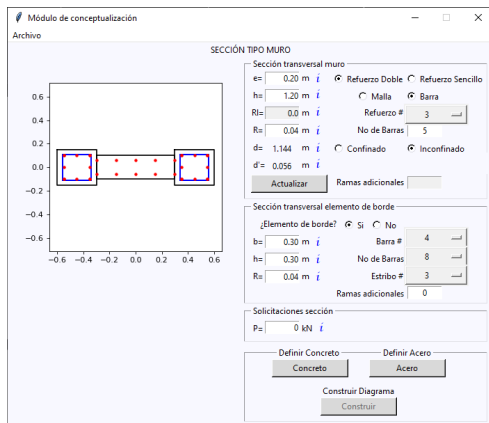


Figura 10. Ventana principal del módulo de conceptualización.

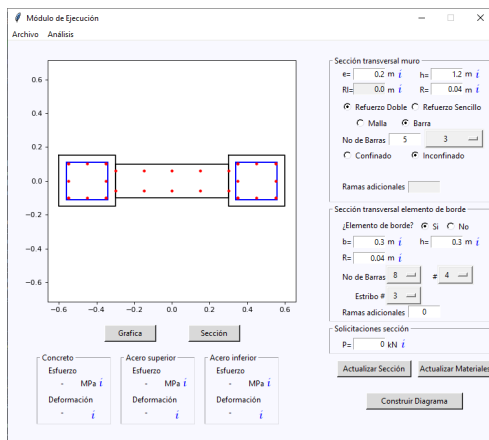


Figura 11. Ventana principal del módulo de ejecución.

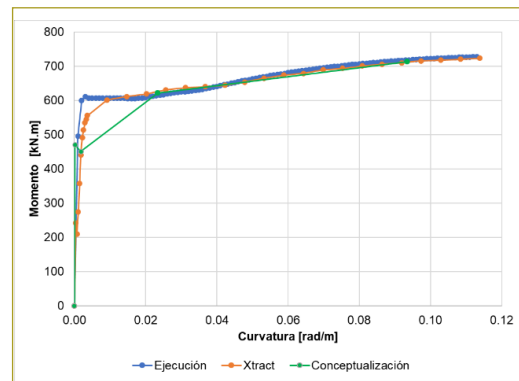


Figura 12. Comparación de diagramas de momento-curvatura, sección de validación 1.

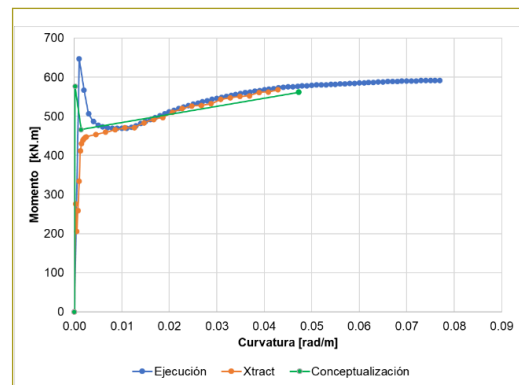


Figura 13. Comparación de diagramas de momento-curvatura, sección de validación 2.

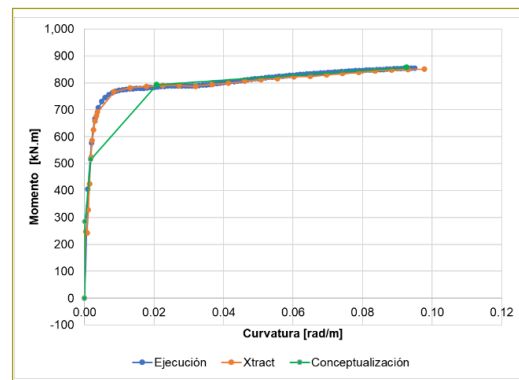


Figura 14. Comparación de diagramas de momento-curvatura, sección de validación 3.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Con esta herramienta se contribuyó al aprendizaje del comportamiento inelástico de las estructuras a través del módulo de conceptualización, que permite verificar los conocimientos por medio de la generación de diagramas por el método manual.

- Este programa proporciona una herramienta de fácil manejo y aplicación para la modelación de diferentes configuraciones geométricas y de refuerzo.
- Se identificó una coincidencia superior al 85 % al comparar los resultados de momento y curvatura obtenidos con el módulo de conceptualización y los calculados por el *software* Xtract.
- Se recomienda continuar con el desarrollo de herramientas que permitan lograr una mejor comprensión del comportamiento no lineal de sistemas de muros portantes, como los muros de mampostería o muros de concreto reforzado acoplados

REFERENCIAS

- AIS, A. C. de I. Sísmica (2010). NSR10. *Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente (NSR-10)*.
- Carrillo, J., Díaz, C., & Arteta, C. A. (2019). Tensile mechanical properties of the electro-welded wire meshes available in Bogotá, Colombia. *Construction and Building Materials*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.096>.
- Correal, J. F. (2016). *Posibilidades de un sismo o terremoto en Colombia*. *Archivo digital de noticias de Colombia y el mundo desde 1990. eltiempo.com*. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16571309>.
- Daza Rodríguez, R., & Civil, M. en I. (2018). *Implementación de modelos de elementos finitos inelásticos para la simulación del comportamiento de muros de concreto reforzado*. <http://man-glar.uninorte.edu.co/jspui/handle/10584/8181?mode=simple>.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda - (CNPV) 2018. En *DANE*. <https://sitios.dane.gov.co/cnpv-presentacion/src/#donde00>.
- Fabián, H., Martínez, R., Andrés, O., & Becerra, Q. (2015). *Obtención del diagrama momento-curvatura en muros de concreto reforzado*. http://biblioteca.upbbga.edu.co/docs/digital_30929.pdf.
- Jaramillo, Y. A., & Cortés, J. S. V. (2016). *Calibración de métodos simplificados existentes para el análisis de muros esbeltos de concreto reforzado*.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988). Theoretical Stress Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1988)114:8(1804)).
- Moehle, J. (2015). *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings* (1st ed.). McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071839440>.
- Montejo, L., & Kowalsky, M. (2007). Cumbia. Set of codes for the analysis of reinforced concrete members. *CFL Technical Rep. N.º IS-07, 1*.
- Sánchez, K. M., & Jerez, S. R. (2018). *Desarrollo de una herramienta computacional para conceptualización y elaboración de diagramas momento-curvatura en secciones de concreto reforzado*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Yun, X., & Gardner, L. (2017). Stress-strain curves for hot-rolled steels. *Journal of Constructional Steel Research*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.01.024>.
- Zhu, M., McKenna, F., & Scott, M. H. (2018). OpenSeesPy: Python library for the OpenSees finite element framework. *SoftwareX*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2017.10.009>.

Evaluación del cambio producido en la temperatura zonal del departamento del Cesar debido a la explotación extensiva de minerales a cielo abierto

Assessment of local temperatura change produced in the department of Cesar as a result of extensive open-pit mining exploitation

JUAN CARLOS MELO LUNA¹ - WILLIAM RICARDO AGUILAR PIÑA²

1. Especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

2. Profesor de la Especialización en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

juan.melo-l@mail.escuelaing.edu.co - william.aguilar@escuelaing.edu.co

Recibido: 31/07/2021 Aceptado: 01/09/2021

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

La explotación de minerales a cielo abierto en Colombia ha venido creciendo desde los años ochenta, generando diversos impactos ambientales y contribuyendo al cambio climático. Este trabajo tiene como fin evaluar la incidencia de la minería extensiva a cielo abierto en el comportamiento histórico de la temperatura en el departamento del Cesar, por medio del estudio de datos históricos de estaciones climatológicas terrestres para el periodo comprendido entre 1981 y 2019, incluyendo como variable principal la temperatura y variables secundarias como la altitud, brillo solar, latitud, humedad relativa, punto de rocío e información geográfica del departamento y su zona circundante. Además, mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG) y a través de la herramienta Model Builder de ArcGIS® versión 10.5, se creó un modelo de análisis y pronóstico hasta el año 2100 que genera diferentes salidas gráficas y comparaciones.

Si bien no existe la total evidencia de que el aumento de la temperatura en el departamento del Cesar se deba principalmente a los procesos de minería relacionada con carbón, sí hay algunos elementos que muestran

una posible relación entre la minería y el cambio climático, ya que las zonas aledañas a los títulos mineros son las de mayor aumento en la temperatura; sin embargo, no se puede afirmar de manera concluyente que este fenómeno sea principalmente a consecuencia de la minería, puesto que existen fenómenos que pueden también contribuir al calentamiento zonal, como el crecimiento demográfico, la producción industrial y la deforestación.

Palabras claves: ArcGIS, temperatura, minería, modelamiento, sistemas de información geográfica (SIG).

Abstract

The open-pit mining of minerals in Colombia has been growing since the 1980s, generating various environmental impacts and contributing to climate change. This study aims to evaluate the impact of extensive open-pit mining on the historical temperature patterns in the Cesar department through the analysis of historical data from terrestrial weather stations for the period between 1981 and 2019. The main variable considered is temperature, while secondary variables include

altitude, solar brightness, latitude, relative humidity, dew point, and geographical information of the department and its surrounding area. Using Geographic Information Systems (GIS) and the Model Builder tool of ArcGIS® version 10.5, an analysis and forecasting model was created until the year 2100, generating various graphical outputs and comparisons. While there is no conclusive evidence that the temperature increase in the Cesar department is primarily due to coal-related mining processes, there are some elements that suggest a possible relationship between mining and climate change. The areas adjacent to mining sites show the highest temperature increases. However, it cannot be conclusively stated that this phenomenon is primarily a result of mining, as other factors such as population growth, industrial production, and deforestation can also contribute to regional warming.

Keywords: ArcGIS, temperature, mining, modelling, Geographic Information Systems (GIS)

ANTECEDENTES

El clima de la Tierra está controlado por la radiación solar que ingresa al planeta. La tierra intercepta los rayos solares, los que al atravesar la atmósfera sufren un proceso de debilitamiento (difusión, reflexión y absorción). Desde la superficie, el calor se transfiere mediante diversos mecanismos a la atmósfera, donde algunos gases componentes del aire como el dióxido de carbono y el metano, retienen parte de esta energía de onda larga que la superficie emite hacia el espacio, manteniéndola en la atmósfera, constituyendo así el efecto invernadero. Algunos de estos gases ya emitidos permanecerán actuando en la atmósfera, algunos hasta por espacio de cien años (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], 2018, p. 12).

La interacción del ser humano con el planeta a lo largo de los años ha sido la principal característica que ha generado cambios representativos, cuyos acontecimientos no se consideran precisamente naturales: la deforestación, el inadecuado uso de los recursos naturales, la exploración y explotación extensiva e intensiva de los minerales, así como la intervención de los ecosistemas, han producido un cambio drástico en la estructura física, química y biológica de los entornos.

La industria del carbón ha formado parte de la economía colombiana. La Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) reporta una producción nacional de este mineral de 1,12 millones de toneladas al año desde 1940, pero se estima que estas explotaciones empezaron desde comienzos del siglo XX, lo que demuestra que el carbón ha sido parte del desarrollo económico del país desde tiempo atrás (Arias, 2015).

El territorio del Cesar posee un gran potencial de extracción de minerales a cielo abierto, especialmente de carbón; cuenta con 1.878.210 hectáreas disponibles, de las cuales 496.318 hectáreas están concesionadas por títulos. Este panorama genera un gran desarrollo económico para la región, proporcional al riesgo ambiental, debido a que este tipo de explotación minera ha incrementado la presión sobre los recursos naturales, a causa de los altos niveles de contaminación por la liberación de residuos tóxicos durante la extracción y transporte del carbón, presentando cambios y alteraciones al ecosistema y al clima (Perdomo et al., 2010, p. 3).

En este artículo se hace una recopilación de datos de temperatura desde el año 1980 hasta el 2016, obtenidos de 19 estaciones climatológicas del departamento del Cesar; a través de la revisión documental y análisis de información obtenida, se construyó un modelo de predicción con la herramienta Model Builder del *software* ArcGIS®, que permitan generar mapas a años futuros y con ello tomar decisiones que permitan mitigar los efectos negativos de la minería en el territorio cesarense.

FENÓMENOS CLIMÁTICOS

De acuerdo con Montealegre (2007), el ciclo conocido como Niño - Oscilación del Sur (ENOS) es la causa de la mayor señal de variabilidad climática en la franja tropical del océano Pacífico, debido a la variación interanual del campo de presión atmosférica cerca de la superficie, en la región del Pacífico centro-occidental. Los fenómenos del ciclo ENOS son el resultado de la interacción entre el océano y la atmósfera, pues su ocurrencia produce fuertes perturbaciones sobre la circulación atmosférica global y sus efectos climatológicos tienen dramáticas implicaciones socioeconómicas y ambientales en casi todo el planeta (p. 6).

En razón de su localización geográfica, Colombia recibe la influencia directa de los procesos que se suscitan en el sistema acoplado océano-atmósfera del Pacífico tropical, asociados al ciclo ENOS. Se ha podido establecer claramente que la intensidad de los fenómenos Niño y Niña están en función directa con la magnitud de las anomalías registradas en la temperatura superficial y subsuperficial del océano, y con el área cubierta por estas. La influencia de dicha intensidad no es lineal y puede ser diferente de la magnitud del efecto climáti-

co y del impacto producido por los fenómenos de las actividades humanas (Montealegre, 2007).

EFFECTOS AMBIENTALES POR LA MINERÍA EN EL CESAR

La extracción, el transporte y la exportación de carbón se han desplegado en forma avasalladora sobre el departamento del Cesar a través del establecimiento de amplias minas a cielo abierto, extensas vías férreas y tecnificados puertos de embarque. En 2015, la explotación minera ocupaba un poco más del 14 % del área total de este departamento, lo que, junto a múltiples operaciones industriales relacionadas, amenaza con destruir el entorno de miles de personas y especies naturales (Minminas, 2016).

Una de las zonas más afectadas ha sido Boquerón (La Jagua de Ibirico), donde sus pobladores basan su economía en actividades productivas ancestrales, como la pesca, la caza, la pequeña ganadería y la agricultura. Sin embargo, en los últimos 20 años se han visto obligados a transformar sus territorios debido a los efectos ambientales de esta industria a causa de la llegada de la minería de carbón a gran escala (Ascencio et al., 2015, pp. 109-112).

Otro factor de atención es la calidad del aire, la cual ha sido una de las más afectadas por la extracción y el transporte de carbón, debido a que pequeñas partículas del mineral son emitidas a la atmósfera y los contaminantes son transportados y contenidos en el aire, se diluyen y son sujetos a cambios físicos y químicos, lo que puede causar serios efectos en la salud de las personas, agua, vida silvestre y en el clima.

El recurso hídrico también se ha visto afectado, dado que se estima que las compañías carboníferas emplean aproximadamente seis millones de metros cúbicos al año; informes científicos apuntan a que el cambio climático y las explotaciones mineras disminuirán la disponibilidad del agua en el futuro porque estos reducen la oferta del recurso hídrico mediante mecanismos como el aumento de la temperatura, la modificación del régimen de lluvias, el elevado consumo de agua para el proceso de extracción y la acidez de las aguas utilizadas y resultantes en la actividad minera.

La explotación carbonífera, así como afecta al aire y al agua, también impacta en el suelo y el paisaje, lo cual se traduce en la transformación de zonas donde antes se desarrollaban actividades productivas; esto puede generar pérdidas irreversibles del recurso suelo y de

la capa vegetal, que contiene una importancia mineral para mantener sus características y calidad, de acuerdo con las necesidades de la población (Ascencio et al., 2015, pp. 112-145).

ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA HISTÓRICA EN EL DEPARTAMENTO DEL CESAR

En razón de que el objetivo de este artículo es evidenciar la incidencia de la minería intensiva en el aumento de la temperatura en el Cesar, se analizó el comportamiento promedio de la temperatura en dos periodos, 1980-1999 y 2000-2016, ya que los procesos de extracción intensiva se iniciaron hacia los años dos mil, con la llegada de la minería de carbón a gran escala. Con dicho análisis se busca verificar si había ocurrido un aumento significativo en la tasa de crecimiento de la temperatura como consecuencia entre otros procesos, de la extracción minera. A continuación, se observa el promedio de temperatura para cada estación en los dos periodos previamente referidos (figura 1).

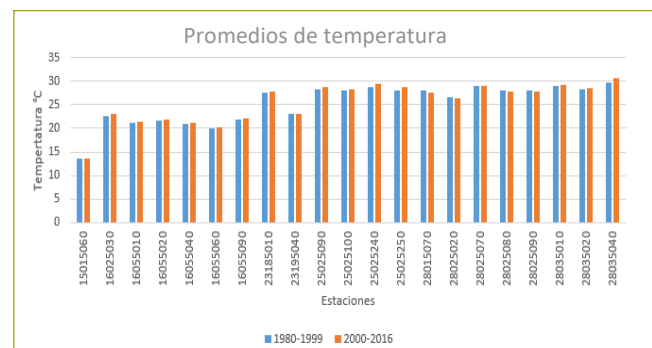


Figura 1. Promedio de temperatura en los periodos 1980-1999 y 2000-2016.

Como se puede observar, un gran número de estaciones han presentado aumento en la temperatura en el segundo periodo evaluado con respecto al primero.

Para entender la tendencia de la temperatura a escala regional se generaron las siguientes figuras, en las cuales se observa el comportamiento de la temperatura zonal para los periodos 1980-1999 y 2000-2016.

De acuerdo con esto, se observa que existe un crecimiento en la tasa de la temperatura en el segundo periodo analizado; al generar la ecuación lineal de la recta en las figuras, se evidencia que la pendiente de la recta es mayor en el segundo periodo (2000-2016). A partir de este parámetro se pueden tener indicios que

permiten suponer que existe una presunta relación entre la minería y el aumento de la temperatura en el departamento (figura 2).

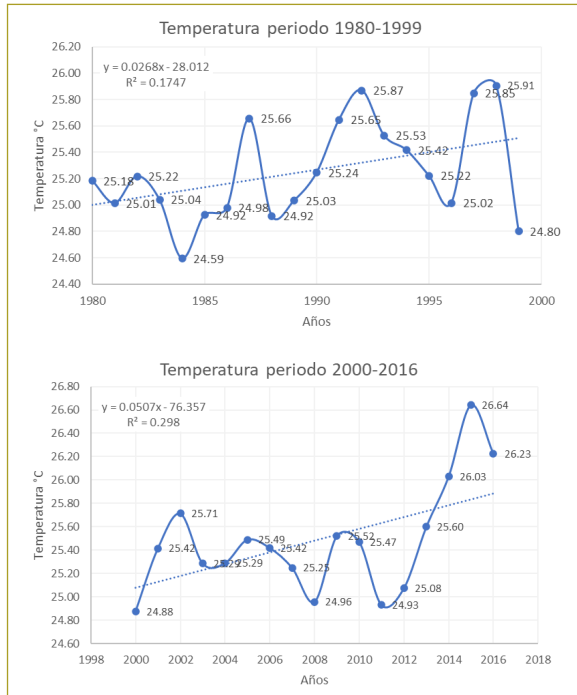


Figura 2. Comportamiento de la temperatura zonal (periodos 1980-1999 y 2000- 2016).

A renglón seguido se presenta una proyección de la temperatura en el tiempo, teniendo en cuenta la tendencia de cada uno de los periodos (tabla 1 y figura 3).

Tabla 1

Temperaturas proyectadas (periodos 1980-1999 y 2000-2016)

Año	Temperatura proyectada con tasa de aumento periodo 1980-1999, °C	Temperatura proyectada con tasa de aumento periodo 2000-2016, °C	Diferencia °C
2020	26,124	26,057	-0,067
2030	26,392	26,564	0,172
2040	26,66	27,071	0,411
2050	26,928	27,578	0,65
2060	27,196	28,085	0,889
2070	27,464	28,592	1,128
2080	27,732	29,099	1,367
2090	28	29,606	1,606
2100	28,268	30,113	1,845

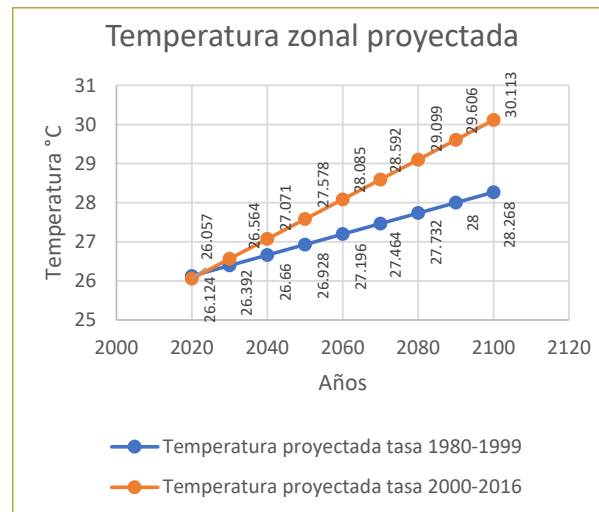


Figura 3. Temperatura zonal proyectada.

PROYECCIÓN DE TEMPERATURA EN EL DEPARTAMENTO DEL CESAR

A través de una regresión lineal múltiple, se calculó el valor de temperatura (variable dependiente) en función de las variables independientes (año proyectado, brillo solar, humedad relativa y temperatura de rocío) para cada mes y para cada estación climatológica terrestre; se manejaron dos tipos de datos: los conocidos en el tiempo, los cuales fueron las variables independientes y un dato incógnito, en este caso, la temperatura.

En este sentido, es importante mencionar que se decidió utilizar este tipo de regresión, ya que evalúa el efecto de cada predictor en presencia del resto, evitando el fenómeno de confusión, el cual puede aparecer cuando la asociación observada entre un predictor y la variable respuesta se explica por otra variable (factor de confusión) de manera total o parcial.

La ecuación general para calcular la temperatura en grados centígrados fue la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Temperatura del año proyectado} = & \text{intersección} + \\ & (\text{variable } x1 * \text{año proyectado}) + \\ & (\text{variable } x2 * \text{brillo solar}^{**}) + (\text{variable } x3 * \\ & \text{humedad relativa}^{**}) + \\ & (\text{variable } x4 * \text{temperatura de rocío}^{**}) \end{aligned}$$

DESARROLLO DEL MODELO CLIMATOLÓGICO

Conforme a lo planteado para el desarrollo de este artículo, se utilizó la herramienta Model Builder del *software*

ArcGIS, con el fin de estructurar un modelo que, en términos generales, tome una capa base (estaciones) y estime la proyección de temperatura de acuerdo con el parámetro establecido como “año” (2021-2100), el cual lo definirá el usuario que requiera evaluar la variabilidad de temperatura. Así mismo, se debe establecer el tipo de fenómeno climatológico al momento de ejecutar la herramienta (compuesto, neutro, Niña, Niño).

Para usar el modelo con el propósito de calcular la variabilidad en la temperatura de años futuros, se utilizan los factores obtenidos a partir de las correlaciones lineales múltiples de las variables descritas en los capítulos anteriores del documento. Dichos procedimientos se hacen de manera individual para cada estación dentro de la zona de estudio, para finalmente realizar una interpolación que permita generar un mapa de temperatura zonal del departamento del Cesar, de acuerdo con los parámetros establecidos por el usuario.

Adicionalmente, se genera de manera automática una comparación entre un año pasado (1980-2016) que contraste el resultado de la proyección de temperatura, permitiendo hacer la comparación y visualización de las zonas críticas en las cuales se ha presentado una variación representativa de la temperatura a escala regional. Este análisis es posible a partir de la generación de un mapa de temperatura histórico, de acuerdo con el año definido por el usuario como un parámetro; se hace entonces una asociación individual con respecto a cada estación, lo que permite realizar una extrapolación de manera tal, que se genera el mapa histórico para el año definido.

Es importante mencionar que para hacer un análisis válido entre el mapa de temperatura histórico y el mapa de temperatura futuro, se requiere que los fenómenos para los años de análisis sean los mismos (compuestos, neutro, Niña, Niño).

Ejecución del modelo

Para la ejecución del modelo propuesto se deben ingresar seis parámetros, con los cuales se definirá el resultado que se busca obtener; entre estos se encuentran el año de la proyección, fenómeno climatológico y año histórico con el que se quiere hacer la comparación del cambio climático. A renglón seguido se describen algunas de las variables requeridas para la ejecución de la herramienta.

- **Año proyectado:** Es un campo de tipo numérico en el cual se debe indicar el año al cual se quiere proyectar la temperatura.
- **Mes:** Es un campo de tipo numérico en el cual se debe indicar el mes al que se quiere proyectar la temperatura.
- **Variables proyectadas:** Corresponde a tablas en formato con extensión dbase file (.dbf) que contiene las variables (humedad, punto de rocío, brillo solar) proyectadas al periodo máximo de ejecución del modelo (2100), clasificadas según el fenómeno climatológico que se desee evaluar (compuesto, neutro, Niño, Niña).

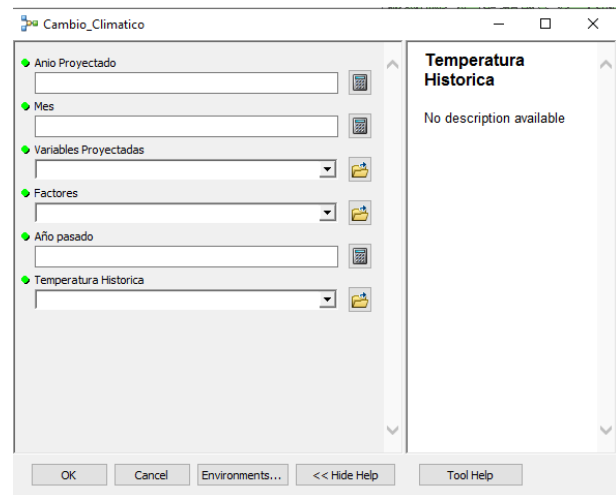


Figura 4. Temperatura histórica.

Resultados de la proyección

Al final de la ejecución del modelo se genera una capa con la variación de la temperatura entre el año de referencia y el año futuro, definidos en el momento de la ejecución del modelo, y la temperatura proyectada para el periodo seleccionado.

En la siguiente tabla (tabla 2), se muestran los resultados de las proyecciones climatológicas hasta el año 2100, analizando los compuestos de manera individual y de acuerdo con el escenario climatológico.

Igualmente, se observa que, a medida que la proyección se acerca al 2100, se acentúan más los cambios entre los regímenes (siendo el año Niño el de mayor incremento y el año Niña el de menor incremento) (figura 5 y 6).

Tabla 2
Temperaturas diferentes (escenarios 2030-2100)

Año	Promedio año Niño	Promedio año Niña	Promedio año neutro	Promedio cambio año compuesto
2030	0,550	0,471	0,344	0,296
2040	0,696	0,536	0,520	0,391
2050	0,860	0,606	0,678	0,542
2060	1,046	0,683	0,667	0,647
2070	1,226	0,766	0,837	0,791
2080	1,454	0,856	1,015	0,941
2090	1,597	0,951	1,201	1,095
2100	1,786	1,049	1,393	1,253

Tabla 3

Temperatura base + promedio incremento anual

Año	Promedio cambio año Niño	Promedio año Niña	Promedio cambio año neutro	Promedio cambio año compuesto
2030	28,663	26,878	27,614	27,566
2040	28,809	26,942	27,790	27,661
2050	28,972	27,012	27,948	27,811
2060	29,158	27,089	27,937	27,917
2070	29,338	27,173	28,107	28,061
2080	29,566	27,262	28,285	28,211
2090	29,710	27,357	28,471	28,365
2100	29,899	27,456	28,663	28,523

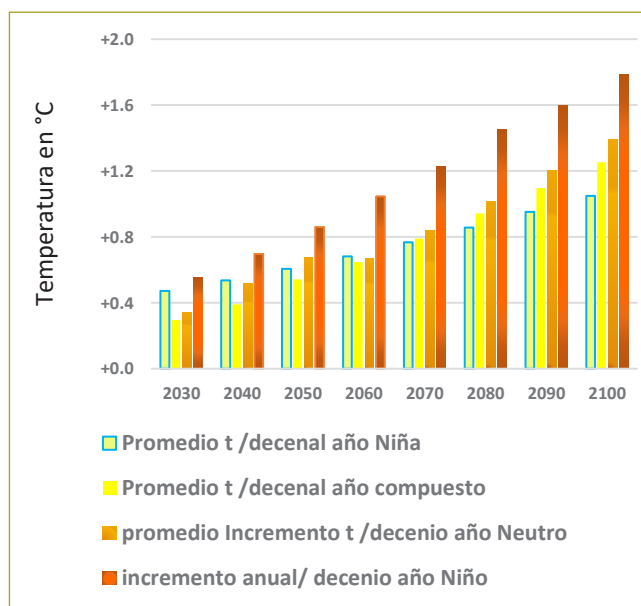


Figura 5. Promedio de incremento de la temperatura anual en los diferentes escenarios

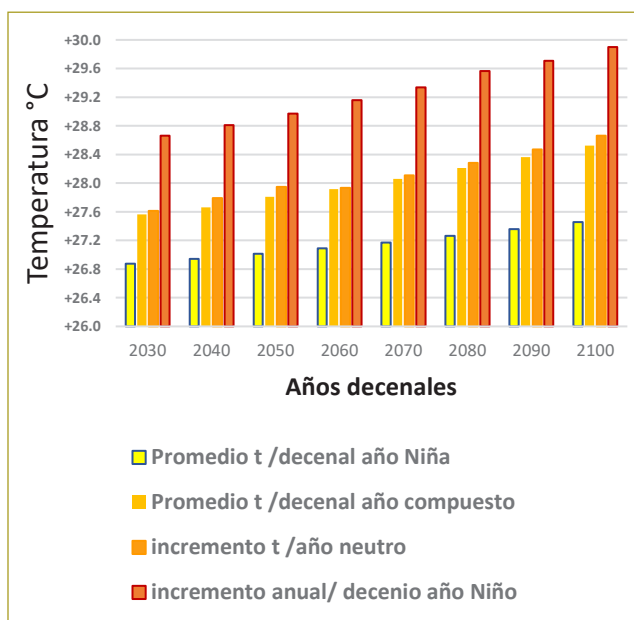


Figura 6. Promedio de incremento de la temperatura anual en diferentes escenarios (promedio temperatura base).

Teniendo en cuenta la temperatura base y el incremento de temperatura que se espera para cada año, se prevén los siguientes promedios anuales (figura 6).

Adicionalmente, según las proyecciones hechas, se generó la siguiente gráfica, en la cual se puede observar el comportamiento de la temperatura para cada uno de los meses, de acuerdo con los cuatro fenómenos climáticos utilizados para el estudio (figura 7).

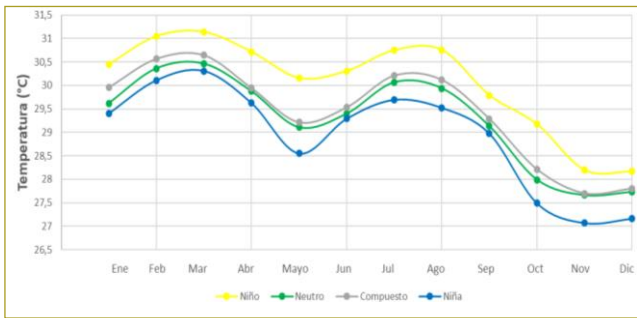


Figura 7. Temperatura promedio mensual proyectada para el año 2100.

Temperatura en mapas

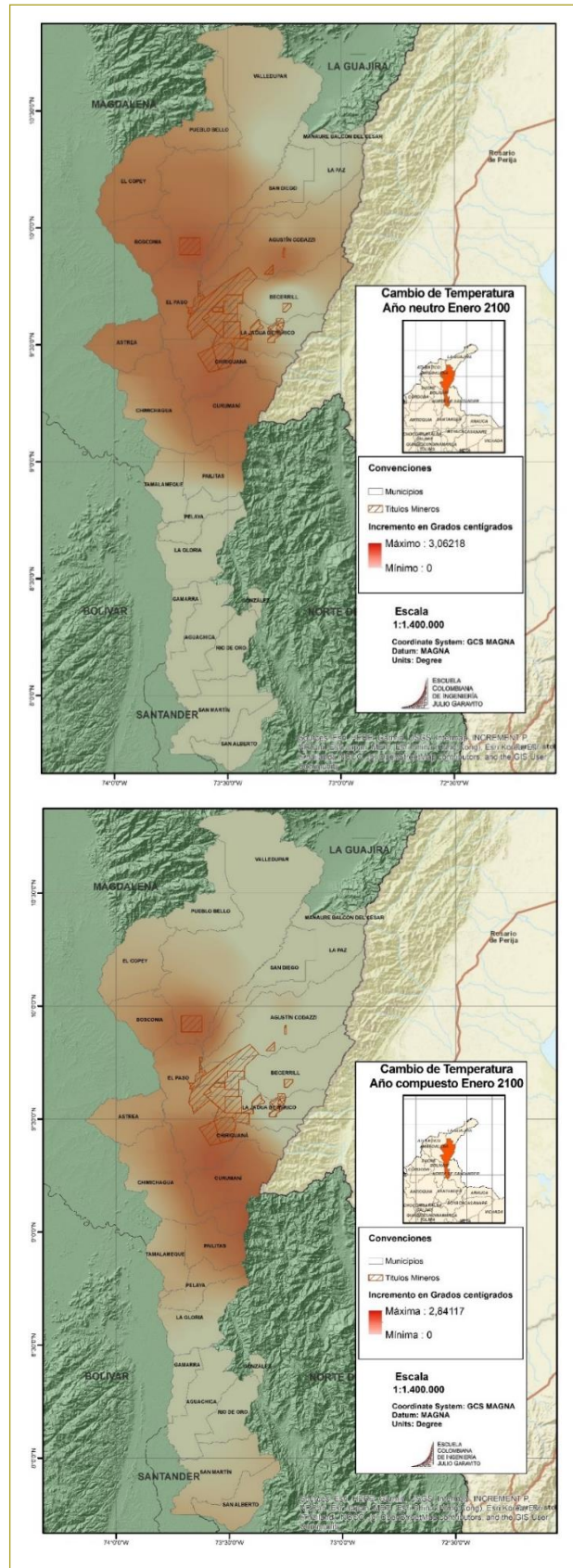
Es importante mencionar que para ejecutar la modelación se tomó como base el último año, según el escenario climatológico por analizar, dado que desde finales de los años noventa se potenció la extracción minera a cielo abierto en el departamento. La selección del año final fue 2100, para los cálculos que efectuaba el modelo. Se estima que por políticas y acuerdos macro en relación con la mitigación del cambio climático, las prácticas de extracción minera y uso del carbón empezarán a decrecer entre 2030 y 2050.

En cuanto a los meses seleccionados para la modelación, se encontró que de acuerdo con los datos de temperatura históricos reportados por el Ideam, marzo es el mes con mayor registro de temperatura, octubre registró temperaturas consideradas “frescas” y enero se caracteriza por ser un mes de transición debido a sus temperaturas medias. Según lo previamente descrito, se seleccionarán estos tres meses para efectuar el análisis.

En este artículo se presentan los mapas del cambio climático proyectado para el mes de enero del 2100 para los años neutro y compuesto, en los cuales se observa claramente que las regiones con mayor aumento de temperatura coinciden con las zonas de títulos mineros del departamento.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con respecto al análisis efectuado se observó que, en términos generales, las zonas que registraron aumento de temperatura coinciden parcialmente con las zonas de explotación minera, lo cual es un factor relevante que permite determinar si el incremento de esta corresponde a fenómenos producidos por la explotación de carbón y de otro tipo de minerales.



Adicionalmente, vale la pena mencionar que, en un alto porcentaje, las zonas aledañas a los títulos mineros de carbón son las regiones que presentan calentamiento crítico en la zona, y con la segmentación hecha entre los dos periodos analizados (1980-1999 y 2000-2016) se puede encontrar que existen indicios que permiten suponer que se encuentra una relación entre los fenómenos de calentamiento zonal y la minería.

En caso de que esta proyección se cumpla, la región deberá enfrentar desafíos ambientales de gran importancia, incluyendo sequías y cambios en el uso del suelo, que además impactará directamente a la población, así como a los ecosistemas presentes en el área de estudio.

En cuanto a la simulación realizada sobre los años de tipo Niño, al igual que en el análisis hecho con los años neutros, se evidencia un incremento en la temperatura mayor en estos tipos de años que en años de tipo Niña o compuestos.

Con respecto a los resultados relacionados con el aumento de temperatura en la zona norte del departamento, es posible presentarlos debido a que los procesos exógenos pueden ser determinantes en los cambios ambientales de una región, es decir, la temperatura de esta zona del departamento puede verse afectada por procesos extractivos de regiones cercanas; un ejemplo específico es el departamento de La Guajira, el cual es considerado como una fuente de alta explotación minera.

Entre los resultados se encuentra la correlación existente entre los datos obtenidos del modelo predictivo planteado y los datos obtenidos en Excel de las proyecciones futuras planteadas hasta el año 2100.

Por último, cabe anotar que el modelo resulta ser una herramienta clave, que, de acuerdo con sus resultados, permite tomar decisiones importantes frente a la prevención del aumento de temperatura en la región y en el país, contribuyendo así al trabajo mundial que se está realizando para minimizar los impactos negativos a causa de estos problemas relacionados con el cambio climático.

Un ejemplo claro de esto son los resultados obtenidos en cada simulación realizada, ya que se identificó que hay un aumento de la temperatura en la región, que podría terminar convirtiéndose en un fenómeno constante y evidente. Dichos resultados son aportes que se podrán tener en cuenta para adoptar medidas de control a los procesos de extracción de minerales, y

mejorar los controles de operación y de emisión, teniendo en cuenta que los efectos ambientales pueden resultar irreversibles.

CONCLUSIONES

Si bien no hay total evidencia de que el incremento de la temperatura en el departamento del Cesar se deba especialmente a los procesos de minería relacionada con carbón, sí existen algunos elementos que muestran una posible relación entre la minería y el cambio climático, ya que las zonas aledañas a los títulos mineros son las de mayor aumento de temperatura; no obstante, no se puede afirmar de un modo concluyente que este fenómeno sea principalmente a consecuencia de la minería, pues existen fenómenos que pueden también contribuir al calentamiento zonal, como el crecimiento demográfico, la producción industrial y la deforestación.

De acuerdo con los datos históricos utilizados para la generación de los modelos predictivos, se ha hallado que la temperatura en el Cesar muestra una tendencia hacia el aumento y que esta tendencia ha ido creciendo con el paso de los años.

El aumento de la temperatura en este departamento es un fenómeno que requiere atención y acción para la prevención y mitigación frente al cambio climático, al tiempo que es un llamado de atención para establecer medidas de adaptación, de manera que se logren disminuir los impactos negativos de tipo ambiental y social derivados.

Las tecnologías SIG son herramientas fundamentales para la toma de decisiones de tipo ambiental, a partir de la asociación de datos históricos a datos geográficos. Sin embargo, para poder hacer análisis totalmente asertivos, es imperativo depurar la información para tener datos de calidad y, por ende, una visión más clara con referencia a los temas evaluados.

Las carencias en cuanto a la construcción y disposición de información temática a escala nacional no permiten la utilización efectiva de las tecnologías existentes para realizar modelos predictivos que permitan la toma de decisiones de tipo ambiental.

REFERENCIAS

Ascencio, D., Lizarazo, R., Gómez, J y Bobadilla, A. (2015). *El carbón de Colombia ¿Quién gana y quién pierde?* Centro de

Estudios para la justicia social (Tierra Digna) [en línea]. Disponible en: <https://tierradigna.org/pdfs/informe-carbon.pdf>.

Ávila, A. (2014). *Diseño de un SIG para la ubicación óptima de una instalación minera* [en línea]. Trabajo de grado para el Máster en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. España: Universidad de Oviedo. Disponible en https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/28185/TFM_Avila_DelCampo.pdf?sequence=3.

Cuesta, M., Jiménez, M., Rodríguez, L., Ballesteros, D., Meléndez, M., Martos, E. y García, J. (2010). Uso de la geomorfología y el SIG para caracterizar el impacto de actividades mineras en zonas kársticas: el entorno de la cueva de Las Herrerías (Asturias, España) [en línea]. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/235978940_Uso_de_la_geomorfologia_y_el_SIG_para_caracterizar_el_impacto_de_actividades_mineras_en_zonas_karsticas_el_entorno_de_la_cueva_de_Las_Herrerias_Asturias_Espana.

Delgado, J. (2011). *Propuesta metodológica para el desarrollo de SIG mineros en Colombia*. Universidad de Manizales [en línea]. (2011). Disponible en [revistasum.umanizales.edu.co › ojs › article › download](http://revistasum.umanizales.edu.co/ojs/article/download).

González, K., y Pedraza, Y. (2020). *Sistema de información geográfica de lugares de explotación minera a cielo abierto cercanos a la ciudad de Tunja, Boyacá* [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero civil. Bogotá: Universidad Santo Tomás. Disponible en <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/30346/2020karengonzalez.pdf?sequence=1&isAllowed=y8>.

Ministerio de Minas y Energía (2016). *Política minera de Colombia*. MinMinas [en línea]. <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/698204/Pol%C3%ADtica+Minera+de+Colombia+final.pdf/c7b3fcad-76da-41ca-8b11-2b82c0671320>.

Ministerio de Minas y Energía (2015). *La cadena del carbón en Colombia*. MinMinas [en línea]. Disponible en https://www.upme.gov.co/Docs/Cadena_carbon.pdf.

Noriega, R., y Fernández, J. (2014). Utilidad de las herramientas SIG en la modelización hidrogeológica de minas subterráneas [en línea]. https://www.researchgate.net/publication/281646654_Utilidad_de_las_herramientas_SIG_en_la_modelizacion_hidrogeologica_de_minas_subterraneeas_Utility_of_GIS_tools_in_hydrogeological_modeling_of_underground_mines.

Un libro de historia para el tiempo presente

A history book for the present

JOSÉ CAMILO VÁSQUEZ CARO

Director del Departamento de Humanidades e Idiomas de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

jose.vasquez@escuelaing.edu.co

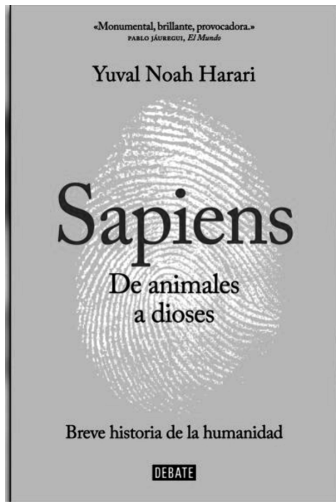
Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

La primera vez que leí *De animales a dioses: breve historia de la humanidad*, de Yuval Noah Harari, lo devoré en pocos días. Experimenté la misma fascinación que siento al leer una buena novela policiaca. He de confesar que me encanta este género de novelas porque me atrapa en sus narrativas y misterios, y siempre quiero pasar la página para saber más. Sin embargo, la obra de Harari no pretende ser –ni es– literatura ni ficción. Fue una grata sorpresa para este lector que tuviera el efecto de un buen *page turner*, expresión en inglés que evoca la captura del lector por parte de un libro y su deseo de seguir leyendo y pasando páginas. En mi opinión, el libro está bien escrito y su historia está bien narrada. El autor va hilando muchos problemas, visiones del pasado, y proponiendo soluciones y respuestas a grandes preguntas y enigmas de la humanidad.

Si nos detenemos un segundo y miramos en detalle su título, este libro se autodenomina de historia. Específicamente, propone una breve historia de la humanidad.

Acá hay una sutileza que es importante resaltar. Por un lado, el título evoca una historia del todo humano, y por otro, propone ser breve. Es, entonces, un libro de historia no especializado, no se enfoca en una región o en un periodo de tiempo en particular. El evocar la humanidad le da cierto aire general a su propósito. Me atrevo a decir que está pensado para todo tipo de lectores. Si uno abre el libro y lee cualquier página, se podrá dar cuenta de que su escritura es amigable y su contenido, muy accesible. Está pensado para una reproducción masiva y para un público amplio, que no se limita a una sola disciplina o un solo campo del conocimiento.

La historia que concibe Harari es interdisciplinaria e integral. Los enfoques y problemas se entrelazan en la narración misma. La historia como disciplina tiene cierta amplitud, pues se permite elementos que entren en las coordenadas del tiempo y el espacio. El horizonte que propone abordar Harari es ambicioso, pese a que dice querer ser breve. Él busca entender grandes cambios y,



desde ahí, comprender grandes temas de la humanidad en un tiempo de muy larga duración.

El libro puede ser criticado al tener rasgos demasiado generalistas. En nuestro contexto, tendemos a pensar que la especialización siempre es mejor, a su vez la especialización es paradójica, dado que fragmentamos cada vez más el corpus del conocimiento, por lo que existe el riesgo de perder la comprensión de la unidad del conocimiento. Es una situación compleja, pues sin la especialización tampoco podríamos ir corriendo las fronteras mismas del conocimiento. ¿Para quién y para qué el conocimiento? Me parece que, al no jugar en el campo de lo especializado, Harari materializa una propuesta de democratizar una visión y una lectura de la historia.

Desde la disciplina de la historia, la obra de Harari ha recibido críticas por su manejo de fuentes y cifras, al igual que por la manera como asume ciertas posturas. En pocas palabras, hay afirmaciones que la comunidad de historiadores no puede aceptar; tal vez la lectura del autor es demasiado general. Me parece importante destacar estas críticas porque nos invita a leer el libro con cierta duda y no asumir que todo lo que se narra y dice es una verdad absoluta. Dudar de lo que expone el autor es también algo valioso, y contribuye a la formación de lectores críticos. Aunque a veces la narrativa de Harari es tan rica y nos absorbe, hasta el punto de que nos dejamos llevar por su razonamiento, así sea cuestionable.

El personaje principal de su narrativa es el ser humano y su desarrollo en el tiempo en el planeta Tierra. Harari es muy ambicioso en el marco temporal que

busca abordar, y se va mucho más allá de los seis mil años que muchas historias generales y universales ponen como punto de partida. Por lo general, la historia occidental se empieza a narrar desde la escritura, unos 4000 años antes de Cristo. Todo antes de la escritura se consideró prehistoria. Al inicio del libro, antes de narrar cualquier acontecimiento, Harari incluye una línea del tiempo que evoca miles de millones de años. El autor nos invita a pensar en un pasado mucho más largo, lejano y complejo al que estamos acostumbrados.

Hace aproximadamente setenta mil años podemos empezar a hablar de nuestros antepasados y a pensar en ellos. ¿Qué habrá pasado entre 70.000 AC y 4000 AC? Al hacerme esta pregunta me doy cuenta de que en mi formación como historiador hay muchas más incertidumbres que certezas. Precisamente, cada vez que averiguo más voy notando que poco sé. Esta sensación que evoca el viejo dicho atribuido a Sócrates de “Solo sé que nada sé” fue lo que más me conectó con esta obra. La noción tan amplia de tiempo y, a su vez, reconocer mi propio lugar, tan insignificante en una duración tan inconcebible, fue lo que me fascinó y agarró. En este sentido, Harari nos sacude, nos desubica y luego nos ofrece una explicación que uno como lector abraza, como un náufrago abraza su chaleco salvavidas tratando de no hundirse.

No es mi pretensión resumir el libro, pero si me parece relevante destacar algunos rasgos, elementos e ideas. Primero, el libro tiene cierto orden cronológico, pero va y viene en el tiempo. El autor va “avanzando” en la historia, pero lo hace por temas y en ocasiones de manera espiral. Segundo, el autor busca encontrar momentos de cambios significativos en la historia de la humanidad para, a partir de estos, entender etapas y épocas. En su narrativa encontramos momentos como la revolución cognitiva, donde la comunicación y el narrar les permitieron a los seres humanos habitar un mundo material y también un mundo de ideas o abstractos. También está el ejemplo de la revolución agrícola y sus implicaciones en nuestra relación con el entorno como especie. La vida en el planeta cambió cuando grupos humanos se volvieron sedentarios y se dejaron domesticar por la ilusión de una producción estable.

Por último, quiero destacar la idea que está magistralmente condesada en el título: De animales a dioses. Lo que narra y explica Harari es cómo el ser humano

pasó de ser un animal como muchos a tener un lugar especial y privilegiado en la Tierra.

El presente es el resultado de una serie de procesos históricos, que muchas veces sencillamente lo vivimos sin cuestionar cómo llegamos acá. Es sorprendente ver cómo desconocemos incluso nuestros pasados más recientes y cercanos. Si bien el ser humano es el protagonista de esta historia narrada por Harari, no podemos desprenderlo del pensar, el narrar, los imaginarios, el conocimiento y la tecnología. Harari hila la relación entre el pensar, el conocimiento, la tecnología, los imaginarios y el entorno.

En el libro se ilustra cómo el ser humano cree entender cada vez más su mundo, el entorno que habita y cómo cada vez más lo interviene y modifica. Muchas veces, las consecuencias de estas intervenciones son más nefastas que el verdadero beneficio que nos brindan. Harari destaca cómo el dominio de conocimientos y tecnologías ha sido un dominio real, que jerarquiza y ordena al mundo. El poder está en las manos de quienes tienen conocimientos y manejan tecnologías.

Este escrito es una invitación a leer la obra de Yuval Noah Harari. Creo que su lectura nos invita a cuestionarnos y a pensar nuestro lugar en el tiempo y el espacio. Aplaudo que este sea un libro con pretensiones generales y que busque lectores de todas las disciplinas y las formaciones. El punto no es estar de acuerdo o en desacuerdo con el autor. Lo importante acá es leer en forma crítica y a la vez personal, sacudiendo el lugar de enunciación que nos ha dado comodidad y tranquilidad. Como especie siempre hemos mirado hacia las estrellas, pero a veces por mirar más allá nos perdemos de lo que está pasando acá.



REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

Alcance y política

El objetivo de la *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* es difundir artículos técnicos que contribuyan al desarrollo del país a través de una publicación con alta calidad editorial y rigor científico.

La revista acepta prioritariamente los siguientes tipos de trabajos, que le permiten mantener su categorización:

1. **Artículo de investigación científica y tecnológica.** Documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
2. **Artículo de reflexión.** Documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico, recurriendo a fuentes originales.
3. **Artículo de revisión.** Documento producto de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica.

También admite artículos de las siguientes tipologías:

4. **Artículo corto.** Documento breve que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica, que por lo general requieren una pronta difusión.
5. **Reporte de caso.** Documento que presenta los resultados de un estudio sobre una situación particular, con el fin de dar a conocer las experiencias técnicas y metodológicas consideradas en un caso específico.
6. **Revisión de tema.** Documento resultado de la revisión crítica de la bibliografía sobre un tema en particular.

Cabe destacar que se privilegian para la revista los tipos de artículos de los numerales 1, 2 y 3.

La revista circula trimestralmente y recibe sólo artículos inéditos. Los trabajos recibidos se someten al concepto de pares académicos y del Consejo Editorial.

Requisitos para la publicación de artículos

Los artículos presentados a la revista deben remitirse por correo electrónico a revista@escuelaing.edu.co, adjuntando los siguientes formatos debidamente diligenciados: autor.doc, clasificación.doc y tipo.doc, cuyos archivos se pueden descargar de <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>. En este mismo sitio está disponible la plantilla guía que contiene la estructura determinada por la revista para los artículos.

Scope and policy

Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería disseminates technology articles helping to our country development. It emphasises on its high quality print and its scientific rigour. Articles submitted for publication shall be classified into one of the following categories— which allow it keeps its indexation:

1. **Scientific and technological research article.** These documents offer a detailed description about the original findings of research projects. In general, the usually used structure contains four important sections: introduction, methodology, results and conclusions.
2. **Reflection article.** These documents present the results of a research project on a specific, interpretative, or critical view by the author about a particular topic by using original sources.
3. **Review.** A document resulting from a finished research, where the published and/or unpublished findings of investigation in a particular field of science or technology are analysed, systematised and integrated to report the progress and the development tendencies. These documents include a careful bibliographic review.

Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería also accepts the following types of articles:

4. **Short article.** A brief text presenting the original, preliminary and/or partial results of a scientific or technological study, which normally need to be disseminated as quickly as possible.
5. **Case report.** A document that presents the results of a study on a specific situation in order to report the technical and methodological experiences considered in a particular case.
6. **Thematic review.** These documents are the product of a critical review of literature on a particular topic.

Our revista privilege articles as the highlight ones in numbers 1, 2 and 3.

Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería is a quarterly publication that only accepts unpublished articles. The revista submits all the papers to the verdict of two academic peers, who evaluate the article.

Ruling for publication

The article must be sent by e-mail to revista@escuelaing.edu.co with 3 files attached: Author.doc, Classification.doc and Type.doc available in <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>. There is also a template guide for the structure of the article (template guide.doc).



Confía en 4-72,
el servicio de envíos
de Colombia

Línea de atención al cliente:
(57 - 1) 472 2000 en Bogotá
01 8000 111 210 a nivel Nacional

.....

www.4-72.com.co