

- ❑ **Análisis de la calidad trófica del embalse El Hato.**
- ❑ **Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.**
- ❑ **Comparación de impactos ambientales entre las alternativas de corte - relleno y viaducto, para la construcción de carreteras.**
- ❑ **Inserción de doctores en la industria nacional: una alternativa.**
- ❑ **Sensor basado en fibra óptica para detección de sobrecarga vehicular.**
- ❑ **Impacto geotécnico del diésel en un suelo arcilloso de baja plasticidad.**
- ❑ **Planes departamentales de acueductos en Colombia. Marco general y conceptual. Criterios.**
- ❑ **Uso del software Tracker como apoyo en la estrategia de enseñanza del análisis de la dinámica de los cuerpos.**
- ❑ **Estudio comparativo de las características físico-mecánicas de dos cementos comerciales.**
- ❑ **Efectos de la presurización de los túneles de la conducción San Juan en el proyecto río Ranchería.**
- ❑ **E-health y M-health en Colombia: antecedentes, restricciones y consideraciones para el desarrollo de nuevas tecnologías basadas en software.**

Enero - marzo de 2018

ISSN 0121-5132

P.V.P. Colombia \$12.000.00



- **Análisis de la calidad trófica del embalse El Hato.**
- **Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.**
- **Comparación de impactos ambientales entre las alternativas de corte - relleno y viaducto, para la construcción de carreteras.**
- **Inserción de doctores en la industria nacional: una alternativa.**
- **Sensor basado en fibra óptica para detección de sobrecarga vehicular.**
- **Impacto geotécnico del diésel en un suelo arcilloso de baja plasticidad.**
- **Planes departamentales de acueductos en Colombia. Marco general y conceptual. Criterios.**
- **Uso del software Tracker como apoyo en la estrategia de enseñanza del análisis de la dinámica de los cuerpos.**
- **Estudio comparativo de las características físico-mecánicas de dos cementos comerciales.**
- **Efectos de la presurización de los túneles de la conducción San Juan en el proyecto río Ranchería.**
- **E-health y M-health en Colombia: antecedentes, restricciones y consideraciones para el desarrollo de nuevas tecnologías basadas en software.**

CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

PRESIDENTE	RICARDO RINCÓN HERNÁNDEZ
VOCALES	LUIS GUILLERMO AYCARDI BARRERO SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ MANUEL GARCÍA LÓPEZ MARÍA DEL ROSARIO MONTEJO PERRY ARMANDO PALOMINO INFANTE RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS HENRY MORENO MOSQUERA (representante de los profesores) NATALIA SALAMANCA CEBALLOS (representante de los estudiantes)
RECTORA	MYRIAM ASTRID ANGARITA GÓMEZ
SECRETARIO	RICARDO ALFREDO LÓPEZ CUALLA

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 HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS
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 N.º 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

La ingeniería en Colombia, nuevamente cuestionada

Paula Ximena Ríos Reyes

7-11

Análisis de la calidad trófica del embalse El Hato

Paola Marcella Tibaquirá Perdomo

En este artículo se presenta el análisis de la calidad trófica del embalse El Hato, con base en la información disponible para aportes de fósforo al embalse. Adicionalmente, se indican las características generales y los antecedentes del embalse, la información experimental de las cargas y concentraciones de fósforo sobre el embalse necesarias para evaluar su condición trófica, y por último, la aplicación del modelo Vollenweider y su análisis.

13-20

Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP

Pedro Julián Gallego Quintana - Sandra Ximena Campagnoli Martínez

En el presente estudio se analizaron los cambios en las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas con RAP al incorporar aceite quemado de motor de carro como agente rejuvenecedor del ligante envejecido contenido en el RAP. Los resultados obtenidos sugieren que el uso de WEO como agente rejuvenecedor es viable para la elaboración de mezclas asfálticas con RAP.

21-30

Comparación de impactos ambientales entre las alternativas de corte - relleno y viaducto, para la construcción de carreteras: revisión de un caso de estudio

Luis Alejandro González Camargo - María Carolina Romero Pereira

En este artículo se hace una comparación entre los resultados de la evaluación de los impactos ambientales (EvIA) de dos alternativas de construcción de carreteras, corte-relleno y viaducto, a partir del análisis de un caso de estudio. Como resultado, se concluye que cada alternativa tiene diferentes ventajas y desventajas desde el punto de vista ambiental y la mejor alternativa dependerá de las condiciones del entorno afectado y zonificación ambiental de cada proyecto.

31-36

Inserción de doctores en la industria nacional: una alternativa

Juan David Betancur Ríos

En este artículo se presenta una reflexión sobre la inserción de doctores en la industria nacional, abordando las principales dificultades encontradas en dicho proceso, de acuerdo con la experiencia del autor. A renglón seguido se presenta un mecanismo para realizarlo, basado en el modelo triple hélice de generación de ciencia y tecnología, en el cual se requiere una efectiva vinculación universidad - empresa - gobierno.

37-45

Sensor basado en fibra óptica para detección de sobrecarga vehicular

Sandra Ximena Campagnoli Martínez - Leidy Johana González Cuadros - Juan Camilo Gómez Rubiano - Juan Felipe Martín Alfonso - Hernán Paz Penagos

En este artículo se explican los avances que se han obtenido en el proceso de dimensionamiento del problema para el diseño teórico del sensor basado en fibra. La investigación parte de un trabajo interdisciplinar de ingeniería mecánica, civil y electrónica. Los aportes de estas disciplinas, tanto en sus modos propios de proceder, como en temas específicos, favorecen la rigurosidad investigativa y aportan más elementos de juicio para resolver el problema.

47-54

Impacto geotécnico del diésel en un suelo arcilloso de baja plasticidad

Lady Sofía Rodríguez Cuervo - José Vicente Amorátegui Gil

Cuando se presentan derrames de hidrocarburos en el suelo por efecto de la gravedad y las fuerzas capilares, estos fluidos se desplazan vertical y horizontalmente a través de los estratos; entonces surge el siguiente interrogante: ¿qué sucede en las propiedades geotécnicas y la composición mineralógica de un suelo arcilloso de baja plasticidad con presencia de diésel? Para dar respuesta a esta pregunta se requirió realizar ensayos de laboratorio con variables controladas.

55-62

Planes departamentales de acueductos en Colombia. Marco general y conceptual.

Criterios

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz - Mónica Liliana Rodríguez Muñoz

Los planes para el suministro y cobertura de agua potable son una herramienta fundamental, cuyos objetivos primordiales son conocer la situación actual de una región, identificar fortalezas y debilidades, crear y planificar opciones y diseños particulares, incrementar indicadores (calidad, cobertura y continuidad), mejorar la calidad del servicio de suministro de agua potable y, finalmente, permitir el desarrollo y crecimiento de una población.

63-70

Uso del *software* Tracker como apoyo en la estrategia de enseñanza del análisis de la dinámica de los cuerpos

Heindel Ricardo Otero Arévalo - Carlos Collazos Morales - Jaime José Isaza Ceballos - Martha Pimienta Giraldo - Liliana Pedraza Vega

En este artículo se muestra una experiencia didáctica en la que, a través de metodologías activas y el uso de un *software* para el análisis de videos, se logra que el estudiante pase del simple estudio teórico de conceptos de dinámica de los cuerpos a una fase experimental.

71-80

Estudio comparativo de las características físico-mecánicas de dos cementos comerciales Pórtland tipos 1 y 3

Claudia Maritza Santos Bernal - José Alirio Guzmán Espitia - Mayra Alejandra Pérez Cárdenas - Camilo Arturo Torres Álvarez - Nancy Torres Castellanos

En el presente artículo se evalúan algunas propiedades del concreto en estado fresco, endurecido y de durabilidad, con dos tipos de cemento (tipo 1 y tipo 3), donde la mitad de los especímenes se sometieron a curado en tanque de agua, mientras que los restantes se dejaron en un ambiente seco y bajo techo.

81-87

Efectos de la presurización de los túneles de la conducción San Juan en el proyecto río Ranchería

Juan Camilo Torres Zapata - Germán Monsalve Sáenz

En el proyecto río Ranchería, ubicado en el departamento de La Guajira, se evidenció que en la conducción San Cesar (de 18,11 km) existen problemas de presurización de túneles que están diseñados para trabajar como canales. En este artículo se presentan las características técnicas del problema y alternativas de solución para este tipo de conducciones.

89-100

E-health y *m-health* en Colombia: antecedentes, restricciones y consideraciones para el desarrollo de nuevas tecnologías basadas en *software*

Héctor Fabio Cadavid Rengifo

Los conceptos de *e-health* y *m-health* representan una gran oportunidad para superar las grandes limitaciones de cobertura, equidad y calidad de los servicios de salud de países como Colombia. El presente artículo da recomendaciones concretas (desde el punto de vista técnico) para ser consideradas dentro de las actividades de investigación de futuros proyectos en el área.

101 / ALCANCE Y POLÍTICAS

Editorial

La ingeniería en Colombia, nuevamente cuestionada

PAULA XIMENA RÍOS REYES

Profesora asociada de la Escuela Colombiana de Ingeniería

paula.rios@escuelaing.edu.co

“Hidroituango puede ser la segunda mayor tragedia en ingeniería”. Este fue un titular publicado por el periódico *Portafolio* el pasado 17 de mayo. Los expertos consultados explicaban que si la presa del proyecto se llegaba a romper, se produciría la segunda mayor tragedia en la historia de la ingeniería mundial, después del accidente nuclear de Chernóbil...

Aunque, afortunadamente, hasta el momento no se ha producido esta tragedia de dimensiones inimaginables, este evento no se puede considerar como un accidente menor. Diariamente se encuentran en riesgo cientos de trabajadores, se han visto afectadas miles de personas de las poblaciones cercanas, se encuentra en vilo la viabilidad de un megaproyecto hidroeléctrico y su futuro es incierto.

Pasan los días y el peligro sigue latente, la pesadilla continúa para los trabajadores, las comunidades aledañas, para Empresas Públicas de Medellín y para todo un país que empieza a conocer la magnitud de este proyecto y las implicaciones que podría tener si fallara.

Como colombianos, seguimos con angustia el día a día del acontecer en Hidroituango. Por su parte, el gobierno antioqueño, los directores del proyecto, los ingenieros y los trabajadores en un solo frente, luchan contra las adversidades diarias, mostrándonos una vez más la unión, la templanza, la recursividad y la capacidad para salir adelante que caracteriza a los paisas.

Es sorprendente ver cómo hasta ahora la mayoría de personas se han unido para buscar soluciones, pareciera que no quisieran juzgar lo ocurrido, ni hacer señalamientos, pareciera que la premisa fuera sólo mirar hacia adelante. Sin embargo, es inevitable que todo un país se cuestione y más cuando, de acuerdo con los últimos sucesos, la Gobernación de Antioquia y el Departamento Administrativo de Prevención de Desastres (DAPARD), han manifestado en un comunicado que la contingencia en la construcción del proyecto Hidroituango es “una amenaza antrópica (hecha por la mano del hombre), para 15 municipios de la zona de influencia”, según lo publicado por *Semana* el 29 de mayo pasado.

Sí, surgen muchas preguntas: ¿Las condiciones geológicas de la zona permitían esta construcción?, ¿por qué se taponaron los dos primeros túneles de desviación construidos?, ¿hubo ahorro de costos, presiones en el desarrollo del cronograma?, ¿la corrupción invadió la ingeniería a tal punto que la parte técnica de un proyecto se considera irrelevante?, ¿la ingeniería colombiana es capaz de desarrollar este tipo de proyectos?

Si a este evento desafortunado se le adicionan los tristes sucesos que han pasado en la ingeniería colombiana en los últimos años y que han causado decenas de muertes y personas heridas, como el colapso de una torre de apartamentos en Medellín en el año 2013, de un puente peatonal en Bogotá en el año 2015, de un edificio

de apartamentos en Cartagena en el año 2017 y de un puente en construcción en la vía Bogotá-Villavicencio, iniciando el año 2018, por sólo citar los desastres de ingeniería más recordados en el país, no nos queda más que preguntarnos: ¿qué pasa con nuestra ingeniería?

Por definición, la ingeniería debería desarrollar los medios para aprovechar económicamente los materiales y las fuerzas de la naturaleza para la prosperidad de las personas y parece que estamos haciendo todo lo contrario: vamos en contra de la naturaleza, llevamos los cálculos al límite para minimizar gastos y no consideramos el alto costo en vidas que estas decisiones pueden ocasionar.

Es momento de parar, de pensar y de reflexionar sobre nuestro quehacer. Es momento de reaccionar y

romper con la dinámica que un país corrupto impuso, es hora de darle el lugar que se merece la ingeniería en Colombia. Necesitamos ingenieros capaces de reivindicar nuestra profesión, que se comprometan a impulsar el desarrollo de muchos sectores y que tengan la fortaleza para denunciar la corrupción y no caer en ella.

Desde la universidad seguiremos fortaleciendo a los futuros profesionales para que realmente todo el conocimiento de las ciencias físicas y matemáticas adquiridas se apliquen con buen juicio, para que no se dejen impregnar de las malas prácticas y para que no olviden que la profesión debe siempre velar por impactar positivamente la comunidad de la cual forman parte.

Análisis de la calidad trófica del embalse El Hato

Trophic quality analysis of El Hato dam

PAOLA MARCELLA TIBAQUIRÁ PERDOMO¹ - JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS²

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medioambiente.

2. Ingeniero civil. MEEE. Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

paola.tibaquira@mail.escuelaing.edu.co - jairo.romer@escuelaing.edu.co

Recibido: 11/07/2017 Aceptado: 31/07/2017

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

Resumen

En este artículo se presenta el análisis de la calidad trófica del embalse El Hato, con base en la información disponible para aportes de fósforo al embalse. Adicionalmente, se indican las características generales y los antecedentes del embalse, la información experimental de las cargas y concentraciones de fósforo sobre el embalse necesarias para evaluar su condición trófica, y por último, la aplicación del modelo Vollenweider y su análisis.

Palabras claves: embalse, trófico, hato, fósforo, calidad, agua, Ubaté, Carupa.

Abstract

This document presents the trophic quality analysis of El Hato dam, based on the available information for phosphorus contributions to the dam. Furthermore, it indicates the general characteristics and background of the dam, the experimental data of phosphorus loads and concentrations at the dam needed to assess its trophic status, and finally the Vollenweider model and analysis.

ANTECEDENTES

La Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), dentro del programa de desarrollo integral de la cuenca del río Suárez encargó servicios de ingeniería a la firma Estudios Técnicos para llevar a cabo los estudios de factibilidad técnica y diseño de la presa El Hato, localizada en el municipio de Carmen de Carupa, aprovechando las ventajas que ofrece el cauce del río El Hato en la zona de Corralejas. En 1992, como parte de la estrategia para regular y hacer frente a las crecientes o estiajes causados por los fenómenos del Niño y la Niña, así como controlar las periódicas crecientes del río Ubaté, disminuir su incidencia en las fluctuaciones de los niveles de agua y poder contribuir a la construcción de un distrito de riego en la cuenca alta del río Ubaté, se decidió hacer un embalse en el río El Hato.

Este embalse ha operado, regulado y suministrado el caudal suficiente para el riego de 3000 hectáreas de pastos y cultivos de la región del valle de los ríos Ubaté y Suta, además del suministro para el acueducto del municipio de Carmen de Carupa.

El embalse El Hato empezó a construirse el 3 de septiembre de 1990, se terminó el 18 de diciembre de 1991 y se puso en operación en 1992.

En el embalse, la temperatura del agua es de 12,4 °C y la altitud (msnm) de 2847,5; se establece que el embalse se define como **cálido tropical**⁽¹⁰⁾, ya que posee una temperatura mínima del agua de 10 °C durante condiciones normales y una temperatura promedio anual mínima de 15 °C, con una altitud inferior a los 3000 msnm. Un embalse se puede estratificar térmica o químicamente. Una estratificación térmica se refiere a la formación de dos capas de agua claramente definidas, una caliente superficial y otra fría profunda, divididas por una zona de descenso brusco llamada termocline, con una diferencia de temperaturas que puede ser hasta de 6 u 8 °C entre la superficie y el fondo.

El ecosistema de la cuenca alta del río Ubaté se encuentra bastante intervenido, tanto en la ribera de la cuenca como en los alrededores, debido en gran parte a las actividades que desarrollan los pobladores de la zona: ganadería de levante y lechera⁽¹⁾. El área de la cuenca del río Hato presenta una distribución del suelo que se presenta en la tabla siguiente (tabla 2).

La cuenca del río Hato tiene una extensión de 5300 ha, con una participación del 11 % en relación con el total del área de la cuenca de los ríos Ubaté y Suárez, está conformada por los municipios de Carmen de Carupa y Ubaté, con una participación del 72 y el 26 %, respectivamente, del área total de la cuenca.

Tabla 1
Características generales del embalse⁽⁶⁾

Característica	Valor
Cota altura de la presa (msnm)	2852
Longitud del embalse (km)	2,8
Ancho del embalse (km)	1,0
Perímetro cota máxima de inundación (km)	10,9
Espejo de agua máxima (ha)	80,61
Altura de la presa (m)	36
Nivel de cresta en vertedero (msnm)	2847,05
Nivel máximo de operación (msnm)	2842,7
Nivel mínimo de operación (msnm)	2828
Nivel en bocatoma de fondo (msnm)	2823
Nivel del lecho del río (msnm)	2817
Nivel de fluctuación (cm/d)	15
Aporte anual promedio (Mm ³)	7,8
Afluente principal	Río El Hato
Hoya del río Hato (ha)	5300
Profundidad media (m)	15

Fuente: Corporación Autónoma Regional, Contrato CAR 671. Manual de operación de levantamiento batimétrico y topográfico del embalse El Hato. Análisis de crecientes y mapas de amenazas, 2005.

Tabla 2

Distribución del suelo en la cuenca del río Hato

Usos del suelo	Valor (ha)	Valor porcentual
Bosque	306	5,77 %
Café	149	2,81 %
Caña panelera	501	9,45 %
Cebada	146	2,75 %
Eriales	13	0,25 %
Maíz	31	0,58 %
Papa	79	1,49 %
Pastos	3302	62,30 %
Pradera	773	14,58 %
Total	5300	100 %

Fuente: Audicon Ambiotec. Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica Ubaté y Suárez, 2006.

CARGAS Y CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO EN EL EMBALSE

El análisis de eutrofización se hace con base en fósforo (P) como nutriente limitante, siendo éste el nutriente que tiene mayor efecto sobre el crecimiento de algas y sobre la productividad de los ecosistemas acuáticos. Además, porque no se cuenta con información de nitrógeno total. La carga puntual de fósforo (P) sobre el embalse se presenta en la tabla siguiente, la cual corresponde a las cifras para el año 2011 como dato representativo, resultado del compilado y depuración del registro obtenido por el laboratorio entre los años 2007 y 2013 (tabla 3).⁽⁷⁾

Tabla 3
Carga puntual de fósforo sobre el embalse

Afluente	Fecha	mg P/L	Caudal, L/s	Carga, mg/s
Canal de entrada al embalse	2011	0,046	802	36,89

Fuente: El autor.

Las cargas no puntuales de fósforo (P) sobre el embalse corresponden a los escurrimientos dispersos causados por los usos del suelo en la cuenca del río Hato (tabla 2). A continuación se ilustra la localización de la carga puntual de fósforo al embalse (figura 1), se muestra la localización de los puntos de muestreo para concentración de fósforo en el embalse (figura 2) y se indican las concentraciones de fósforo dentro del embalse (tabla 4).

Tabla 4
Concentraciones de fósforo en el embalse

Zona	Fecha	mg P/L
Sector del dique	2011	0,05
Centro	2011	0,02
Sur	2011	0,03
PROMEDIO	2011	0,03

Fuente: El autor.

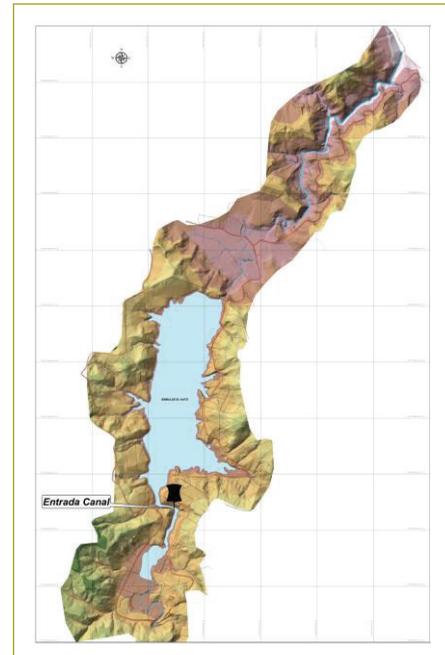


Figura 1. Localización de la carga puntual de fósforo.

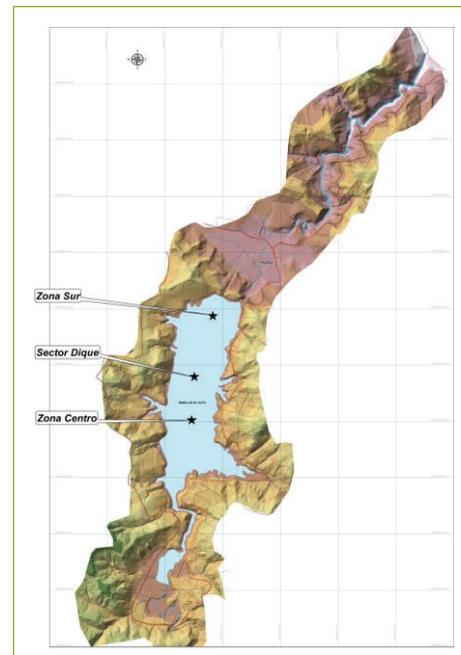


Figura 2. Localización de puntos de muestreo en el embalse.

Finalmente se fijan las cargas totales indicadas en la tabla siguiente, establecidas por las cargas puntuales y las dispersas (definidas por el tipo de suelo), según el escurrimiento definido por las áreas aferentes y determinado el caudal por el método racional, con una concentración teórica de 0,04 mg/L (tabla 5).

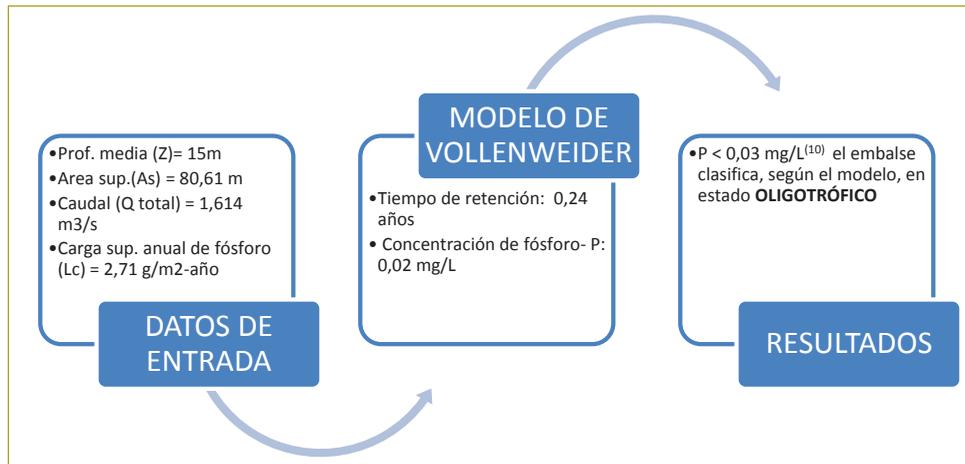


Tabla 5
Carga total de fósforo sobre el embalse

Puntual	Dispersa	Carga total
36,89 mg/s	32,51 mg/s	69,40 mg/s
1,44 g/m ² año	1,27 g/m ² año	2,71 g/m ² año

Fuente: El autor.

MODELO DE EUTROFIZACIÓN

Por las condiciones del embalse se realiza la aplicación del modelo de Vollenweider, mediante el cual se obtiene un estado *oligotrófico*.

A continuación se puede ver el comportamiento del estado trófico en el interior del embalse.

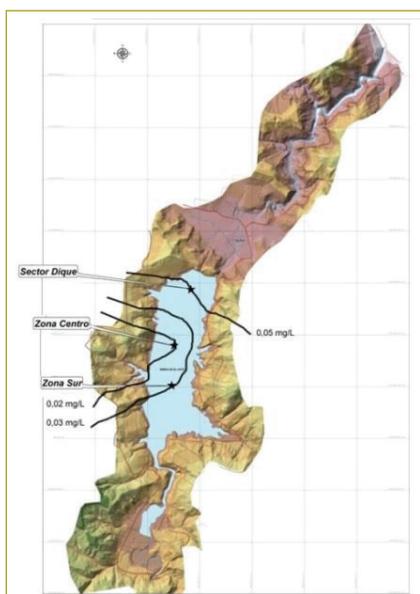


Figura 3. Curvas de isofósforo en el embalse El Hato.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El embalse El Hato recibe una carga puntual de fósforo de 36,89 mg/s, proveniente de un caudal afluente de 0,802 m³/s, con una concentración de fósforo de 0,046 mg-P/L.
- El embalse El Hato recibe una carga dispersa de fósforo de 32,51 mg/s, proveniente de un caudal afluente de 0,813 m³/s, con una concentración de fósforo supuesta de 0,04 mg-P/L.
- La carga total evaluada de fósforo sobre el embalse El Hato es de 69,4 mg/s, que representa una carga superficial anual de fósforo de 2,71 g/m² año.
- La evaluación del estado trófico del embalse El Hato mediante el modelo de Vollenweider determina un estado oligotrófico.
- Los análisis de fósforo realizados en las aguas del embalse confirman que la concentración promedio de fósforo total es de 0,03 mg-P/L, valor indicativo de un estado oligotrófico.
- Para mantener el embalse El Hato en condiciones oligotróficas se recomienda no exceder las cargas actuales de fósforo y mantener un programa de control de calidad del agua afluente y del embalse.

REFERENCIAS

1. Audicon Ambiotec (2006). Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica Ubaté y Suárez.
2. Vente, Chow (1993). *Hidrología aplicada*. Bogotá: McGraw Hill.
3. Corporación Autónoma Regional (noviembre de 1986). Contrato 093/84. Estudio de factibilidad y diseño de la presa El Hato y distrito de riego. Informe final, capítulo I. Resumen. Volumen I. CAR, Bogotá.

4. Corporación Autónoma Regional (marzo de 1992). Contrato 227. Presa El Hato, embalse y rebosadero. Nivel de operación recomendable y estudios hidrológicos e hidráulicos durante la construcción. Informe técnico. Bogotá.
5. Corporación Autónoma Regional (1987). Estudio de aprovechamiento hidráulico del sistema Cucunubá - Fúquene - Río Suárez. Informe final, etapa I.
6. Corporación Autónoma Regional (2005). Contrato CAR 671. Manual de operación de levantamiento batimétrico y topográfico del embalse El Hato. Análisis de crecientes y mapas de amenazas.
7. Corporación Autónoma Regional (s.f.). Análisis de laboratorio. Laboratorio ambiental CAR.
8. Moreno Franco, D. et al. (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia.
9. Ramírez et al. (2001). Variación vertical de parámetros físicos y químicos en cuatro embalses tropicales, y su relación con el área, la altitud y el tiempo de retención hidráulica.
10. Romero Rojas, J. (2009). *Calidad del agua* (3.ª ed.). Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP

Effect of Waste Engine Oil on physical and mechanical properties of asphalt mixtures containing RAP

PEDRO JULIÁN GALLEGO QUINTANA¹ - SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ²

1. Magíster en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Profesora titular del Centro de Estudios Geotécnicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

pedro.gallego@mail.escuelaing.edu.co - sandra.campagnoli@escuelaing.edu.co

Recibido: 15/07/2017 Aceptado: 31/07/2017

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

Resumen

El uso de materiales provenientes del fresado de capas asfálticas de pavimentos (RAP, por su sigla en inglés *Reclaimed Asphalt Pavement*) es una tendencia mundial en la elaboración de mezclas asfálticas con características, en principio, similares a las obtenidas con materiales nuevos. En el presente estudio se analizaron los cambios en las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas con RAP al incorporar aceite quemado de motor de carro (WEO, por su sigla en inglés *Waste Engine Oil*) como agente rejuvenecedor del ligante envejecido contenido en el RAP. Se tomó como referencia una mezcla tipo MDC-19, acorde con las especificaciones del Invías, Artículo 450-13. Los resultados obtenidos sugieren que el uso de WEO como agente rejuvenecedor es viable para la elaboración de mezclas asfálticas con RAP.

Palabras claves: reciclaje de pavimentos, RAP, mezclas asfálticas, rejuvenecedor de ligantes, aceite usado de motor de carro.

Abstract

Using materials from Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) is a world-wide trend in production of asphalt mixtures having properties like those obtained with new materials. In this study, changes in the physical and mechanical properties of asphalt mixtures containing RAP and waste engine oil (WEO) as a rejuvenating agent of the aged binder contained in RAP were analyzed, using an MDC-19 mixture pavement, according to Invías specifications, 450-13, as a reference. Results obtained suggest that WEO as a rejuvenating agent can be used for producing asphalt mixtures with RAP.

Keywords: pavement recycling, RAP, asphalt mixtures, binder rejuvenation, waste engine oil.

INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial es un factor de gran relevancia para el desarrollo económico de un país. En Colombia, la principal forma de transporte tanto de carga como de pasajeros es la terrestre (71 % de la carga es transportada por carretera al interior del país) [1]. A pesar de lo anterior, existe un atraso importante de la infraestructura vial (y de otros medios de transporte) [1], que se debe en parte a las características geográficas particulares del país (topografía andina y carreteras sinuosas que la recorren), las cuales imponen restricciones que dificultan la construcción y el mantenimiento de la malla vial existente.

Colombia cuenta con aproximadamente 165.403 kilómetros de carreteras. El 76 % de éstos corresponde a la red terciaria a cargo de los municipios y del Instituto Nacional de Vías (Invías); el 14 % a la secundaria, a cargo de los departamentos, y el 10 % a la primaria, a cargo de la nación. Cabe señalar que únicamente el 83 % de la red primaria y el 26 % de la red secundaria se encuentran pavimentadas. Para la red terciaria no se tienen datos oficiales [1]. Los anteriores indicadores permiten observar un claro rezago en la infraestructura vial del país.

Las dificultades en el desarrollo y el mantenimiento de las redes viales, además del creciente uso de la infraestructura vial, la cual pasó de 99.516 toneladas de carga transportada al interior en 1994 a 279.760 en el 2012 [1], han hecho de la infraestructura vial y de transporte un eje importante dentro de las políticas nacionales de desarrollo.

La cantidad y la calidad de las vías nacionales dejan en evidencia la necesidad de avanzar en los procesos de construcción y mantenimiento de la infraestructura vial existente, mediante proyectos que hagan uso eficiente de los recursos disponibles en forma respetuosa con el ambiente, es decir, prácticas que contribuyan a la conservación de los recursos naturales y favorezcan el desarrollo sostenible.

En ese sentido, una opción viable para la construcción y mantenimiento de vías es el reciclaje de materiales, que presenta además contribuciones significativas tanto en costos de construcción como en conservación de recursos naturales.

El reciclaje de pavimentos asfálticos no es una idea nueva. Las primeras experiencias de su uso, de acuerdo con la Asphalt Recycling and Reclaiming Association

[2], datan de principios del siglo XX (reciclaje en frío), época en que se documenta el primer caso en la bibliografía existente, específicamente en 1930 (reciclaje en caliente). No obstante, es en la década de los setenta cuando el reciclaje empieza a ser una alternativa en construcción y mantenimiento de vías, debido a la crisis mundial de petróleo y a la evolución de maquinaria y equipos especializados para tal fin [2].

El reciclaje de pavimentos, sea en frío o en caliente, con adición de pavimento asfáltico recuperado (RAP), emulsiones rejuvenecedoras, cemento asfáltico, espuma de asfalto o aglomerantes hidráulicos, ha mostrado ser un método eficaz e innovador [3]. Con respecto a los agentes rejuvenecedores, la utilización de aceite de automóvil usado (*Waste Engine Oil, WEO*) es una línea de investigación reciente, que ha venido despertando el interés de algunos investigadores en los últimos años. En esas investigaciones, el WEO se presenta como opción viable para la fabricación de mezclas con RAP aptas para uso en labores de mantenimiento [4]–[9] PG64-22.

Desde el punto de vista normativo, en Colombia se permite preparar mezclas asfálticas hasta un determinado contenido de RAP, lo cual es reglamentado por el Invías en su Artículo 462 -13 (Reciclado de pavimento asfáltico en planta y en caliente), donde se define un contenido máximo de RAP del 40 %.

Pese a la normativa existente en el país para la preparación de mezclas asfálticas, el empleo de materiales y tecnologías de reciclaje en la rehabilitación y mantenimiento vial, específicamente de RAP, es aún incipiente. Lo anterior se debe en parte a la falta de materiales o aditivos comprobados que actúen como agentes rejuvenecedores del asfalto contenido en el RAP, de tal modo que permitan recuperar en cierto grado sus propiedades ligantes y, por ende, mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla.

En este contexto, a continuación se explora, para las condiciones propias de materiales –agregados pétreos, RAP y cemento asfáltico–, el uso de WEO en diferentes proporciones (0 %, 5 %, 10 % y 15 %), como agente rejuvenecedor para la restauración del asfalto envejecido en mezclas con RAP, de tal manera que la mezcla obtenida sea apta para labores de mantenimiento o construcción de capas asfálticas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Agregados vírgenes. Material extraído del río Cucuana, en el sector de El Palmar (municipio de Saldaña, Tolima), triturado en planta. La distribución de tamaños corresponde a 55,6 % de arena, 40,5 % de grava y 3,9 % de finos. Clasifica como SP - Arena Pobrementemente Gradada, de acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos, y cumple con los rangos de tamaños especificados para una mezcla asfáltica MDC-19.

WEO. Aceite quemado de automóvil tipo SAE30 (15W30), uno de los dos aceites de mayor empleo en el departamento del Tolima. Los parámetros (densidad, gravedad API, viscosidad cinemática a 20 °C, contenido de cenizas sulfatadas, humedad, sólidos y punto de inflamación) fueron caracterizados de acuerdo con los procedimientos de la American Standard Testing of Materials (ASTM D-1298, D-445, D-874, D-95, D-9362 y D-92) y se resumen más adelante (tabla 1).

RAP. Pavimento asfáltico recuperado de la vía El Guamo - Saldaña, km 6. El contenido de asfalto envejecido en el RAP es del 6,4 % y los agregados extraídos corresponden al 61 % de arena, 30 % de grava y 9 % de finos, clasificando como SW-SM, arena bien gradada - arena limosa, de acuerdo con el USCS, o como A-1-a, según la AASHTO.

Cementos asfálticos. Asfalto (60/70) proveniente de Barrancabermeja - Ecopetrol, con propiedades certificadas por la refinera, y asfalto envejecido contenido en el RAP (6,4 % del total del RAP).

Preparación de las mezclas asfálticas

Para la preparación y dosificación de los componentes reciclados en cada mezcla se siguió el procedimiento

INV E-812-13, “Determinación de la proporción y del grado del agente de reciclado en mezclas de concreto asfáltico elaboradas en caliente con material reciclado”.

De manera general, la composición de las mezclas corresponde a 65 % de agregados vírgenes y 35 % de RAP (porcentajes y proporciones en peso). La cantidad de asfalto nuevo fue ajustada, considerando el porcentaje de asfalto envejecido presente en el RAP (6,5 %) y las adiciones de WEO (0 %, 5 %, 10 % y 15 %), hasta alcanzar el óptimo teórico de asfalto en la mezcla del 5,9 %, el cual se determinó mediante el método Duriez. Es de aclarar que en este estudio el WEO fue considerado como ligante.

Para cada concentración de WEO (0 %, 5 %, 10 % y 15 %), se elaboraron 12 briquetas tipo Marshall de 100 mm de diámetro, para un total de 48 briquetas de 1200 g cada una. Para la evaluación de las propiedades mecánicas de las mezclas se asignaron 3 briquetas para determinar la estabilidad y el flujo utilizando el equipo Marshall, 3 para el módulo resiliente y las 6 restantes para medir la susceptibilidad al agua con el ensayo de tracción indirecta (3 en estado seco y 3 después de inmersión).

Las temperaturas de los materiales en el proceso de mezclado para cada una de las inclusiones de WEO fueron las siguientes: para los agregados vírgenes y el RAP, 165 °C, 162 °C, 160 °C y 135 °C, para el asfalto nuevo, 160 °C, 157 °C, 155 °C y 130 °C, y el WEO fue adicionado sin calentamiento previo (temperatura de calentamiento segura 163 ± 1 °C).

Las temperaturas de mezclado se establecieron a partir de la viscosidad del ligante, siendo estas de 160 °C, 157 °C, 155 °C y 130 °C para cada una de las inclusiones de WEO de 0 %, 5 %, 10 % y 15 %, respectivamente. El proceso de compactación de las mezclas se hizo mediante la aplicación de 75 golpes por cara con el martillo

Tabla 1
Características del WEO SAE30 (15W30)

Parámetros	Valores	Unidades	Norma ASTM
Densidad	875 +/- 4,20	Kg m ³	D-1298
Gravedad API	901 +/- 14,1	-	D-1298
Viscosidad cinemática 20 °C	3,86 +/- 0,012	mm ² s ⁻¹	D-445
Cenizas sulfatadas	0,334 +/- 0,005	% (p/p)	D-874
Humedad	0,10 +/- 0,001	% (v/v)	D-95
Sólidos 0,20 +/- 0,002	0,20 +/- 0,002	% (p/v)	D-9362
Punto de inflamación	163 +/- 1	°C	D-92

Fuente: El autor.

tipo Marshall (norma INV E-748-13). Posteriormente, se dejaron en reposo dentro del molde hasta alcanzar una temperatura cercana a la temperatura ambiente y proceder a la extracción de las briquetas.

En resumen, los ensayos realizados sobre los ligantes, con la inclusión de WEO y las mezclas así fabricadas, son como sigue:

Para ligantes

- Viscosidad de acuerdo con la norma INV E-717-13, “Método para determinar la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional”.
- Punto de ablandamiento, norma INV E-712-13, “Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola)”.
- Penetración, norma INV E-706-13, “Penetración de los materiales bituminosos”.

Para las mezclas

- Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes, empleando especímenes saturados y superficialmente secos, norma INV E-733-13 [10].
- Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas y abiertas, norma INV E-736-13 [11].
- Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall, norma INV E-748-13 [12].
- Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta, norma INV E-725-13 [13].
- Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas, norma BS EN 12967.

RESULTADOS

Dado que fueron varios los parámetros evaluados para la caracterización tanto de la mezcla de ligantes como de las mezclas asfálticas con adición de RAP + WEO, todo esto de acuerdo con las especificaciones del Artículo 450-13, cap. 4. Especificaciones generales de construcción de carreteras del Inviás, la selección de la cantidad óptima de WEO es consecuencia del análisis conjunto de todos ellos. A continuación se exponen los efectos producidos en cada uno de los parámetros analizados.

Incidencia del asfalto envejecido en el asfalto nuevo

La inclusión de asfalto envejecido en el asfalto virgen produjo alteraciones en las propiedades reológicas de este último, tales como aumento de la viscosidad (de 2000 P => a 2977 P), incremento de la temperatura del punto de ablandamiento (de 47,7 °C => a 72,1 °C) y disminución de la penetración (de 63_(1/10 mm) => a 24,8_(1/10 mm)) (figura 1).

Incidencia de Asfalto envejecido en ligante nuevo		
Parámetro		
Viscosidad	Penetración	Ablandamiento
2.977,9P	63 _(1/10mm)	72,1 C
↑ 49%	↓ 61%	↑ 51%
2.000P	24,8 _(1/10mm)	47,7 C

Figura 1. Efectos de la inclusión de asfalto envejecido en el asfalto virgen para cada uno de los parámetros analizados.

Fuente: El autor.

Incidencia del WEO en las mezclas de ligante

La inclusión de WEO en la mezcla de ligante produjo efectos contrarios a los inducidos por la adición de asfalto envejecido a la mezcla, permitiendo recuperar las propiedades reológicas de la mezcla de ligante a niveles comparables con una mezcla virgen. Produjo una disminución promedio de la viscosidad de un 49,3 % (de 2977 P_(weo0%) => a 382,9P_(weo15%)), disminución de la temperatura del punto de ablandamiento en promedio del 17,7 % (de 72,1 °C_(weo0%) => a 39,6 °C_(weo15%)) y un aumento en la penetración del 82,6 % (de 41_{(1/10 mm)(weo0%)} => a 147_{(1/10 mm)(weo0%)}). Los valores y el comportamiento detallado aparecen más adelante (figura 2).

Incidencia del WEO en las mezclas finales

La inclusión de WEO produjo cambios en las propiedades de las mezclas finales (ligante + agregados + RAP). En términos generales, a medida que se aumentó la concentración de WEO hasta alcanzar el 15 % se lograron mezclas con menores vacíos con aire (de 4,3 %_(weo0%) => a 3,7 %_(weo15%)), mezclas de menor rigidez con disminución de la estabilidad (de 8427 N => a 2348 N), del flujo (de 3,1_{mm(weo0%)} => a 2,6_{mm(weo15%)}) y de la relación estabilidad - flujo (de 2,7_(weo0%) => a 0,9 P_(weo15%)).

La resistencia a la tracción indirecta en seco, al igual que tras inmersión en agua y por consiguiente la resistencia conservada, también disminuyó (seco de 1,1 MPa_(weo0%) => a 0,2M Pa_(weo15%)), (húmeda de 0,9 MPa_(weo0%) => a 0,1 MPa_(weo15%)), (resistencia conservada de 83,1 %_(weo0%) => a 74,0 %_(weo15%)). Los valores y comportamiento detallado se presentan posteriormente (figura 3).

Incidencia del WEO en mezclas de Ligantes			
Parámetro	Inclusión de WEO		
	5%	10%	15%
Viscosidad	2.977,9P	1.757,0P	798,9P
	↓ 41%	↓ 55%	↓ 52%
Ablandamiento (°C)	72,1	52,6	45,1
	↓ 27%	↓ 14%	↓ 12%
Penetración (1/10mm)	41,0	87,9	147,8
	↑ 66%	↑ 114%	↑ 68%
	1.757,0P	798,9P	382,9P
	52,6	45,1	39,6
	24,8	41,0	87,9

Figura 2. Incidencia de la inclusión de WEO en las mezclas de ligantes (asfalto envejecido más asfalto virgen).

Fuente: El autor.

Incidencia del WEO en mezclas finales							
Parámetro	Inclusión de WEO			Parámetro	Inclusión de WEO		
	5%	10%	15%		5%	10%	15%
Vacíos con aire (%)	4,3	3,8	3,7	Tracción Indirecta Seca (MPa)	1,1	0,5	0,3
	↓ 12%	↓ 2%	↓ 8%		↓ 57%	↓ 41%	↓ 44%
Estabilidad (N)	3,8	3,7	3,4	Tracción Indirecta Húmeda (MPa)	0,9	0,4	0,2
	8.427	5.750	3.506		↓ 57%	↓ 45%	↓ 48%
Flujo (mm)	5.750	3.506	2.348	Resistencia Conservada	83,1	81,9	78,5
	3,1	2,8	2,7		↓ 1%	↓ 4%	↓ 6%
Relación Estabilidad/Flujo	2,7	2,0	1,3		81,9	78,5	74,0
	↓ 25%	↓ 35%	↓ 32%				
	2,0	1,3	0,89				

Figura 3. Incidencia de la inclusión de WEO en las mezclas finales.

Fuente: El autor.

MÓDULO RESILIENTE

Para determinar M_R se usó la norma BS EN 12697-26:2012, anexo C, evaluándose los efectos de la temperatura y de la velocidad de aplicación de carga (Invías, 2013), con el propósito de analizar la calidad relativa de los materiales, en este caso, las mezclas con los diferentes niveles de WEO.

Más adelante se aprecian los valores de M_R obtenidos para cada combinación de temperatura y frecuencia de aplicación de la carga utilizada, según el porcentaje de WEO contenido en cada mezcla (figura 4).

La alta rigidez que posee el RAP se ve disminuida en una mezcla caliente, lo que concuerda con las experiencias que se presentan en [6], [4], [15]. De acuerdo con los resultados encontrados, la cantidad de WEO que hay que usar para obtener un M_R similar al de una mezcla MDC-19 es del 5,9 %.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como era de esperarse, la incorporación del asfalto envejecido al asfalto original dio lugar a un aumento en la viscosidad y en la temperatura del punto de ablandamiento, con una disminución de la penetración. Sin embargo, con el incremento del WEO se generan los efectos contrarios: se obtiene un ligante menos viscoso y de menor consistencia. Lo anterior demuestra que con la inclusión de WEO se pueden conseguir unas propiedades cercanas a las de un asfalto original, sin envejecer. En cuanto a las propiedades de las mezclas [estabilidad y flujo, susceptibilidad al agua y módulo resiliente), se evidencia que al incluir WEO se disminuye la rigidez de la mezcla, que es finalmente uno de los inconvenientes medidos en las características mecánicas que presentan las mezclas asfálticas con RAP.

Por último, a partir de los modelos de regresión calculados para cada uno de los parámetros evaluados en las mezclas finales (agregados + RAP+ ligante + WEO), es posible determinar cuáles restringen el porcentaje de WEO que debe utilizarse para obtener una mezcla tipo MDC-19, de acuerdo con las especificaciones generales de construcción de carreteras, descritas en el Artículo 450-13 del Invías.

Posteriormente, se presenta el consolidado de los valores óptimos calculados para cada parámetro analizado; se aprecia que los parámetros que restringen la cantidad de WEO que es posible adicionar son la

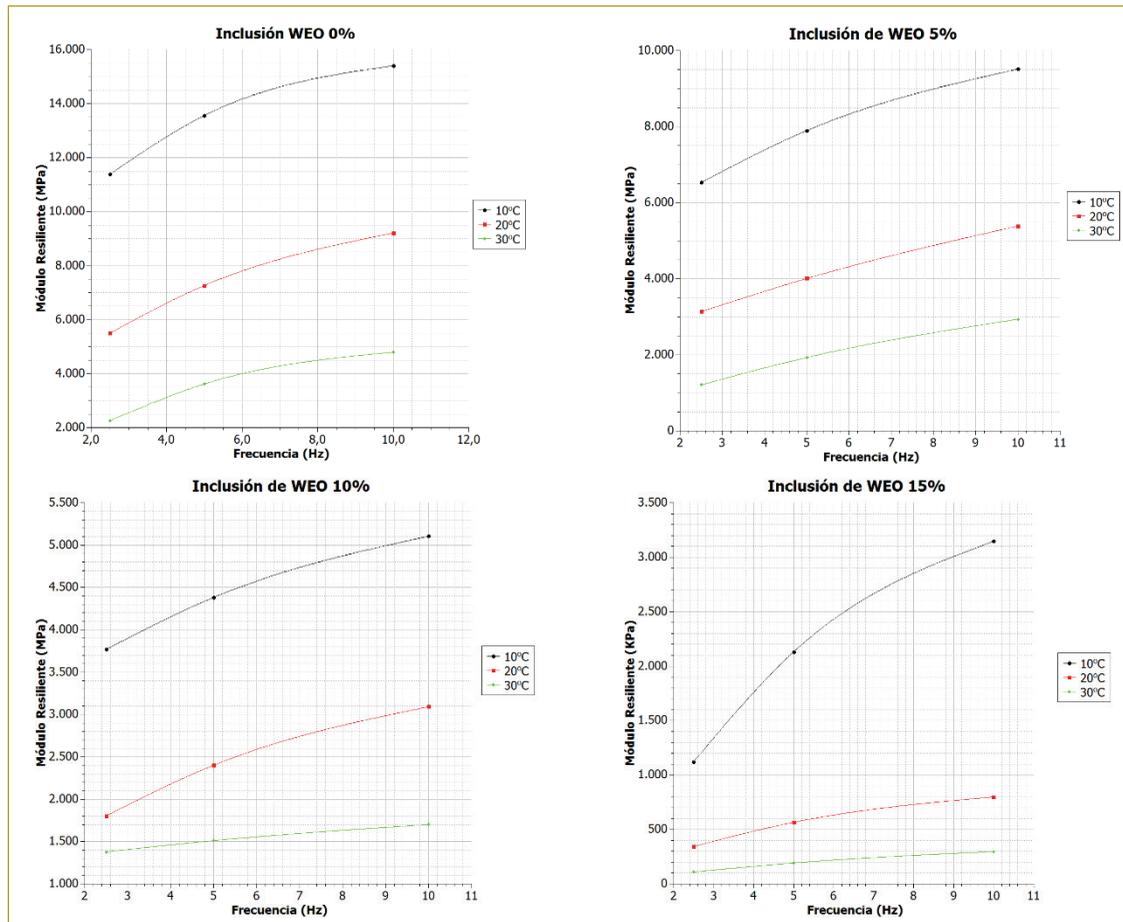


Figura 4. Módulos resilientes para la mezcla con diferentes porcentajes de inclusión de WEO.

Fuente: El autor.

relación estabilidad-flujo y la penetración del ligante. Así, para este caso particular de ligantes y agregados, el porcentaje admisible de WEO se encuentra entre 5,4 y 5,7 (figura 5).

CONCLUSIONES

Como era de esperar, la adición de asfalto envejecido al asfalto nuevo produjo alteraciones en las propiedades analizadas. La viscosidad de la mezcla de ligantes y su punto de ablandamiento aumentaron, mientras que la penetración disminuyó.

La adición de WEO en las mezclas de ligante (asfalto nuevo y asfalto envejecido) modificó las magnitudes de todas las propiedades, en forma inversa al efecto producido por la presencia del asfalto envejecido, lo que permitió alcanzar valores compatibles con un ligante compuesto únicamente con asfalto virgen.

Se encontró que de las mezclas analizadas, aquella que más se aproxima a las especificaciones que aparecen en el art. 450-13, cap. 4. Especificaciones generales de construcción de carreteras del Invías para la categoría de tránsito NT1, es la que contiene 5,0 % de WEO. Sin embargo, dados los modelos de regresión para cada parámetro analizado, en este caso particular, la concentración de WEO que es posible usar para obtener una mezcla tipo MDC-19 se encuentra en el rango de 5,4 y 5,7 %.

Cabe señalar que la temperatura de mezcla definida para este rango de WEO es de 157 °C, la cual se encuentra cercana al punto de inflamación de este producto (163 °C). Sin embargo, teniendo en cuenta el bajo porcentaje de este material en la mezcla total (0,3 %), se considera que los riesgos de inflamación son reducidos o prácticamente inexistentes.

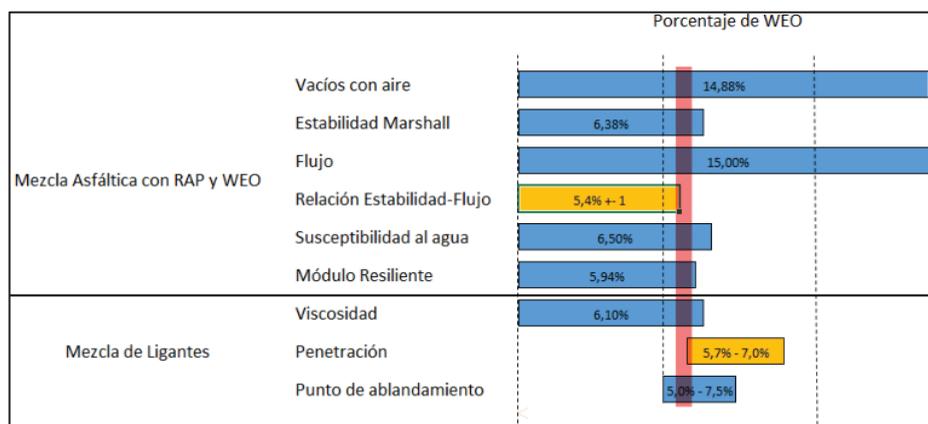


Figura 5. Porcentajes de WEO óptimo para adicionar a mezclas con RAP, de acuerdo con cada parámetro evaluado.

La franja roja indica el intervalo en términos de porcentaje de adición de WEO en los que se encuentra el punto óptimo.

Fuente el autor.

Aunque todas las mezclas de asfaltos (nuevo y envejecido) y WEO según su viscosidad quedan catalogados con grado de penetración 40-50, solo las que contienen WEO en porcentajes de 5% y 10% permiten obtener mezclas que cumplen con la penetración y punto de ablandamiento correspondiente a grados de penetración 40-50 y 80-100 respectivamente. Para obtener una mezcla con grado de penetración 60-70 sería necesario adicionar proporciones de WEO entre 5,7% y 7,0%.

Todas las mezclas con inclusiones de WEO presentan valores de módulo resiliente por debajo de 10.000 MPa.

En otros trabajos se había reportado límites de adición del 30% como es el caso de [16], es posible que esta grande variación se deba a las características del tipo de aceite, estado del RAP y calidad de los agregados utilizados.

Considerando las cantidades generadas de WEO en el departamento del Tolima, y su posible uso como agente rejuvenecedor para mezclas asfálticas con RAP (también reciclado), la combinación WEO + RAP se convierte en una alternativa que contribuye a la solución del problema de mantenimiento y/o construcción de buena parte de malla vial. Con esto, se quiere aportar una alternativa para el uso efectivo del RAP en Colombia, obteniendo un material apto para ser reutilizado en capas intermedia en la realización de proyectos de mantenimiento y conservación de vías secundarias y terciarias a menor costo, contribuyendo además a la

conservación de los recursos naturales y a la disminución del impacto ambiental.

REFERENCIAS

- [1] Fedesarrollo (s.f.). "Indicadores del sector del transporte en Colombia, p. 234.
- [2] ARRA (2013). *Basic Asphalt Recycling Manual*, 53 (9).
- [3] Bernucci, L. B., Augusto, J., Ceratti, P., Barbosa, J., Laura, S., Goretti, M. & Motta, D. (2008). *Pavimentação Asfáltica*.
- [4] Dedene, C. D. (2011). Investigation of using waste engine oil blended with reclaimed asphalt materials to improve pavement recyclability. Michigan Technological University.
- [5] Jia, X., Huang, B., Bowers, B.F. & Zhao, S. (2014). Infrared spectra and rheological properties of asphalt cement containing waste engine oil residues. *Constr. Build. Mater.*, 50, 683-691.
- [6] Kamaruddin, N. H. M., Hainin, M. R., Hassan, N. A., Abdullah, M. E. & Yaacob, H. (2014). Evaluation of pavement mixture incorporating waste oil. *J. Teknol.*, 71 (3), 93-98.
- [7] DeDene, C. D. & You, Z. (2014). The performance of aged asphalt materials rejuvenated with waste engine oil. *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 7 (2), 145-152.
- [8] Zaumanis, M., Mallick, R. B., Poulidakos, L. & Frank, R. (2014). Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. *Comput. Chem. Eng.*, 71, 538-550.
- [9] Dedene, C. D. (2011). Investigation of using waste engine oil blended with reclaimed asphalt materials to improve pavement recyclability by submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (Civil Engineering) Michigan Technological Unive.
- [10] Invías (2013). *Inv-E-733-13. Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficie seca*.
- [11] Invías (2013). *Normas de ensayo de materiales para carretera. INV. E - 736 - 13. Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas*. Bogotá (Colombia).

[12] Invías (2013). *Normas de ensayo de materiales para carretera. INVE - 748 - 13 (2013). Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall*. Bogotá (Colombia).

[13] Invías (2013). *Normas de ensayo de materiales para carretera. INVE - 725 - 13 (2013). Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta*. Bogotá (Colombia).

[14] Invías (2013). *Normas de ensayo de materiales para carretera. INVE - 749 - 13. Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas*. Bogotá.

[15] Kamaruddin, N. H. M., Hainin, M. R., Hassan, N. A. & Abdullah, M. E. (2014). Rutting Evaluation of Aged Binder Containing Engine Oil. *Adv. Mater. Res.*, 91, 405-409.

[16] King, K., Holleran, I., Jayalath, C., Henning, T. F. P. et al. (2015). Laboratory performance of rejuvenated asphalt surfacing mixtures containing 30 % RAP. *Road Transp. Res. A J. Aust. New Zeal. Res. Pract.*, 24 (4), 3.

Comparación de impactos ambientales entre las alternativas de corte - relleno y viaducto, para la construcción de carreteras: revisión de un caso de estudio

Comparison of environmental impacts between cut - fill and viaduct alternatives for road construction: Case study review

LUIS ALEJANDRO GONZÁLEZ CAMARGO¹ - MARÍA CAROLINA ROMERO PEREIRA²

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medioambiente de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Ingeniera civil de la Pontificia Universidad Javeriana. M.Sc.(e) en Ingeniería Ambiental y Gerencia de Proyectos de la Universidad de Leeds. Profesora de planta de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

luis.gonzalez-ca@mail.escuelaing.edu.co - maria.romero@escuelaing.edu.co

Recibido: 18/07/2017 Aceptado: 02/08/2017

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

Resumen

En este artículo se hace una comparación entre los resultados de la evaluación de los impactos ambientales (EvIA) de dos alternativas de construcción de carreteras, corte-relleno y viaducto, a partir del análisis de un caso de estudio. La evaluación de la primera alternativa (corte-relleno) corresponde a la EvIA real, realizada por el consultor de los estudios y diseños del caso de estudio analizado. Para la segunda alternativa se propuso un diseño de viaducto, a partir del cual se hizo la EvIA siguiendo la misma metodología empleada por el consultor, que se fundamenta en la propuesta de Conesa - Fernández, utilizando únicamente resultados cualitativos. Como resultado, se concluye que cada alternativa tiene diferentes ventajas y desventajas desde el punto de vista ambiental y la mejor alternativa dependerá de las condiciones del entorno afectado y zonificación ambiental de cada proyecto.

Palabras claves: evaluación de impactos ambientales, diagnóstico ambiental de alternativas, evaluación comparada de impactos ambientales, viaducto, análisis de sensibilidad.

Abstract

This paper shows the comparison between the results of the environmental impact assessment (EvIA), of two options for building roads; a traditional one developed through cuts and fills and another one developed through viaducts in the entirety of its route from a case study. The evaluation of the first alternative (cut-fill) corresponds to the real EvIA, conducted by the consultant of the studies and designs of the case study analyzed. For the second alternative a design of the viaduct was proposed, from which the EvIA was done, following the same methodology used by the consultant, which is based on the proposal of Conesa - Fernández, using only qualitative results. As a result, it is concluded that each alternative has different advantages and disadvantages from an environmental point of view and the best alternative will depend on the conditions of the affected environment and the environmental zoning of each project.

Keywords: Environmental Impact Assessment, Environmental Assessment of Alternatives, comparative assessment of environmental impacts, Viaduct, sensitivity analysis.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de los proyectos viales en Colombia se han desarrollado implementando sistemas constructivos tipo corte - relleno, combinados con puentes y en algunos casos, con túneles. Si bien la mejor opción ambiental sólo puede determinarse mediante el análisis multidisciplinario e integrado de los factores ambientales y socioeconómicos, la evaluación comparada de los impactos ambientales en términos de demanda de recursos naturales y generación de contaminantes podría indicar la importancia de considerar esquemas de construcción alternativos a los tradicionales en el país.

En este artículo se busca destacar la trascendencia de hacer la evaluación de impactos ambientales (EvIA) comparando diferentes esquemas constructivos en proyectos viales en Colombia, mediante el análisis de dos alternativas constructivas para un caso de estudio específico.

El caso objeto de estudio corresponde a la construcción de una vía cuyo objeto es comunicar el nuevo casco urbano de una población en Colombia, que hubo que reasentar, con una vía departamental. Este corredor está compuesto por dos tramos: uno de entrada a la población, de 9,4 km, y otro de salida, de 2,5 km [1].

La primera alternativa analizada corresponde al diseño real de la vía objeto de estudio, con un sistema constructivo corte-relleno. Como alternativa de comparación se seleccionó la construcción de un viaducto, partiendo del supuesto de que mediante esta alternativa se podrían reducir impactos asociados a movimientos de tierras, pérdida de cobertura vegetal, afectación de corrientes naturales, fragmentación de hábitats y pérdida de corredores biológicos, entre otros [2]. Para este fin, se planteó el diseño de un viaducto, conservando un trazado similar al de la alternativa de corte-relleno y partiendo de la suposición de la misma área de influencia y zonificación ambiental contenidos en el estudio de impacto ambiental (EsIA) real, para ambos casos.

La EvIA de la alternativa de viaducto se realizó siguiendo la metodología empleada en el EsIA real del caso de estudio, que corresponde a la de Conesa - Fernández, modificada por la Universidad de Cartagena. La evaluación comparada de impactos ambientales se hizo únicamente para la etapa de construcción de las alternativas objeto de estudio, incluyendo la valoración cualitativa de impactos ambientales y un análisis de la demanda de recursos naturales.

La valoración de impactos ambientales para la alternativa planteada se efectuó a partir de información secundaria, revisando en forma cuidadosa el EsIA existente para la alternativa corte-relleno, con el fin de identificar juicios, criterios y escalas de valoración. Se hizo un análisis de sensibilidad de la EvIA realizada, en el que se analizaron diferentes escenarios de valoración para aquellos casos en los que se identificó un mayor grado de subjetividad [3]. Los impactos con mayor grado de incertidumbre (por no tener suficiente información o antecedentes) se calificaron en el escenario más crítico, por el principio de precaución de la gestión ambiental [4].

Como resultado de la comparación de la EvIA se encontró que la alternativa en viaducto resulta ser más respetuosa con los medios biótico y abiótico, debido a la reducción de necesidades en cuanto a retiro de cobertura vegetal, tala de árboles, movimiento de tierras, cortes, utilización de materiales granulares y mezclas asfálticas. No obstante, la alternativa de viaducto demanda casi seis veces más concreto y nueve veces más acero que la alternativa de corte-relleno. Se concluye que cada alternativa tiene diversas ventajas y desventajas desde el punto de vista ambiental, y la mejor alternativa dependerá de las condiciones del entorno afectado y de la zonificación ambiental de cada proyecto. Por lo tanto, vale la pena incorporar la evaluación comparada de impactos ambientales para diferentes procedimientos constructivos en el diagnóstico ambiental de alternativas de los proyectos viales.

RESULTADOS

Descripción del caso de estudio

El área seleccionada para el reasentamiento de la población es de vocación agrícola y no ha sufrido otras alteraciones. Así, carece de la infraestructura de transporte y de servicios públicos necesarios para atender una población de 4532 habitantes para el año 2039 [5].

El primer tramo (tramo 1 en la figura 1) comprende 9,4 km y corresponde a la conexión de la vía departamental (907 msnm) con el lote donde se desarrollará el nuevo casco urbano de la población (1412 msnm). El segundo tramo (tramo 2 en la figura 1) comprende 2,5 km y corresponde a la conexión (1482 msnm) entre el lote donde se desarrollará el nuevo casco urbano de la población y el punto donde se vuelve a tener conexión

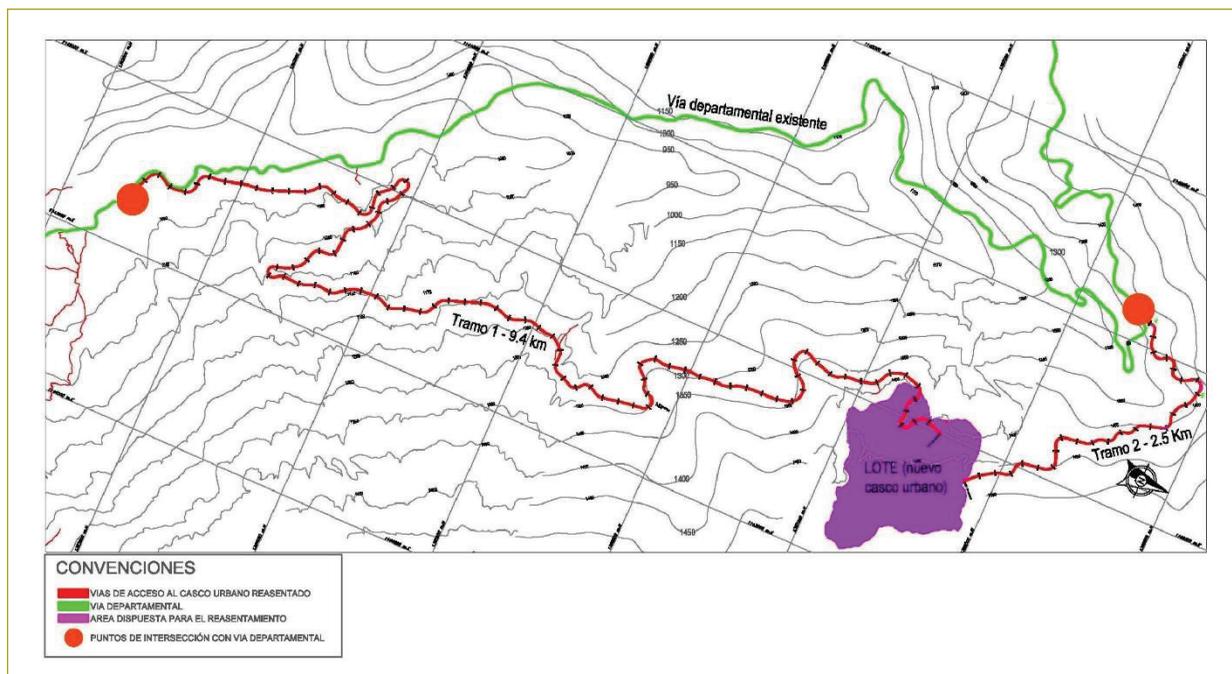


Figura 1. Localización del casco urbano y de la vía departamental existente que se va a conectar mediante el corredor vial objeto de análisis.

Fuente: Consultor de los estudios y diseños del caso de estudio.

con la vía departamental (1344 msnm), de acuerdo con el objeto del proyecto.

Descripción de la alternativa corte - relleno

El corredor vial que se hará corresponde a una alternativa de construcción tradicional de corte - relleno. Dado el tipo de terreno en el cual se desarrolla (montañoso escarpado), se presentan tres tipos de secciones transversales, incluyendo secciones en relleno, secciones en corte y secciones mixtas.

Con el fin de garantizar el confinamiento y la estabilidad de la banca de la vía proyectada, en especial en las secciones mixtas de corte y relleno, el diseño existente incluyó muros de contención en concreto reforzado en una longitud de 1,07 km, en algunos casos cimentadas sobre pilotes tipo *caisson*, complementados por anclajes. Para la construcción de los tramos de la vía objeto de estudio se requerirá un total de **260** pilotes, con profundidades que varían entre **8** y **14** metros [6].

Dado el volumen de material de excavación sobrante que resulta de la construcción de la alternativa (450.000 m³), ésta requiere cinco zonas de depósitos para el manejo de escombros (Zodme), con una capacidad

total de 482.558 m³. Las principales características de esta alternativa se resumen a renglón seguido (tabla 1).

Tabla 1

Características principales de la alternativa corte - relleno

Descripción	Resultado
Longitud	11,9 km
Volumen de corte	451.161,30 m ³
Volumen de relleno	123.797,26 m ³
Número de puentes	9
Longitud total de puentes	410 m
Número de obras de drenaje	58
Número Zodme	5
Longitud de conformación de taludes	9,79 km
Longitud de taludes en terraplén	2,29 km
Longitud de estructuras de contención	1,07 km
Cruces de fuentes hídricas	9
Estructuras tipo <i>box coulvert</i>	7
Disipadores de energía	4

Fuente: Consultor de los estudios y diseños del caso de estudio, 2014.

Tabla 2
Resultados principales de la alternativa en viaducto

Descripción	Resultado
Longitud total	9,60 km
Volumen de corte	4.184,65 m ³
Volumen de excavación para fundación de estructuras	56.274,10 m ³
Número de pilas	84
Luz entre pilas	100 m
Altura de pilas	Entre 6 y 76,5 m
Altura promedio de pilas	27,45 m
Tipo de cimentación	Profunda (5,6 m - 30 m), mediante <i>caisson</i>
Tipo de vigas	Tipo cajón en concreto postensado
Superestructura	Losa superior - Vigas tipo cajón - Viga cabezal
Número de Zodme	1

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Planteamiento de la alternativa de viaducto

El diseño de la alternativa de viaducto se planteó manteniendo los puntos de conexión con la población y con un trazado similar al de la alternativa de corte-relleno. De acuerdo con los resultados del diseño, para la construcción de esta alternativa sólo se requiere un Zodme, con una capacidad de 181.000 m³. En la tabla anterior se resumen las características principales de la alternativa de viaducto, conforme a los resultados del diseño planteado (tabla 2).

Demanda de recursos naturales

Con el objeto de obtener elementos adicionales para la EvIA comparada de las dos alternativas, se calculó la demanda de recursos naturales para la construcción de cada una. A continuación se presenta un resumen de resultados de la demanda de recursos naturales.

Como resultado se encontró que la construcción de la alternativa corte-relleno demanda 35 veces más agua, 67 veces más materiales granulares y el doble de mezcla asfáltica con respecto a la alternativa de viaducto, mientras que la construcción de la alternativa de viaducto demanda casi 6 veces más concreto y 9 veces más acero que la alternativa de corte-relleno. El número de especies arbóreas afectadas por la construcción de la alternativa de corte relleno es significativamente mayor con respecto a la alternativa de viaducto, con 2741 y 191 especies afectadas, en ese orden.

Tabla 3
Comparación de demanda de recursos naturales y materiales de construcción

Recurso/material	Corte relleno	Viaducto
Agua (m ³)	55.520	1567
Excavación (m ³)	451.161	61.089
Materiales granulares (m ³)	123.797	1837
Concreto (m ³)	28.862	157.894
Mezcla asfáltica (m ³)	6996	3450
Acero (ton)	1.508.098	13.363.423
Árboles afectados (uds.)	2741	191

Fuente: Elaboración propia, 2017. Datos para la alternativa de corte-relleno tomados del estudio de diseño existente.

Área de influencia y zonificación ambiental

Teniendo en cuenta que el trazado de la alternativa de corte y relleno no difiere ampliamente del trazado de la alternativa de viaducto planteada, se presume que el área de influencia es la misma para las dos alternativas constructivas.

Así mismo, se tomó la zonificación ambiental establecida en el EsIA existente, la cual se desarrolló en tres pasos: determinación de unidades de zonificación, criterios de zonificación por sensibilidad de las unidades y categorías de intervención. Como resultado de esto, se definieron tres áreas de zonificación ambiental (figura 2).

- **Áreas de no intervención.** Zonas de muy alta sensibilidad. Incluye zonas donde se encuentran na-

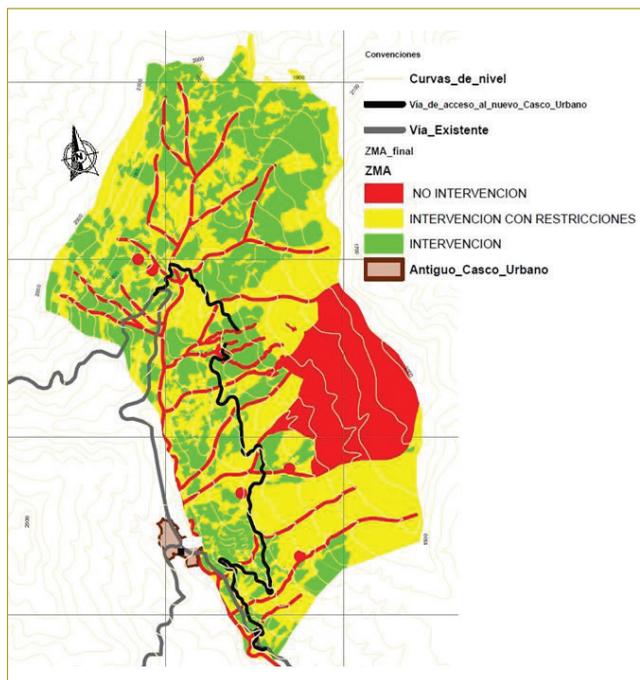


Figura 2. Zonificación ambiental del proyecto.

Fuente: Consultor de estudios y diseños del caso de estudio.

cederos de fuentes hídricas, zonas de reserva natural y rondas hídricas. Corresponde a 791 ha dentro del área de influencia, que representan un 21,3 % del AID del proyecto.

- **Áreas de intervención con restricciones.** Zonas de alta y media sensibilidad, que incluyen bosques y zonas de vegetación natural, zonas de interés arqueológico, zonas de alta amenaza (local) y zonas con

presencia de viviendas o instituciones. Corresponde a 1716 ha dentro del área de influencia, que representan un 46,3 % del AID del proyecto.

- **Áreas de intervención.** Zonas de baja sensibilidad, incluyendo zonas de producción económica y el perímetro del área de construcción del casco urbano para el reasentamiento. Corresponde a 1200 ha dentro del área de influencia, que representan un 32,4 % del AID del proyecto.

Metodología empleada para la EvIA

En el EsIA existente se utilizó una metodología elaborada por Alejandrina Vanegas, con adaptaciones de la Universidad de Cartagena. Esta metodología se fundamenta en la propuesta de Conesa - Fernández, la cual se basa a su vez en el método de las matrices “causa - efecto”, utilizando resultados cualitativos que siguen la metodología de Leopold, y resultados cuantitativos basados en la metodología del Instituto Batelle - Columbus [7]. No obstante, la metodología empleada en la EvIA existente no incluye valoración cuantitativa.

Una vez obtenida la matriz causa - efecto en la identificación de impactos ambientales, se conforma la matriz de importancia, donde se realiza la valoración cualitativa en función de los atributos del impacto ambiental, para cada una de las casillas de cruce en las que existen relaciones actividad - impacto. Esto se hace a partir de la valoración de los atributos del impacto ambiental presentados a continuación (tabla 4). Dado

Tabla 4
Criterios, escalas y rangos de valoración de impactos.

Criterio	Escala de valoración
Extensión (Ex). Mide el impacto, según su extensión en el entorno considerado.	Puntual: 1; Parcial: 2; Extensa: 4
Momento (Mo). Tiempo transcurrido entre la ejecución de la actividad y el de manifestación del impacto.	Largo plazo: 1; Mediano plazo: 2; Inmediato: 4
Reversibilidad (Rv). Posibilidad de recuperación del elemento afectado por una actividad, recuperando sus condiciones iniciales por medios naturales.	Corto Plazo: 1; Mediano plazo: 2; Irreversible: 4
Recuperabilidad (Mc). Posibilidad de un elemento para recuperar sus condiciones iniciales por medio de la intervención humana.	Inmediata: 1; Mediano plazo: 2; Irrecuperable: 4
Sinergia (Si). Se presenta cuando el impacto de dos acciones que actúan simultáneamente es mayor que el provocado en forma independiente.	Sin sinergismo: 1; Sinérgico: 2; Muy sinérgico: 4
Acumulación (Ac). Se refiere al incremento progresivo de la manifestación del impacto, cuando se repite en forma continua la acción que lo genera.	Simple: 1; Acumulativo: 4
Efecto (Ef). Tipo de manifestación del efecto sobre un elemento como consecuencia de una actividad.	Indirecto o secundario: 1; Directo o primario: 4
Periodicidad (Pr). Indica la manifestación del efecto en el tiempo si es cíclica (periódico), impredecible (irregular) y concertante (continuo).	Irregular discontinuo: 1; Periódico: 2; Continuo: 4

Fuente: Consultor de estudios y diseños del caso de estudio, 2014.

que en el EsIA existente los rangos para la asignación de valores no se especifican, para la EvIA de la alternativa en viaducto éstos se asumieron buscando consistencia con las valoraciones del EsIA existente.

La ecuación por medio de la cual se establece la importancia del impacto (II) es la siguiente [1]:

$$\text{Ecuación 1. Cálculo de la importancia del impacto} \\ II = (Ex + Mo + Rv + Si + Ac + Ef + Pr + Mc)$$

Para clasificar los impactos negativos según su importancia, se utilizan estos rangos (tabla 5).

Tabla 5

Clasificación de impactos negativos por su importancia

Clasificación	Rango*
Severo	> 75 %
Significativo	50 – 75 %
Moderado	25 – 50 %
Leve o bajo	0 – 25 %

* Con respecto a la máxima probable por actividad en el componente.

Fuente: Consultor de estudios y diseños del caso de estudio, 2014.

EvIA para los diferentes escenarios

- **EvIA sin proyecto.** En la EvIA del escenario “Sin proyecto”, hecha en el EsIA existente [1], se tuvieron en cuenta las actividades que la población dentro del AID realiza de manera cotidiana para su desarrollo social, cultural y económico, incluyendo actividades asociadas a los sectores de agricultura, ganadería, vivienda, institucional, educación, salud, recreación y deporte, así como captación de aguas, ocupación de cuerpos de agua y piscicultura. También se contempló una actividad impactante, denominada eventos naturales por activación de procesos geológicos. En el EsIA existente se identificaron 29 potenciales impactos asociados a estas actividades (tabla 6), tarea hecha por un equipo interdisciplinario que tuvo a su cargo los estudios y diseños del caso de estudio.
- **EvIA alternativa corte-relleno.** La EvIA existente de la alternativa corte - relleno se realizó a partir de las siguientes actividades asociadas a la etapa de construcción [1]: a) Descapote y remoción de vegetación; b) Transporte y acopio de materiales de construcción y de materiales sobrantes; c) Movimiento de tierras

(cortes, rellenos y compactación); d) Disposición de material sobrante de excavación y de descapote en sitios de disposición (Zodme); e) Construcción de obras de arte (muros, cunetas, protección de taludes o banca); f) Producción, colocación y transporte de concreto hidráulico (rígido) y asfáltico; g) Empradización; h) Pintura, colocación de barandas y señalización horizontal y vertical; i) Limpieza y entrega final. Los impactos ambientales considerados para este escenario fueron los mismos que se tomaron en cuenta para el escenario sin proyecto.

- **EvIA alternativa en viaducto.** Al igual que en la alternativa corte - relleno, para la EvIA de la alternativa de viaducto se partió de la identificación de las actividades asociadas a la etapa de construcción, a saber: a) Localización y replanteo; b) Instalación de campamentos, adecuación de zonas de acopio y talleres; c) Movimientos de tierras - cortes; d) Excavación para cimentación; e) Construcción de pilotes tipo *caisson*; f) Construcción de dados en concreto; g) Construcción de columnas en concreto; h) Construcción de estribos; i) Conformación de rellenos estructurales en material granular; j) Construcción de vigas cabezal; k) Construcción y montaje de vigas postensadas; l) Construcción de vigas riostra; m) Construcción de tablero superior; n) Fabricación y colocación de baranda metálica; ñ) Colocación de la capa de rodadura en mezcla asfáltica; o) Instalación de señalización horizontal y vertical.

En el ejercicio realizado se identificaron dos impactos que no estaban contemplados en la alternativa corte-relleno, incluyendo cambios en la forma del relieve sobre el componente suelo y cambios en el régimen de escorrentía superficial sobre el componente agua. De acuerdo con el criterio del autor, estos impactos también están asociados a la construcción de la alternativa corte-relleno; por lo tanto, para efectos del análisis comparativo de EvIA se adicionó su valoración a las matrices de evaluación para los escenarios sin proyecto y corte-relleno.

La valoración de los impactos ambientales para esta alternativa se realizó a partir de información secundaria, haciendo una cuidadosa revisión del EsIA existente, con el fin de identificar juicios, criterios y escalas de valoración.

- **Tratamiento de incertidumbres - alternativa en viaducto.** Se realizó un análisis de sensibilidad, en el que se estudiaron diferentes escenarios de valoración para aquellos casos en los que se identificó un mayor grado de subjetividad [3], incluyendo: a) afectación del paisaje; b) conflicto con la comunidad; c) generación de expectativas. Los impactos correspondientes a cambios en las formas del relieve y cambios en la escorrentía superficial, desde un punto de vista técnico, no tienen un alto nivel de subjetividad. Sin embargo, al ser impactos adicionados a la lista de impactos de la EvIA original, no se encontraron suficientes referencias para su valoración, por lo que se decidió incluirlos en este análisis.

Los impactos con mayor grado de incertidumbre fueron calificados en el escenario más crítico, por el principio de precaución de la gestión ambiental [4]. El análisis comparativo de resultados se hizo teniendo en cuenta la EvIA resultante del tratamiento de incertidumbres. La matriz resultante de EvIA para los tres escenarios descritos se presenta en la página siguiente 6 (se excluyen los impactos en los que su clasificación resultó igual para los tres escenarios) (tabla 6).

Análisis comparativo de EvIA

- **Medio abiótico.** De acuerdo con los resultados obtenidos, los potenciales impactos sobre el medio abiótico podrían ser más significativos en el escenario de la alternativa corte-relleno, encontrando las mayores diferencias en los grados de afectación en la alteración de la calidad del aire, alteración de los niveles de ruido y generación de inestabilidad. Esto se debe a que para la alternativa corte-relleno se requiere realizar obras de estabilización en un 80 % del corredor vial, aumentando además el riesgo de generación de inestabilidad y demandando el uso de maquinaria con producción de altos niveles de ruido y grandes cantidades de material particulado. Por su parte, la alteración de las formas del relieve resultan ser moderadas en ambos casos. No obstante, para el caso de la alternativa en viaducto esta afectación podría ser leve, considerando que este impacto se valoró como moderado, dado el resultado del análisis de sensibilidad, en el que se decidió tomar en cuenta el escenario más crítico posible.

Los potenciales impactos relacionados con los cambios en el uso del suelo y la alteración de las propiedades fisicoquímicas de éste serían similares en ambos casos. Los impactos asociados a la generación de procesos erosivos serían más significativos para el caso de la alternativa de corte-relleno, por la naturaleza de las obras requeridas.

Según los resultados de la demanda de recursos naturales, para la construcción de la alternativa de viaducto se requeriría una Zodme con una capacidad de 61.000 m³, mientras que la alternativa corte-relleno demanda 5 Zodme con una capacidad total de 483.000 m³. Este volumen es casi 8 veces mayor que el requerido para la construcción de la alternativa de viaducto. Desde el punto de vista de gestión de residuos sólidos (RS) y de acuerdo con la jerarquía de opciones ambientales de la EPA, la opción más deseada es la eliminación en la fuente [8], por lo que la generación de escombros en una cuantía significativamente inferior constituye una ventaja para la alternativa en viaducto. En cuanto a requerimientos de materiales, la construcción de la alternativa corte-relleno demanda 67 veces más materiales granulares con respecto a la alternativa de viaducto, en tanto que la construcción de esta última demanda casi seis veces más concreto y nueve veces más acero que la alternativa de corte-relleno.

En cuanto a la hidrología, se encuentran algunos potenciales impactos moderados asociados a la alternativa corte-relleno, incluyendo alteración del régimen de caudales y alteración del régimen sedimentológico, mientras que para la alternativa en viaducto estos impactos serían leves. Los cambios generados en la escorrentía superficial serían significativos para el caso de la alternativa corte-relleno, en tanto que para el caso de la alternativa en viaducto esta afectación podría ser moderada e incluso leve, teniendo en cuenta que este impacto se valoró como moderado, dado el resultado del análisis de sensibilidad.

En ninguno de los dos casos se prevén impactos significativos asociados a la alteración de los cuerpos hídricos o cambios en su calidad, debido a que no se contemplan modificaciones o afectaciones directas en los cauces. No obstante, según el análisis de la demanda de RN, la construcción de la alternativa corte-relleno demanda 35 veces más agua que la alternativa de viaducto, lo cual podría llegar a ser significativo para proyectos en los que el acceso a este recurso sea limitado.

Tabla 6
Clasificación de la importancia negativa de impactos del escenario “Sin proyecto” y las alternativas corte - relleno y viaducto

Medio	Componente	N.º	Impacto	Sin proyecto	Corte - relleno	Viaducto
ABIÓTICO	AIRE	1	Alteración de la calidad del aire	Leve	Significativo	Leve
		2	Alteración de los niveles de ruido	Leve	Significativo	Moderado
	SUELO	3	Cambio de uso del suelo	Leve	Moderado	Moderado
		4*	Cambios en las formas del relieve	Leve	Moderado	Moderado
		5	Generación de Inestabilidad	Moderado	Significativo	Leve
		7	Generación de procesos erosivos	Moderado	Moderado	Leve
	AGUA	8	Cambios en la calidad del agua	Leve	Moderado	Moderado
		9*	Cambios en la escorrentía superficial	Leve	Significativo	Moderado
		10	Alteración del régimen de caudales	Leve	Moderado	Leve
		11	Alteración del régimen sedimentológico	Leve	Moderado	Leve
BIÓTICO	FAUNA	13	Pérdida de fauna	Leve	Significativo	Moderado
		14	Fragmentación de hábitats y pérdida de corredores biológicos	Moderado	Significativo	Leve
		16	Afectación a especies endémicas, amenazadas, vedadas y de importancia ecológica, económica o cultural	Leve	Moderado	Leve
	FLORA	17	Pérdida de cobertura vegetal	Moderado	Significativo	Leve
		18	Fragmentación de hábitats	Moderado	Significativo	Leve
		19	Afectación del paisaje	Moderado	Significativo	Significativo
		20	Afectación a especies endémicas, amenazadas, vedadas y de importancia ecológica, económica o cultural	Moderado	Moderado	Leve
	SOCIAL	26	Generación de riesgos de accidentes	Leve	Significativo	Severo
		27	Conflicto con la comunidad	Leve	Significativo	Severo
		28	Generación de expectativas	Leve	Significativo	Severo
31		Afectación al patrimonio arqueológico	Moderado	Moderado	Leve	

* Impactos adicionados a la EvIA de los tres escenarios, para el análisis comparativo de impactos ambientales.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del EsIA real (sin proyecto y corte-relleno) y de la EvIA realizada para la alternativa de viaducto.

En cuanto a la hidrogeología, podría esperarse que la afectación sobre el recurso hidrogeológico sea superior para una alternativa de viaducto, teniendo en cuenta las profundidades requeridas en la conformación de cimentaciones. En este caso no se encontró la existencia de formaciones de acuíferos a lo largo del corredor, pero para proyectos en los que existan formaciones potencialmente afectadas, la afectación sobre este recurso podría ser decisiva.

- **Medio biótico.** La afectación sobre el medio biótico es mínima para la construcción de la alternativa de viaducto, al compararse con la alternativa corte -

relleno. Esto se debe a que el área de intervención sobre el suelo de esta última es de 29,2 ha, mientras que la alternativa de viaducto requiere la intervención de 5,67 ha de suelo, implicando una reducción del 80,6 % de área intervenida. En el escenario sin proyecto, el medio biótico se encuentra impactado por actividades de agricultura y ganadería, mientras que el medio abiótico se encuentra impactado por eventos naturales que activan procesos geológicos.

Los potenciales impactos asociados a la pérdida de fauna, pérdida de cobertura vegetal y fragmentación de hábitats resultan significativos para el caso de la alter-

nativa corte-relleno, mientras que para la alternativa en viaducto resultan leves. La remoción de capa vegetal y los movimientos de tierras hacen que los impactos sobre el medio biótico sean más significativos para la alternativa corte-relleno, encontrando cinco impactos con esta clasificación dentro del medio biótico, mientras que para la alternativa en viaducto sólo se encuentra un potencial impacto significativo. No obstante, este último está asociado a la afectación del paisaje, cuya valoración es el resultado de suponer el escenario más crítico por el alto grado de subjetividad en su valoración.

La afectación de especies amenazadas y endémicas resulta ser mayor para el caso de la alternativa corte-relleno. De hecho, de acuerdo con el análisis de la demanda de RN, la cantidad de especies arbóreas afectadas por la construcción de la alternativa de corte relleno podría ser significativamente mayor con respecto a la alternativa de viaducto, con 2741 y 191 especies afectadas, respectivamente.

Considerando la zonificación ambiental del proyecto, se encuentra que en la alternativa en viaducto, el impacto sobre las zonas catalogadas como de “no intervención” e “intervención con restricciones” es menor, ya que el retiro de cobertura vegetal y la tala de árboles es mínima (solamente se requieren en los puntos de cimentación).

En general, desde el punto de vista de afectación sobre el medio biótico, la alternativa en viaducto resulta menos impactante. Para el caso de estudio, al revisar los usos actuales del suelo en la caracterización del AID, se encuentra que los tramos que hay que intervenir en su mayoría corresponden a zonas de uso agrícola y agropecuario, por lo que los ecosistemas del AID se encuentran modificados. Esta diferencia podría ser más significativa para proyectos situados en zonas en las que existan ecosistemas sin modificar o donde sea deseable reducir la afectación de éstos.

- **Medio socioeconómico.** Los impactos potenciales más significativos para las dos alternativas analizadas corresponden a la generación de conflictos con la comunidad, generación de expectativas y generación de riesgos de accidentes. De acuerdo con los resultados de la EvIA, estos impactos podrían ser significativos para la alternativa de corte-relleno y severos para la alternativa en viaducto. No obstante, esta diferencia podría deberse a que en la EvIA de la alternativa en

viaducto se tomó el caso más crítico en el análisis de estos tres impactos por el principio de precaución de la gestión ambiental. Para ambos casos, estos impactos pueden mitigarse mediante la implementación de programas de seguridad y salud en el trabajo, y con una comunicación oportuna y adecuada en la socialización del proyecto con la comunidad. La afectación del patrimonio arqueológico podría ser inferior en el caso de la alternativa de viaducto, dado que no se afectarían los tres caminos republicanos existentes a lo largo del corredor. Esto, a juicio del autor, sería una ventaja, desde el punto de vista de la protección del patrimonio arqueológico y cultural.

CONCLUSIONES

Se hizo una propuesta de trazado en viaducto, encontrando que la longitud del tramo vial se reduciría en un 19,33 % con respecto a la alternativa corte-relleno. El costo de construcción del viaducto resulta ser casi cuatro veces mayor que el de la alternativa corte-relleno. En casos en los cuales se optimice la longitud de los viaductos al no seguir el trazado de otras alternativas, esta diferencia podría ser incluso menor. Desde un punto de vista de economía ambiental, esto se podría justificar en la incorporación de costos ambientales de los proyectos de infraestructura.

De acuerdo con el EsIA existente para la alternativa corte-relleno, la mayor afectación se presenta sobre los medios abiótico y biótico. En el escenario sin proyecto, el medio biótico se encuentra afectado por la agricultura y ganadería, con afectaciones asociadas a fragmentación de ecosistemas, afectación del paisaje y afectación de especies endémicas.

Según el EvIA de la alternativa en viaducto, los componentes más afectados por su construcción resultan ser la flora y el componente social, con impactos que incluyen afectación del paisaje, conflictos con la comunidad y generación de expectativas.

Al hacer la evaluación comparada de impactos ambientales, se concluye que dado que el viaducto no se desarrolla en la superficie, los impactos negativos sobre el medio abiótico y biótico son menores con respecto a la construcción de la alternativa corte-relleno. Para el caso de estudio analizado, esta diferencia podría ser representativa, dada la zonificación ambiental del proyecto, ya que el trazado atraviesa áreas de no inter-

vención y de intervención con restricciones que suman el 67,62 % del AID.

Al revisar la demanda de RN, se encuentran condiciones más favorecedoras para la alternativa de viaducto desde una perspectiva de demanda de agua, generación de residuos sólidos, requerimientos de Zodme para su disposición y cantidad de especies arbóreas afectadas. No obstante, la alternativa de viaducto demanda casi seis veces más concreto y nueve veces más acero que la alternativa de corte-relleno. Para determinar la mejor alternativa ambiental desde el punto de vista de demanda de recursos naturales, se requiere complementar este estudio con un análisis de ciclo de vida.

REFERENCIAS

- [1] Consultor de los estudios y diseños del caso de estudio, 2014. estudio de impacto ambiental de las vías de acceso al nuevo casco urbano de la población del caso de estudio.
- [2] Cantor, C.Y.L (2008, enero). Alternativas en infraestructura sostenible para la conexión vial Colombia - Panamá y de las Americas en zonas ambientalmente sensibles como el tapón del Darién. Universidad de La Salle. Bogotá D.C. [en línea]. Disponible en <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14018/T41.07%20C168a.pdf?sequence=1>.
- [3] Servicio de la ciencia y el conocimiento de la Unión Europea, 2017. El análisis de sensibilidad y la evaluación del impacto [en línea]. Disponible en <https://ec.europa.eu/>.
- [4] República de Colombia. Gobierno nacional (1993). Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA), y se dictan otras disposiciones.
- [5] Consultor de los estudios y diseños del caso de estudio, 2014. diseño de acueducto y alcantarillado para el reasentamiento de la población del caso de estudio.
- [6] Consultor de los estudios y diseños del caso de estudio, 2014. Estudio y diseño de estructuras de la vía objeto de estudio.
- [7] Conesa Fernández, V. (2003). Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental. Madrid-Barcelona-México: Mundi-Prensa.
- [8] Environmental Protection Agency, USA - EPA (2017). Sustainable Materials Management: Non-Hazardous Materials and Waste Management Hierarchy [en línea]. Disponible en www.epa.gov.

Inserción de doctores en la industria nacional: una alternativa

Introducing Ph.D. graduates in the national industry: A proposal

JUAN D. BETANCUR

Profesor del Departamento de Ciencias Naturales, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

juan.betancur@escuelaing.edu.co

Recibido: 25/07/2017 Aceptado: 02/08/2017

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

Resumen

En este artículo se presenta una reflexión sobre la inserción de doctores en la industria nacional, abordando las principales dificultades encontradas en dicho proceso, de acuerdo con la experiencia del autor. A renglón seguido se presenta un mecanismo para realizarlo, basado en el modelo triple hélice de generación de ciencia y tecnología, en el cual se requiere una efectiva vinculación universidad - empresa - Estado.

Palabras claves: gestión de ciencia y tecnología, inserción de doctores, modelo triple hélice.

Abstract

This document briefly discusses the characteristics for introducing Ph.D. graduates in the national industry, addressing the main difficulties encountered in this process. Subsequently, a mechanism is presented to do this, based on the triple helix model of generation of science and technology, in which an effective University - Enterprise - Government link is required.

Keywords: Science and Technology Management, Ph.D. graduates introduction, Triple Helix Model.

INTRODUCCIÓN

Con ocasión de la Convocatoria 617 de Colciencias, realizada en 2011 para la inserción de doctores formados en ciencias y en ingeniería a la industria nacional, cuyo objeto fue “Estimular a las empresas a vincular doctores con el fin de fortalecer y mejorar las capacidades de investigación e innovación y de competitividad del sector empresarial en Colombia, así como crear las condiciones sociales para que las empresas se conviertan en nuevo destino laboral de los doctores” [1], se realiza un análisis al respecto.

Dicha convocatoria finalmente se canceló, pues según informes en la prensa, no había nadie inscrito; la casa periodística contactó a Colciencias, pero no hubo respuesta [2]. Posteriormente, se ha hablado de replantear la formación de doctores [3].

Se generó recientemente otra convocatoria, la “05-2017. Inserción de doctores” [4], cuyo objeto fue “Contribuir al fortalecimiento de las capacidades de investigación, desarrollo tecnológico e innovación de las entidades que hacen parte de Innovación Cauca, mediante la vinculación de un (1) profesional con título de doctorado a las mismas”. Sin embargo, no se presentaron candidatos, de acuerdo con información reportada por la entidad convocante [5].

Las iniciativas expresadas a través del objetivo general y los objetivos específicos de las convocatorias mencionadas, para generar nuevos espacios laborales para los doctores, son en realidad excelentes dado que actualmente la infraestructura nacional universitaria no es suficiente para recibir a los mil doctores que se esperan formar en un futuro próximo. Además, es evidente que se debe fortalecer el vínculo universidad - empresa - Estado, para lograr los niveles de innovación requeridos por el sector productivo (DNP, 2008). Sin embargo, los mecanismos empleados para tal fin presentan algunas oportunidades de mejora, y no deja de ser extraño que no haya candidatos dispuestos a hacerlo.

Pueden existir muchas razones para ello, y quizás una de ellas sean las condiciones salariales y laborales que no son atractivas para los candidatos; otra, tal vez más importante, es el desconocimiento de parte del doctor recién graduado de cómo es trabajar con la industria y las capacidades y habilidades requeridas y expectativas generadas, debido a que la formación de los doctores en ciencias y en ingeniería se da principalmente en ambientes puramente académicos, casi sin ninguna relación

con el medio industrial y empresarial nacionales, lo cual se explorará enseguida.

POSIBLES CAUSAS DE NO PRESENTACIÓN DE CANDIDATOS

Un aspecto importante de tratar en la inserción de doctores en la industria, desde la experiencia del autor, es que en su mayoría doctores en ciencias y en ingeniería que se forman en Colombia, e incluso los doctores nacionales formados en el exterior, lo hacen en ambientes puramente académicos, por lo cual requieren un tiempo de adaptación al ambiente industrial de entre seis y doce meses, lo cual para la industria en algunas ocasiones es un tiempo largo y les resulta costoso de asumir. Dicha adaptación se refiere al aspecto de ser razonablemente prácticos, abiertos, ágiles, rápidos, emprendedores, innovadores y gestores eficientes, lo cual, lamentablemente, no es en general el tipo de características del doctor colombiano.

Nuestra formación doctoral está alejada de la realidad nacional y, por supuesto, alejada de la industria nacional; es demasiado cercana al ambiente académico y puramente técnica, y se deja de lado en la formación del doctor el desarrollo de capacidades de innovación, gestión y emprendimiento [6]. Esta formación no sólo incluye el hecho de ser o no prácticos, de pensar en la utilidad de las cosas, sino incluso también la manera de manejar la comunicación con el industrial y la forma de trabajar con él.

De entrevistas realizadas con personas de la industria, se concluye que sí resulta indispensable tener personas con alta capacitación, debido a que el día a día no les permite detectar e implementar ideas que se pueden transformar en proyectos y mejorar su productividad y competitividad. Así mismo, el día a día no les permite asumir la responsabilidad de ejecutar tales proyectos. Por ello, algunas empresas, como TGI S.A. ESP y Equión - Energy (antes BP Colombia) recurren a centros de desarrollo tecnológico o universidades, los cuales tienen personal que se puede encargar de ejecutar dichos proyectos, con la orientación del industrial, quien tiene clara la necesidad por satisfacer.

Otro tema que hay que añadir aquí es la sincronización de los calendarios y procesos administrativos de la universidad y los de la empresa, lo cual representa una oportunidad de mejora en la cual trabajar. Para la

industria nacional proyectos que tengan una duración mayor de 18 meses a veces no resultan atractivos, pues a los problemas presentados se les debe dar una solución oportuna. Se puede hacer la gestión para que el tiempo de ejecución del proyecto esté entre 12 y 18 meses, que son tiempos muy razonables para implementar la solución.

Por otra parte, pagarle al doctor 20 smmlv o más supone una gran carga prestacional para la industria. De hecho, son pocas las empresas que podrían asumir dicha carga, sobre todo para pagarle a un doctor que requiere un tiempo de adaptación tan largo como el mencionado. Aunque Colciencias indicó que asumiría la carga prestacional, como lo ha expresado en sus convocatorias, no ha sido suficiente para motivar la inserción. Esto se debe a que el salario real del doctor está por debajo de las expectativas internacionales que éste tiene.

Finalmente, debido a la poca gestión que se hace, la industria nacional no sabe o no entiende para qué le es útil un doctor, dónde y cómo lo podría emplear; es más, la industria nacional, con algunas excepciones, no tiene departamento de investigación o algo similar, prefiere comprar en el exterior y pagar lo necesario para manejar los equipos u otros. Este es un panorama que se puede transformar como se expresa enseguida.

PROPUESTA SOBRE LA FORMACIÓN DE DOCTORES

A continuación se plantea un mecanismo que es viable para generar la adaptación de personas con alta formación académica a la industria nacional y para que la industria, a su vez, reconozca su trabajo.

La propuesta para lograr la inserción de doctores en la industria es que el futuro doctor se forme precisamente en la misma industria, en el ambiente empresarial, y no en un ambiente puramente académico, a través de uno o varios proyectos relacionados; es decir, *el doctor no debe llegar formado, debe formarse en la industria*, con lo cual se logra una inserción natural. Este es un modelo que funciona en países como México y España, con buenos resultados hasta el momento.

¿Cómo se puede lograr esto?

Habría que hacer un estudio o vigilancia de mercado para **detectar las necesidades** actuales de la industria. Esto ya se hizo en la Convocatoria 617 antes menciona-

da. Tal vez se podría ampliar el espectro de posibilidades e implementar los resultados del ejercicio de lecciones aprendidas.

Con este estudio se pasa a un proceso de **evaluación y selección** para establecer las necesidades más pertinentes para el desarrollo nacional, en el que hay que trabajar sobre los criterios de selección que podrían ser pertinencia, mejoramiento de un proceso, mejoramiento de la calidad de vida, impacto económico, tiempo de ejecución, entre otros. Estos estudios y análisis se pueden hacer a través de convenios universidad - empresa u otras entidades que realicen vigilancia tecnológica. Seleccionadas las necesidades más importantes, se puede aprovechar lo que ya tiene el país para **desarrollarlas e implementarlas**. Este es un esquema similar al mostrado a renglón seguido (figura 1).

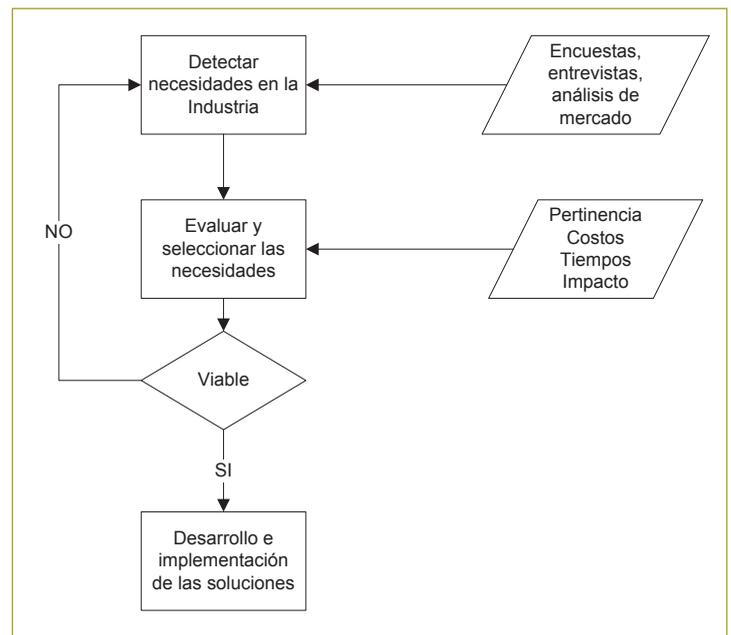


Figura 1 Modelo para identificar, seleccionar, desarrollar e implementar soluciones.

Fuente: El autor.

La alternativa que luce más viable para desarrollar e implementar los requerimientos es mediante convenios con los centros de desarrollo tecnológico (CDT) o corporaciones, creados a través de la legislación colombiana de ciencia y tecnología (Ley 29 de 1990), con la industria y el gobierno nacional. De hecho, el Estado impulsó la creación y fortalecimiento de los CDT precisamente para articular la oferta de ciencia y tecnología con las ne-

cesidades de la industria, concibiendo a los CDT como una estrategia fundamental de la política de innovación, competitividad y desarrollo tecnológico. Así que esta es una herramienta que actualmente está a disposición para la formación doctoral.

Existen varios CDT nacionales que trabajan con la industria (Corporación para la Investigación de la Corrosión, CIC; Corasfaltos; CDT del Gas; Centro Internacional de Física, CIF, entre otros), identificando, a través de los servicios que ofrecen, necesidades para generar proyectos de investigación que son a su vez soluciones para un problema específico de la industria. En estos CDT o corporaciones se han formado profesionales con grado de maestros que finalmente se vinculan a la industria nacional (TGI S.A. ESP, Promigás S.A. ESP, entre otros). El CDT puede incluso ser una unidad dentro de la academia, como el CIF, pero con procesos administrativos más ágiles y calendarios acordes con los de la industria.

En la experiencia del autor, la interacción de la CIC con la industria nacional ha permitido identificar necesidades para generar proyectos. Por ejemplo, el desarrollo e implementación de un modelo para predecir desgaste en tubería de producción de pozos [7], y el desarrollo e implementación de metodologías de valoración directa para valorar la integridad mecánica de una tubería [8], entre otros. Todos son temas para formación doctoral, dándoles el alcance adecuado. Además, permiten adquirir el lenguaje, aptitud y capacidades requeridos por la industria, pues la manera de conducirse y hacer la gestión es diferente de la del ambiente puramente académico.

Esta estrategia muy bien se puede enmarcar en el modelo de triple hélice de la vinculación academia - industria - Estado, para generar ciencia y tecnología y desarrollo [9] (figura 2). Los CDT son aquellas entidades nacionales que actualmente logran unir los tres estamentos en el objetivo común, que es el desarrollo y la innovación tecnológica, para crear mayor bienestar en la sociedad.

El modelo de triple hélice es un marco conceptual diseñado inicialmente por Etzkowitz y Leydesdorff para describir cómo la innovación en las sociedades modernas necesita una estrecha alineación del gobierno a diferentes niveles (local, regional, nacional o supranacional) con la academia (universidades y otras organizaciones públicas de investigación) y la industria

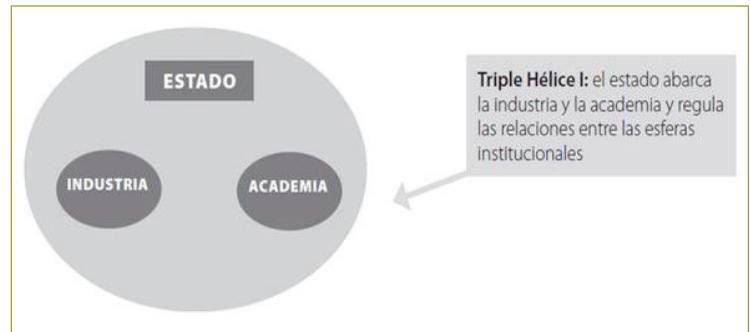


Figura 2. Modelo universidad - empresa - Estado.

Fuente: Etzkowitz & Leydesdorff (2000).

[8]. El modelo se desarrolló para representar la importancia cada vez más estratégica de los vínculos entre la academia, la industria y el gobierno, llevando a nuevos tipos de “infraestructura del conocimiento en términos de superposición de las esferas institucionales, tomando cada una el papel del otro y con las organizaciones híbridas emergentes en las interfaces” [9]. Este modelo se ha aplicado en países como Rusia, Noruega, Indonesia, Tailandia, Dinamarca y México, en diferentes industrias, como transporte, salud, ecología, energía solar fotovoltaica y similares [10-15].

Debe existir un vínculo entre un CDT y una universidad, que es la que finalmente otorga el título de doctor. El objetivo es fortalecer aún más este esquema de colaboración, que actualmente está disponible, para generar la formación de doctores a través de los CDT (figura 3).

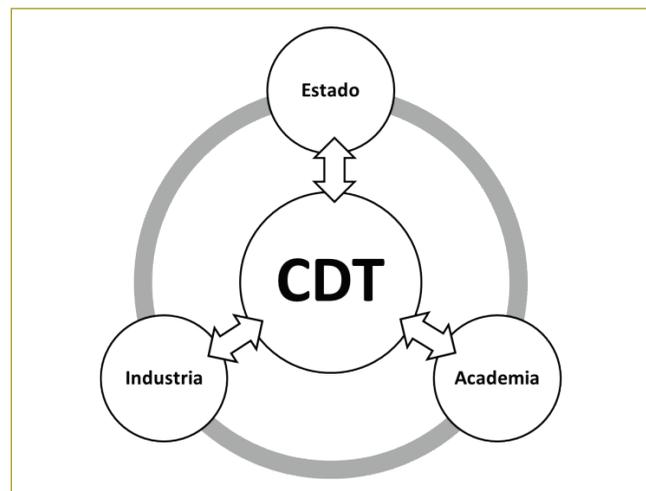


Figura 3. Integración Estado - academia - industria a través de los CDT.

Fuente: El autor.

¿Cómo se le pagará al estudiante?

El salario del estudiante de doctorado puede ser el mismo que el que se proporciona a través de la beca de Colciencias para cursar dichos estudios. Con esto se reduce la carga prestacional tanto a la empresa como a Colciencias, haciendo que la relación costo/beneficio sea más atractiva para la industria. También se puede recurrir a exenciones de impuestos del Estado hacia la empresa, a través de los CDT.

La parte de recursos y materiales estaría a cargo de la empresa que se va a beneficiar de los resultados del proyecto.

El proyecto se puede ejecutar en los 18 meses mencionados, y el resto del tiempo se puede utilizar para cursar las materias correspondientes, en estrecha relación con la necesidad por solucionar. En esta parte, se debe sincronizar el cronograma de actividades en conjunto.

La persona formada, ya graduada, tendría las herramientas necesarias para generar trabajo, ya que podría montar su propia empresa luego de la finalización de sus estudios, incorporarse a la compañía en la cual tuvo su formación o empresas del mismo sector económico, ampliando así el espectro laboral para doctores en Colombia.

PROPUESTA SOBRE LA VINCULACIÓN DE DOCTORES YA FORMADOS

Si la persona ya tiene el grado de doctor, una manera de realizar la inserción sería que el doctor hiciera una pasantía entre tres y seis meses en un CDT, identifique un problema de la industria por solucionar, plantee el proyecto dentro del CDT y luego el CDT realice la gestión con la universidad y la industria para ejecutar el proyecto, el cual puede ser en modalidad de cofinanciación con Colciencias.

Estos mecanismos planteados tienen la finalidad de que el doctor conozca de primera mano la realidad radical de la industria y obtenga el principio de ser razonablemente práctico. Permite también que la industria conozca el trabajo de este tipo de profesionales, su valía, su aporte, y se sensibilice hacia vincular en un futuro mediano a doctores. La inserción laboral debería ser en las dos direcciones: tanto del doctor hacia la industria como de la industria hacia el doctor. Por ahora, hay un desconocimiento de lo que puede hacer el doctor en la industria y de cómo el mismo doctor puede aportarle a ella.

CONCLUSIONES

A la fecha, los esfuerzos hechos para vincular doctores a la industria no han tenido resultados satisfactorios, lo cual puede deberse al desconocimiento tanto de la universidad como de la industria de cómo pueden interactuar entre sí para solucionar problemas.

Se debe mejorar el desarrollo de capacidades de innovación y emprendimiento de los doctores nacionales, acercándolos aún más al ambiente de la industria.

Se propone que el doctor se forme dentro de la misma industria, con el fin de conocer en detalle los problemas a los que hay que darles solución.

Se propone fortalecer el modelo de CDT, por parte del Estado, para promover la realización de doctorados en ellos.

Se ha aplicado con éxito el modelo de la triple hélice en varios países, con el cual se ha mejorado el desarrollo de la ciencia y la tecnología en varias industrias.

REFERENCIAS

- [1] <http://legadoweb.colciencias.gov.co/convocatoria/convocatoria-para-estimular-la-inserci-n-de-doctores-colombianos-y-del-extranjero-las-e>.
- [2] <http://www.elespectador.com/noticias/educacion/doctores-abandonados-articulo-438850>.
- [3] <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-12395946>.
- [4] <http://www.unicauca.edu.co/innovacioncauca/05-2017-insercion-doctores>.
- [5] <http://www.unicauca.edu.co/innovacioncauca/sites/default/files/convocatorias/convocatorias-2017/05-2017-Insercion-Doctores/verificacion-requisitos-05-2017-Inser-Doctores.pdf>.
- [6] Modelo para estimar el desgaste en tubería de producción ocasionado por trabajos de intervención de pozo. Memorias del XIII Congreso Colombiano del Petróleo, Acipet, 2009, en el marco del Colombian Petroleum Show.
- [7] Desarrollo e implementación del *software* Sigmi en el Gasoducto Cusiana - El Porvenir - La Belleza, perteneciente a TGI S.A ESP. Memorias Corrosion Show Colombia (2011).
- [8] Etzkowitz, H. & Leydesdorff, L. (2000). The dynamics of innovation: from National Systems and "Mode 2" to a Triple Helix of university-industry-government relations. *Research Policy*, 29(2), 109-123. doi:10.1016/S0048-7333(99)00055-4.
- [9] Klitkou, A. & Godoe, H. (2013). The Norwegian PV manufacturing industry in a Triple Helix perspective. *Energy Policy*, 61 1586-1594.
- [10] Celis, J. & Duque, M. (2013). ¿Están formando los programas de doctorado en ingeniería recurso humano para promover procesos de innovación en Colombia? Presentado en el Foro Mundial de Educación en Ingeniería, WEEF 2013, Cartagena.
- [11] Verlinde, S. & Macharis, C. (2016). Innovation in urban freight transport: the Triple Helix model. *Transportation Research Procedia*, 14, 1250 - 1259.
- [12] Brem, A. & Radziwon, A. (2017). Efficient Triple Helix collaboration fostering local niche innovation projects – A case

from Denmark. *Technol. Forecast. Soc. Change*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2017.01.002>.

[13] Fitriati, R. & Rahmayanti, K.P. (2012). "Government Support in Triple Helix Collaboration to Provide Health Service Delivery: Case Study Government Hospital in Bengkulu Hospital. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 52, 160 - 167.

[14] Klomklieng, W., Ratanapanee, P., Tanchareon, S. & Kanlayanee, M. (2012). Strengthening a Research Cooperation Using a

Triple Helix Model: Case Study of Poultry Industry in Thailand. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 52, 120 - 129.

[15] Cabrero, E., Cárdenas, S., Arellano, D. & Ramírez, É. (2011). La vinculación entre la universidad y la industria en México. Una revisión a los hallazgos de la Encuesta Nacional de Vinculación, *Perfiles educativos*, 33. SPE México.

Sensor basado en fibra óptica para detección de sobrecarga vehicular

Optic fiber-based sensor to detect vehicle overload

SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ¹ - LEIDY JOHANA GONZÁLEZ CUADROS² - JUAN CAMILO GÓMEZ RUBIANO³ - JUAN FELIPE MARTÍN ALAFONSO⁴ - HERNÁN PAZ PENAGOS⁵

1. Profesor del Programa de Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
2. Estudiante de Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
3. Estudiante de Ingeniería Electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Grupo de Investigación Ecitrónica.
4. Estudiante de Ingeniería Mecánica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
5. Profesor del Programa de Electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Grupo de Investigación Ecitrónica.

sandra.campagnoli@escuelaing.edu.co - leidy.gonzalez-c@mail.escuelaing.edu.co - juan.gomez-ru@mail.escuelaing.edu.co - juan.martin@mail.escuelaing.edu.co - hernan.paz@escuelaing.edu.co

Recibido: 28/07/2017 Aceptado: 10/08/2017

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

Resumen

En este artículo se explican los avances que se han obtenido en el proceso de dimensionamiento del problema para el diseño teórico del sensor basado en fibra. El diseño metodológico cubre dos fases: en la primera se revisó el estado del arte y en la segunda se realizaron algunas experiencias de laboratorio y simulación para obtener una primera aproximación al modelo. La investigación parte de un trabajo interdisciplinar de ingeniería mecánica, civil y electrónica. Los aportes de estas disciplinas, tanto en sus modos propios de proceder, como en temas específicos, favorecen la rigurosidad investigativa y aportan más elementos de juicio para resolver el problema.

Palabras claves: fibra óptica, modelo teórico, pavimento asfáltico, propagación, sensor, sobrecarga.

Abstract

This article explains the progress obtained in the problem statement process for the theoretical design of an optic fiber-based sensor. The methodological design has two phases: the first reviews the state of the art and the second deals with some laboratory and simulation experiences to have a first look at the model. The research comes from an interdisciplinary work between mechanical, civil, and electronic engineering. The contributions from these disciplines, both in their procedures and their specific topics, favor the research thoroughness and provide more tools to solve the problem.

Keywords: optic fiber, theoretical model, asphalt pavement, propagation, sensor, overload

INTRODUCCIÓN

Los elevados costos en la implementación, mantenimiento e instalación de los sensores para pesaje vehicular en Colombia limitan el control de sobrecarga por parte de agencias viales en las vías secundarias y terciarias; por ende, es necesario investigar nuevas tecnologías, con el fin de diseñar sensores más económicos.

La presente investigación se refiere al tema de sensores basados en fibra óptica para la detección de sobrecarga vehicular. Mediante este dispositivo se pretende detectar la modificación en la señal del sensor, debido a la carga aplicada por cada uno de los ejes de un vehículo característico. Los datos obtenidos permitirán verificar el cumplimiento o no de la normativa colombiana sobre carga vehicular en la malla vial, que resulta de gran importancia para prevenir el deterioro del pavimento¹.

MARCO TEÓRICO

A continuación, se presentan los aspectos teóricos más relevantes que se encontraron en la investigación.

Problema

La mayoría de los daños en las estructuras de pavimento se generan debido al peso de los vehículos que transitan por ellos. Aun cuando en Colombia las dimensiones y las cargas de los vehículos de transporte terrestre se encuentran reglamentadas por el Ministerio de Transporte, según las resoluciones 4100 del 2004, 2888 de 2005, 6427 y 1782 del 2009 (Ministerio de Transporte, 2004; 2005, 2009), las condiciones de operación de muchos vehículos que transitan por las vías nacionales y urbanas, en especial por las carreteras que no están concesionadas, se apartan de las normas exigidas.

Selección del vehículo característico para el estudio

El tipo de vehículo que circula con más frecuencia en las vías de Colombia y en la ciudad de Bogotá corresponde al C2. Este es un camión de dos ejes, de peso bruto máximo de 17 toneladas, distribuidos en un eje simple direccional de seis toneladas y un eje simple no direccional o eje simple de rueda doble de once toneladas. Por tanto, se escogió este vehículo debido a que

es el que más impacto tiene en la infraestructura vial colombiana.

Dispositivos de pesaje vigentes

Para determinar las cargas vehiculares que circulan por el pavimento se utilizan diversos tipos de básculas: fijas o móviles, estáticas o dinámicas. En años recientes han comenzado a usarse en el país básculas de peso en movimiento (WIM, *Weigh In Motion*). Algunos sensores utilizados para pesar los vehículos en movimiento son placas de flexión, sensor piezoeléctrico, sensor de capacitancias y sensores en fibra óptica (Rondón, Delgadillo & Vargas, 2014), los cuales utilizan principios piezoeléctricos, fotoeléctricos y capacitivos.

Fibra óptica

La fibra óptica es un medio de transmisión guiado, que se configura mediante una geometría cilíndrica. En el centro hay un núcleo, con radio a , constituido fundamentalmente por fibra de vidrio, que tiene un índice de refracción mayor que el del recubrimiento (medio circundante al núcleo). Este es un cilindro externo de polietileno, de radio b . Las fibras ópticas, según el número de modos de propagación (trayectorias de luz a través de la fibra óptica), se clasifican en monomodo y multimodo.

Interferometría y reflectometría

Son dos propiedades de la luz que desempeñan papeles importantes en los procesos de detección de variables físicas de los sensores basados en fibra óptica. La interferometría o interferencia de la luz es un principio físico que consiste en la superposición lineal de dos o más ondas en un punto dado, que crean un patrón particular y variable (formación de franjas con zonas de alta, poca o nula actividad ondulatoria).

La reflectometría en un medio es la segunda propiedad de la luz, que permite medir el coeficiente de reflexión (relación entre el nivel de señal de la onda incidente y la onda reflejada), el coeficiente de transmisión (relación entre el nivel de la señal transmitida al medio y la onda incidente), el tiempo que tarda una señal en propagarse de ida y regreso al mismo punto de emisión, la velocidad de propagación y la distancia de la trayectoria (Romero, 2012).

1. Troncoso Rivera & Murillo Feo, 2011.

Sensores basados en fibra óptica

Un sensor es un dispositivo que detecta un cambio en un estímulo físico y lo transforma en una señal que se puede registrar o medir. Los componentes básicos de un sensor son: elemento sensor, transductor y sistema electrónico. Hoy en día, debido a la investigación y al auge de los componentes ópticos, se han explorado el diseño y la construcción de sensores basados en fibra óptica. Los sensores ópticos, comparados con los sensores basados en principios eléctricos, son más inmunes a interferencias electromagnéticas y de radiofrecuencia, presentan bajas pérdidas, tamaños pequeños, alta sensibilidad y fiabilidad a largo plazo. A continuación, se presenta un tipo de sensores óptico.

El tipo de *sensor cuasidistribuidos o sensores de redes de Bragg (FBG: fiber Bragg grating)* es una microestructura que tiene una longitud milimétrica y puede fotoinscribirse en el núcleo de una fibra de telecomunicaciones monomodo estándar. Además, actúa como un espejo selectivo en función de la longitud de onda. Eso significa que, si se inyecta en la fibra óptica la luz procedente de una fuente de banda ancha, la red solo refleja luz con una anchura espectral muy estrecha, centrada en torno a la longitud de onda de la red de Bragg. El resto de la luz se transmite a través de la fibra óptica sin ninguna pérdida, hasta la siguiente red de Bragg impresa en la fibra (figura 1).

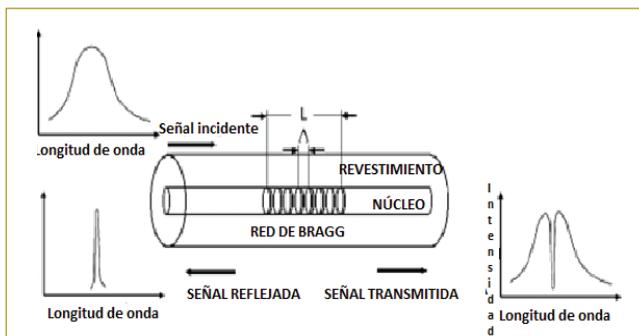


Figura 1. Sensor de red de Bragg.

Una red de Bragg en fibra tiene características únicas que permiten utilizarla como sensor. Por ejemplo, si la fibra se estira o se comprime, la red puede medir la deformación. La deformación de la fibra óptica produce un cambio en el periodo de la microestructura y, en consecuencia, también en la longitud de onda de Bragg. La longitud de onda de la red de Bragg (λ_B) se expresa

en términos del periodo de la microestructura (Λ) y del índice de refracción del núcleo (n_{cp}).

SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE TRABAJO

Terminada la revisión del estado del arte de la investigación, se continuó con la fase de experimentación. El objetivo de las primeras experiencias de laboratorio fue transmitir señales analógicas y digitales, banda base, moduladas a través del kit de fibra óptica DL 2570. Con lo anterior se buscaba identificar la señal que presentara menor atenuación, desfase y variación de frecuencia, para seleccionarla como señal de referencia.

Especificaciones del equipo de experimentación

El panel DL 2570 de fibra óptica está constituido por sendos transmisores y receptores analógico y digital, respectivamente. Tanto los módulos analógicos como los digitales se enlazan mediante una fibra monomodo con longitudes de fibra de 50 cm y 5 m. Esta fibra está compuesta por un núcleo de fibra de plástico ULV-0: ABS-PC, con alta resistencia a los impactos y al calor (con diámetro de 1 mm), y un recubrimiento de polietileno PE (con diámetro de 2,2 mm). La fuente emisora de luz es un diodo LED a 660 nm. El receptor cuenta con un diodo PIN con amplificación de transimpedancia integrado. A través del panel se transmite onda electromagnética (luz) en la primera ventana de transmisión: 950 nm. La atenuación de la fibra óptica es de 2,3 (dB/Km). Al panel se le puede ingresar cualquier señal analógica o digital externa con nivel de amplitud entre 0 y 650 mVpp; el rango de frecuencia debe estar entre 0 y 20 MHz. El panel de fibra óptica DL 2570 puede trabajar en el rango de temperatura entre 0 y 70 °C.

Pruebas de transmisión de tonos y señales moduladas

Inicialmente, se efectuaron pruebas de transmisión de señales a través del kit. Con el empleo de osciloscopios, generadores y fuentes, se acondicionaron tonos a distintas frecuencias y amplitudes para transmitirlos y visualizarlos en el extremo receptor. También se afectó el medio de transmisión con dobleces, tensiones y pesos; a través de éstos, se buscaba identificar variaciones en la amplitud, ancho de banda y desfase de la señal banda base transmitida.

Posteriormente, se transmitieron señales moduladas analógica (en amplitud, frecuencia y fase) y digitalmente

(FSK). En la experimentación con señales moduladas se usaron dos generadores de funciones: uno de ellos para extraer la señal moduladora —representa el mensaje— y el otro para generar la función portadora. El segundo generador también se utilizó para hacer el producto de las dos señales mencionadas: modulación tanto analógica (AM, FM, PM) como digital (FSK). La salida de este último generador se conectó al panel DL 2570 y la señal modulada se transmitió a través del kit para las dos longitudes de fibra óptica (50 cm y 5 m) (figura 2).

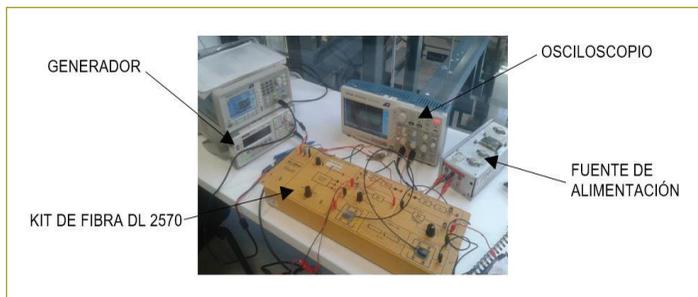


Figura 2. Pruebas de transmisión de luz a través del kit de fibra óptica DL 2570 con el uso de osciloscopios, generadores y fuentes.

El objetivo de la transmisión de señales banda base y moduladas (pasabanda), a través de dos longitudes de fibra óptica (50 cm y 5 m), era comparar las señales enviadas con las señales recibidas para evaluar atenuaciones, desfases y variaciones de frecuencia (anchos de banda) en el medio de transmisión.

Software para la simulación de la fibra

Otra actividad investigativa realizada en el grupo, que implicó las características de la fibra (panel DL 2570), fue simular el comportamiento intrínseco de la fibra óptica en entornos con presencia de cargas (sometido a deformaciones) y condiciones ambientales variables. Para este propósito se usó el *software* SolidWorks® (2017).

Con la simulación se pretende evaluar la respuesta del cable de fibra a una carga distribuida de 29,43 kN (tres toneladas) en una sola dirección paralela a su eje transversal. La fuerza máxima especificada será la ejercida por un neumático del semieje simple de rueda simple de un camión C2 sobre la vía. Se presume que el neumático se encuentra a una presión de inflado de 100 psi y que éste deja una huella circular sobre el pavimento, por lo que se puede conocer el área de aplicación de las fuerzas.

Para evitar que la fibra esté expuesta a condiciones adversas sobre el pavimento, se recubre con un material que evite el desgaste por humedad y gradientes de temperatura que garanticen mayor vida útil.



Figura 3. Geometría de la pieza de longitud 230 mm (izquierda). Montaje de la fibra cubierta por placa de polipropileno, apoyada sobre la capa asfáltica (derecha).

Con las actividades llevadas a cabo durante las dos primeras fases de investigación se espera reunir los elementos de juicio suficientes para iniciar el proceso de modelamiento del sensor.

RESULTADOS

Como se muestra en la tabla siguiente (tabla 1), al transmitirse analógicamente un tono (señal banda base) a través del panel DL 2570, con longitudes de fibra óptica de 5 m y 50 cm, se evidencia en la señal recibida una réplica exacta de la señal transmitida. En consecuencia, no se experimentan atenuación, desfase y variación de frecuencia. Sin embargo, cuando se transmite el mismo tono por medio del mismo panel, pero en este caso el medio de transmisión sufre dobleces, la señal recibida atenúa 2.66 veces las señales transmitidas, además de que no hay desfases ni variaciones de frecuencia.

En la primera columna de la izquierda se especifican los tipos de señales con los parámetros que intervinieron en el proceso de modulación, tanto analógica como digital; en las columnas siguientes, se pueden apreciar las gráficas en el dominio del tiempo y la frecuencia de las señales recuperadas en el receptor. En estas últimas (gráficas en el dominio del tiempo) se evidencian reducciones de potencia promedio de señales moduladas (AM, FM, PM y FSK) cuando fueron propagadas a través de la fibra óptica con longitud de 5 m. En cuanto a variaciones de frecuencia, los esquemas FM y PM cambian para longitudes de 50 cm y 5 m.

Tabla 1
Señales de tonos transmitidas y recibidas en el kit de fibra óptica

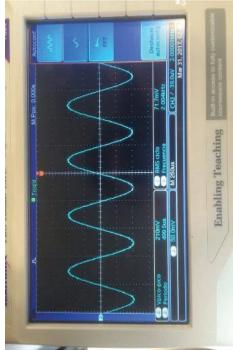
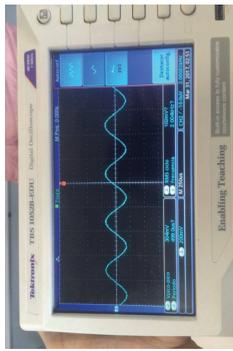
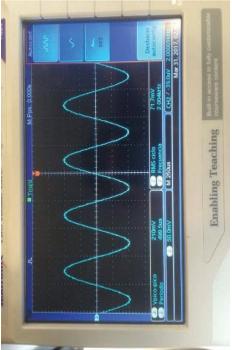
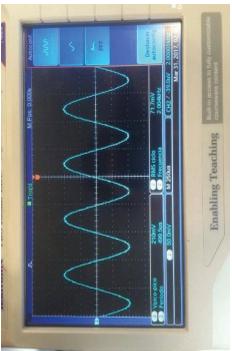
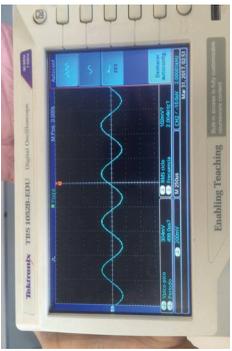
Parámetros	Señal de entrada	Señal de salida	Señal de salida, cuando la fibra fue sometida a deformación ligera	Señal de salida, cuando la fibra fue sometida a deformación mayor
Parámetros de la señal de entrada: $V_m = 210$ mVpp $f_m = 2$ KHz Longitud de la fibra óptica 50 cm				
Parámetros de la señal de entrada: $V_m = 210$ mVpp $f_m = 2$ KHz Longitud de la fibra óptica 5 m				

Tabla 2
Señales moduladas transmitidas y recibidas en el kit de fibra óptica

Parámetros	Señal modulada en el dominio de t		Señal modulada en el dominio de f	
	Long. FO: 50cm	Long. FO: 5 m	Long. FO: 50cm	Long. FO: 5m
<p>AM</p> <p>Parámetros de las señales de entrada:</p> <p>Vm=400 mVpp</p> <p>fm=5 KHz</p> <p>Vc=500 mVpp</p> <p>fc=200 KHz</p>				
<p>FM</p> <p>Parámetros de las señales de entrada:</p> <p>Vm=400 mVpp</p> <p>fm=5 KHz</p> <p>Vc=500 mVpp</p> <p>fc=69.44 KHz</p>				
<p>PM</p> <p>Parámetros de las señales de entrada:</p> <p>Vm=400 mVpp</p> <p>fm=15 KHz</p> <p>Vc=500 mVpp</p> <p>fc=50 KHz</p>				
<p>FSK</p> <p>Parámetros de las señales de entrada:</p> <p>Vm=400 mVpp</p> <p>fm=15 KHz</p> <p>Vc=500 mVpp</p> <p>fc=50 KHz</p>				

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se evidencia que someter la fibra óptica a diferentes tensiones y curvaturas cambia la señal recibida en amplitud respecto de la transmitida: se presenta atenuación por reflexión frente al esfuerzo. La tensión o curvado de la fibra óptica ocasiona que la luz que viaja en el núcleo se refleje y refracte, pero la pérdida es reversible cuando desaparece el doblado; este principio es el que vamos a utilizar para que, dependiendo de la tensión a la que se someta la fibra, se pueda evaluar el impacto sobre ésta y decir cuándo se presenta una sobrecarga (tabla 1).

Así mismo, se puede inferir que la transmisión de la señal modulada (sucede tanto para los tipos AM, FM y PM –modulación analógica–, como para FSK –modulación digital–) a través del panel del DL 2570 de fibra óptica (fibra óptica de longitud 5 m) presenta ligeras pérdidas en relación con la transmisión de la misma señal por fibra óptica con longitud de 50 cm. La modulación por fase PM es la que presenta mayor atenuación de la señal de salida con respecto a la de entrada después de ser transmitida; ésta es del orden del 63 % para una longitud de fibra óptica de 5 m, y depende de la frecuencia de la portadora.

Tabla 3

Comparación de los parámetros de amplitud y frecuencia de las señales transmitidas frente a las señales recibidas para tres tipos de modulación analógica y una digital

Modulación	Long. FO	Medidas de entrada		Medidas de salida	
		F (KHz)	Amplitud (Vpp)	F (KHz)	Amplitud (Vpp)
AM	50 cm	200	0,472	200	0,472
	5 m	200	0,472	200	0,304
FM	50 cm	69,44	0,422	67,55	0,422
	5 m	69,44	0,422	69,44	0,280
PM	50 cm	50	1,24	60,98	1,24
	5 m	50	1,24	60,98	0,78
FSK	50 cm	50	0,448	50	0,407
	5 m	50	0,448	50	0,245

La disminución en la amplitud de la señal modulada era la esperada a causa de la relación cuadrática entre la distancia y la potencia. En lo que respecta a la susceptibilidad de la señal modulada al ruido, se observó

que ningún tipo de señal modulada fue contaminada con ruido debido a que el tipo de energía (señal de luz) resiste cualquier interferencia electromagnética externa.

También se pudo observar que la frecuencia varía sólo para algunos tipos de modulación, como FM y PM. Es lógico pensar que estos tipos de modulación modifiquen la frecuencia y la fase de la onda, ya que el mensaje se va a codificar en dichos parámetros de la señal portadora.

En las señales recibidas no se evidencia distorsión de la onda modulada a causa de que la transmisión fue de señal modulada de banda estrecha. Este fenómeno es inversamente proporcional al ancho de banda y a la alinealidad del canal.

En lo que respecta a la simulación, más adelante se muestran los efectos que la carga distribuida tiene sobre la fibra óptica (figuras 8 a 10). Así mismo se evidencia, a través de colores, los esfuerzos a los que esté expuesto el cable de fibra: la zona de color azul es la de menor esfuerzo, y la de color rojo, la de mayor esfuerzo (figura 4).

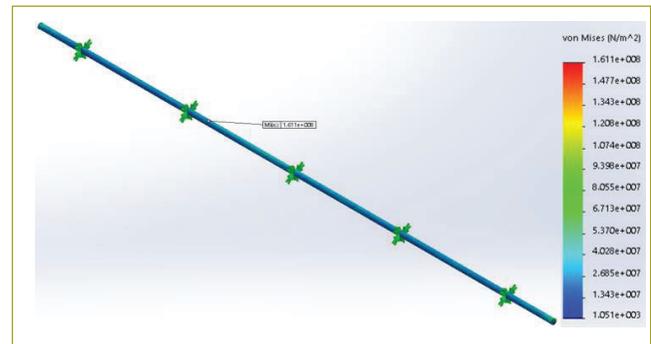


Figura 4. Distribución de esfuerzos de un semieje de tres toneladas (vista isométrica).

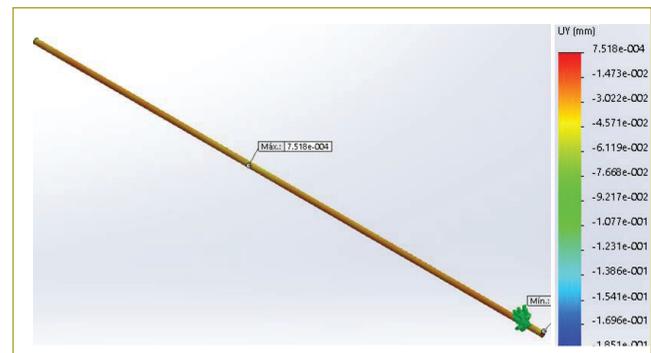


Figura 5. Desplazamiento con respecto al eje vertical Y de un semieje de tres toneladas (vista isométrica).

Los esfuerzos máximos son cercanos a 0,16 Mpa y se presentan sobre el núcleo, en una zona cercana al límite con el recubrimiento. En consecuencia, el recubrimiento será el material menos afectado.

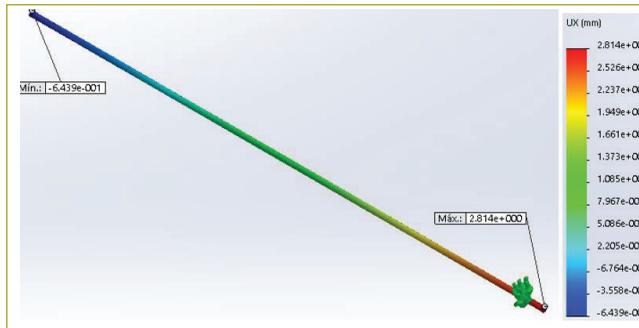


Figura 6. Desplazamiento respecto al eje horizontal X de un semije de tres toneladas (vista isométrica).

Los desplazamientos transversales máximos que se presentan en la fibra son cercanos a los 53,14 m; estas deformaciones son proporcionales a la distancia al punto de aplicación de la fuerza, por lo que la zona que se encuentra en la parte inferior será la más afectada. Los desplazamientos longitudinales máximos son de 2,81 m, situados en los extremos del cable de fibra.

CONCLUSIONES

Para llegar al modelo teórico se partirá de la compresión del fenómeno físico de sobrecarga sobre el pavimento. Se construirá un prototipo a escala (modelo físico lo más aproximado a la realidad), sobre el cual se realizarán pruebas y ajustes de no conformidad; posteriormente se tomarán medidas, se construirán curvas y se harán regresiones para acercarse al modelo teórico buscado. Este mismo procedimiento se llevará a cabo mediante simulación; sólo que en lugar de transmitir una señal electromagnética (luz), se inyectará un fluido como analogía de la luz.

El modelo teórico de sensor basado en fibra óptica se diseñará inicialmente para cargas estáticas correspondientes a vehículos C2 de peso vehicular bruto máximo de 17 toneladas, distribuido en el eje simple direccional y en un eje simple no direccional. La investigación continuará en su proceso, mediante simulación y precisión teórica del principio de reflectometría, con el fin de detectar sobrecarga vehicular.

A partir de las experiencias realizadas en laboratorio en condiciones controladas, se puede concluir lo siguiente:

- Los esfuerzos máximos generados por un vehículo C2 no superan los límites de elasticidad de los materiales que componen la fibra (2410 y 1070 MPa), por lo que el montaje utilizado para la aproximación al modelo teórico de un sensor de fibra óptica cumple con los criterios de diseño necesarios para soportar condiciones extremas de carga y temperatura.
- Son insignificantes las deformaciones axiales que sufre la fibra para considerar que afecten su correcto funcionamiento; sin embargo, para lograr variación de la señal de salida con respecto a la de entrada en el modelo, se debe pensar en una modificación en el montaje que permita amplificar la deformación axial existente y así lograr que el sensor detecte más fácilmente las sobrecargas.
- Al trabajar bajo el principio de la reflectometría se requiere interrumpir parcialmente la emisión de la señal, alterando las condiciones físicas de un cable de fibra. Se observó que al someter la fibra a deformaciones por fuerzas externas (tensión, compresión, flexión) se logra atenuar la señal que llega al receptor. Teniendo en cuenta lo anterior se puede hacer un mecanismo de prueba que permita realizar estas deformaciones de manera sencilla y poder evaluar las atenuaciones de la señal con respecto a las fuerzas aplicadas a la fibra.

REFERENCIAS

1. Castellanos, A.P. & Rojas, J.P. (2014). Espectros de carga vehicular para la zona urbana de Bogotá, D.C. Universidad de los Andes. Recuperado el día 8 de marzo de 2017, en https://www.researchgate.net/publication/242614976_Espectros_de_carga_vehicular_para_la_zona_urbana_de_Bogota_DC
2. Instituto del Transporte. Buenos Aires, República de Argentina (agosto del 2015). Del control de las cargas en las rutas y de las dimensiones de los camiones. Recuperado el 9 de abril de 2017, en <http://www.acadning.org.ar/Institutos/IT%20ANI%20N9%20Control%20de%20cargas.pdf>
3. Jiménez, R. & Fabela, M.J. (2014). Diseño y construcción de un prototipo para determinar el peso de vehículos ligeros en movimiento. Instituto Mexicano del Transporte. Recuperado el 15 de marzo de 2017, en <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt247.pdf>
4. León, R.O. (2000, 8 de junio). Sobrecarga en vías. *El Tiempo*. Recuperado el 6 de abril de 2017, en <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1292151>

5. Macea, L.F., Fuentes, L.G. & Álvarez, A.E. (2013). Evaluación de factores camión de los vehículos comerciales de carga que circulan por la red vial principal colombiana. Recuperado el 20 de febrero de 2017, en <https://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/ingenieria/>.
6. Ministerio de Transporte de Colombia (2004). Resolución 004100 de 2004. Recuperado el 3 de marzo de 2017, en <https://www.mintransporte.gov.co/Documentos/Normatividad/Resoluciones>.
7. Ministerio de Transporte de Colombia (2009). Resolución 001782 de 2009. Recuperado el 3 de marzo de 2017, en <https://www.mintransporte.gov.co/Documentos/Normatividad/Resoluciones>.
8. Ministerio de Transporte de Colombia (2009). Resolución 006427 de 2009. Recuperado el 3 de marzo de 2017, en <https://www.mintransporte.gov.co/Documentos/Normatividad/Resoluciones>.
9. Ministerio de Transporte de Colombia (2005). Resolución 2888 de 2005. Recuperado el 3 de marzo de 2017, en <https://www.mintransporte.gov.co/Documentos/Normatividad/Resoluciones>.
10. Muñoz Moner, A.F., Carreño, Y. & Pardo, A.G. (2012). Sistemas de control inteligentes para tráfico vehicular. Universidad Autónoma de Bucaramanga. Recuperado el 12 de mayo del 2017, en http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_40/recursos/04_v19_24/revista_20/05112012/02.pdf.
11. Rodríguez-Zurita, G. (2013). *Apuntes de interferometría óptica contemporánea: ideas fundamentales*. Puebla, México.
12. Rondón, H., Delgadillo, E. & Vargas, W. (2014). Diseño, construcción y funcionamiento de un prototipo para medir cargas vehiculares en un pavimento flexible. *Revista Ingeniería de Construcción*, 29(1). Recuperado el 5 de abril de 2017, en <https://doi.org/10.4067/S0718-50732014000100005>.
13. Troncoso Rivera, J.R. & Murillo Feo, A. (2011). Evaluación del espectro de carga y coeficientes de daño en el corredor de la avenida Boyacá. Bogotá, D.C. Trabajo final de maestría para optar por el título de magister en Ingeniería Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado el 20 de abril del 2017, en <http://www.bdigital.unal.edu.co/5337/2/juanricardotroncosorivera.2011.pdf>.
14. Vélez, F.J., Serpa, C.M. & Gómez, N.D. (2010). Medición de microdeformaciones en las losas de hormigón con sensores de fibra Bragg. *Ingeniería y Ciencia*, 6. Universidad Eafit. Recuperado el 2 de mayo de 2017, en <http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v6n11/v6n11a02.pdf>.

Impacto geotécnico del diésel en un suelo arcilloso de baja plasticidad

Geotechnical impact of Diesel on a low-plasticity clay soil

LADY SOFÍA RODRÍGUEZ CUERVO¹ - JOSÉ VICENTE AMÓRTEGUI GIL²

1. Magíster en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Ingeniero civil. Profesor asociado de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

lady.rodriquez@gmail.com - jose.amortegui@escuelaing.edu.co

Recibido: 03/08/2017 Aceptado: 31/08/2017

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

Resumen

Cuando se presentan derrames de hidrocarburos en el suelo por efecto de la gravedad y las fuerzas capilares, estos fluidos se desplazan vertical y horizontalmente a través de los estratos; entonces surge el siguiente interrogante: ¿qué sucede en las propiedades geotécnicas y la composición mineralógica de un suelo arcilloso de baja plasticidad con presencia de diésel? Para dar respuesta a esta pregunta se requirió realizar ensayos de laboratorio con variables controladas. Así, la metodología implicó sacar al aire las muestras y posteriormente adicionar agua y el tratamiento de diésel de 0 %, 1 %, 3 % y 6 %, con un tiempo de exposición de una semana en condiciones de temperatura y humedad controladas. Se hicieron ensayos de laboratorio para determinar el contenido de humedad, gravedad específica de los sólidos, límites de Atterberg y resistencia a la compresión inconfiada. El análisis de mineralogía con difracción de rayos X (DRX), método del polvo, se realizó para las muestras con tratamiento de 0 % y 6 % de diésel.

Es importante precisar que se evaluó el efecto de la temperatura en la ejecución de los ensayos, si se desconoce de la presencia de diésel en el suelo se usa una temperatura de 110 ± 5 °C, y si se conoce la presencia de diésel en el suelo se utiliza una temperatura de 50 ± 5 °C. Los resultados de la investigación comprobaron los cambios en las propiedades geotécnicas y la incertidumbre en la estimación del contenido de humedad y la gravedad específica de los sólidos, pero la composición mineralógica no se vio afectada; no obstante, se redujo el porcentaje de micas.

Palabras claves: arcillas, diésel, propiedades geotécnicas, mineralogía.

Abstract

When hydrocarbon spills occur on the soil, due to gravity and capillary forces, these fluids move vertically and horizontally through the different strata. This raises the following question: what happens in the geotechnical properties and mineralogical composition of a low-plasticity clay soil when exposed to Diesel? To answer this question, laboratory tests with controlled variables were required. The methodology required for the samples to be air-dried and subsequently wet. A diesel treatment of 0%, 1%, 3% and 6% was added with a one-week exposure period under controlled temperature and humidity conditions. Laboratory tests were performed to determine the moisture content, specific gravity of the solids, Atterberg limits, and resistance to unconfined compression. Analysis of mineralogy with X-ray diffraction (XRD), powder method, was performed for samples with 0% and 6% diesel treatment. It is important to clarify that the effect of temperature in the performance of the tests was assessed; if the presence of diesel in the soil is unknown a temperature of 110 ± 5 °C was used, and if the presence of Diesel in the soil is known a temperature of 50 ± 5 °C was used. The results of the investigation verified the changes in the geotechnical properties and the uncertainty in the estimation of the moisture content and the specific gravity of the solids, but the mineralogical composition was not affected; however, the percentage of micas was reduced.

Keywords: clays, diesel, geotechnical properties, mineralogy.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, el crecimiento de la población mundial ha generado el aumento en el consumo del petróleo y sus derivados, sector en el que se han masificado las refineras, redes de transporte, centros de almacenamiento y venta de combustibles, lo que aumenta la probabilidad de que se presenten derrames. Los derrames pueden ocurrir por accidentes durante el transporte en carreteras o sistemas ferroviarios, fugas en los tanques de almacenamiento o líneas de conducción, y por tomas clandestinas o atentados contra la infraestructura petrolera (Zárate, 2014).

Los derrames de hidrocarburos afectan la estructura del suelo por la ruptura de los agregados, aumentando por ende la retención del agua en la capa superficial y el potencial hídrico (Brito, Lema & García, 2003, p. 89); en consecuencia, si estos suelos son usados como materiales para carreteras o en la construcción de obras civiles sus cambios estructurales, mineralógicos y propiedades índice son cruciales para asegurar la estabilidad y seguridad en las obras. Entonces, el interrogante es: ¿qué sucede en las propiedades geotécnicas y la composición mineralógica del suelo cuando está contaminado por hidrocarburos?

Varios autores se han hecho este cuestionamiento. Izdebska-Mucha y Trzciński (2008) evidencian cambios de tipo microestructural. Zárate (2014) observó cambios en los límites de consistencia y resistencia del material. Bian, Liu, Cai y Chu (2016) reportan cambios en la distribución de las partículas y una leve influencia en los límites de consistencia. Ochepo y Joseph (2014) encontraron reducción de la resistencia a la compresión confinada, haciendo que el suelo sea más susceptible de fallar en la medida en que se incremente la cantidad de hidrocarburo. Akinwumi, Diwa y Obianigwe (2014) reportan incremento de los límites líquido y plástico al aumentar la cantidad del hidrocarburo, pero la gravedad específica se redujo con el incremento de la cantidad del hidrocarburo. Khosravi, Ghasemzadeh, Sabour y Yazdani (2013) reportan aumento de la cohesión y el límite líquido, y disminución del ángulo de fricción interna y el límite plástico con el aumento en la cantidad de hidrocarburo; así mismo, se presentó formación de estructuras floculadas y no hubo cambios significativos en la resistencia al corte; Joseph y Hari (2015) reportan reducción del ángulo de fricción interna, cohesión y límites de Atterberg, y un aumento del pH, producto

de la presencia del hidrocarburo. Liu, Liu, y Cai (2015) reportan disminución en los límites de Atterberg y la resistencia a la compresión confinada al aumentar la cantidad de hidrocarburo. Tong, Chen, Zheng y Li (2012) reportan reducción de los límites de Atterberg al aumentar la cantidad de hidrocarburo. Walia, Singh y Kaur (2013) reportan disminución de la gravedad específica de los sólidos y la resistencia a la compresión confinada, y aumento en los límites de Atterberg por la presencia del hidrocarburo. Rasheed, Ahmed, y Jassim (2014) reportan disminución de la gravedad específica de los sólidos, el índice de plasticidad y la cohesión, y aumento de los límites de Atterberg y del ángulo de fricción interna por la presencia del hidrocarburo. Tianyuan, Junjie, Yongxia y Jiangjiao (2013) reportan disminución de la resistencia a la compresión confinada del suelo por la presencia de hidrocarburos. Al igual que otros autores, ponen de manifiesto la importancia de continuar haciendo investigaciones para determinar los cambios en la estructura, mineralogía y propiedades geotécnicas del suelo ante la presencia de hidrocarburos.

Todos los resultados de estas investigaciones ponen de manifiesto el cambio de las características físicas, propiedades índice, propiedades mecánicas, estructura y mineralogía del suelo; sin embargo, hay casos que reportan variaciones no significativas, según las condiciones de desarrollo del ensayo, tipo de hidrocarburo, tipo de suelo y porcentaje de hidrocarburo presente en el suelo (Tong et al., 2012).

METODOLOGÍA

La experimentación se diseñó con base en la revisión de la bibliografía del periodo comprendido entre 2008 y 2016. Se consultó en las bases de datos de Elsevier, Google Scholar, Springer, CrossRef, Scielo, GeoScienceWorld, Clays and Minerals, entre otras, y con base en esto se pudo encontrar que las muestras usadas en la investigación correspondieron a una arcilla de baja plasticidad, cuyo lugar de procedencia se desconoce, y presentaron 1,1 % de contenido de materia orgánica. El proceso experimental implicó que las muestras se secan al aire (temperatura inferior a 40 °C), de tal forma que no se afectará su composición química ni sus propiedades; luego se procedió a triturar las muestras y adicionarle agua, para alcanzar un contenido de humedad del 9,0 %. Posteriormente, se adicionaron 0,

% 1 %, 3 % y 6 % de diésel respecto al peso seco de las muestras, se mezcló hasta obtener un material homogéneo y uniforme. Este material se puso en bolsas herméticas para evitar pérdidas por evaporación, y almacenado en un cuarto oscuro a temperatura controlada de 19 °C durante un periodo de siete días para lograr el equilibrio entre el diésel y el suelo. Al cabo de este tiempo se ejecutaron los ensayos de laboratorio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis mineralógico

El análisis mineralógico se realizó con el ensayo de difracción por rayos X (DXR), método del polvo. Este método semicuantitativo se aplicó a la muestra control (0 % diésel) y a la muestra con tratamiento del 6 % de diésel. Se evidenció que la muestra control tenía como mineral dominante el cuarzo (>50 %), presencia de caolinita (5-15 %), trazas de feldespato (<5 %), presencia de micas (5-15 %) y arcillas 14 Å, donde se encuentran esmectita, vermiculita y clorita (<5 %), y que para su diferenciación se requiere procesar la muestra con otros tratamientos, como etilenglicol y calentamiento a 550 °C. La muestra con tratamiento del 6 % de diésel tenía como mineral predominante el cuarzo (>50 %), presencia de caolinita (5-15 %), trazas de feldespato (<5 %), trazas de micas (<5 %) y arcillas 14 Å, donde se encuentran esmectita, vermiculita y clorita (<5 %). Por lo tanto, los resultados demuestran la disminución en la presencia de las micas respecto a la muestra control, donde el diésel estuvo presente en los espacios interlaminares, los cuales representan la mayor superficie externa de este mineral, interactuando químicamente y llevando la reducción del porcentaje presente en la muestra. Además, se registraron una atenuación en las reflexiones de las arcillas 14 Å, una acentuación en las reflexiones de la caolinita y los feldespatos por la presencia del diésel.

Contenido de humedad

Se usó la norma INVE-122-13 (Invías, 2013a), suponiendo que no se conoce la presencia de diésel en el suelo; en el caso contrario se utilizó la adaptación de la norma INVE-122-13 para suelos afectados por derrames de hidrocarburo, proyecto desarrollado por la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga,

Colciencias y Ecopetrol S.A. Instituto Colombiano del Petróleo (Serrano Guzmán & Torrado Gómez, 2013c).

En la figura siguiente se evidencia que el contenido de humedad aumenta para ambas temperaturas de ensayo, en la medida en que se incrementa el porcentaje de hidrocarburo en la estructura del suelo. El valor de la propiedad es mayor para la temperatura de ensayo de 110±5 °C, posiblemente porque se tiene una mayor tasa de evaporación de los líquidos presentes en la estructura del suelo. La incertidumbre experimental en la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110±5 °C y 50±5 °C es del 20,1 %, la cual es aceptable para los resultados de la investigación, teniendo en cuenta la naturaleza del suelo y la cantidad de unidades experimentales (figura 1).

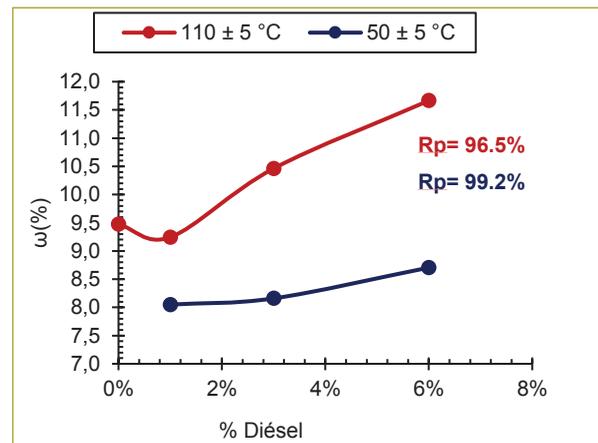


Figura 1. Variación del contenido de humedad con el porcentaje de diésel. **Fuente:** La autora.

No obstante, la expresión con la cual se hace el cálculo del contenido de humedad es la relación entre el peso de agua y el peso de los sólidos.

$$\omega(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (1.1)$$

Ahora bien, cuando hay presencia de diésel en el suelo no es correcto determinar el contenido de humedad con la expresión (1.1) debido a que el diésel no es agua; es decir, el contenido de humedad es con respecto a la fracción de agua presente en el suelo, no con respecto a la fracción de fluidos presentes en el suelo. Por lo tanto, el contenido de humedad teórico será el contenido de humedad de las muestras sin diésel más el porcentaje de diésel presente en la muestra, obteniendo la siguiente expresión:

$$\omega \text{ teórico (\%)} = \left(\frac{W_w}{W_s} + \frac{W_{\text{diésel}}}{W_s} \right) \times 100 \quad (1.2)$$

$$= \omega(\%) + \text{diésel}(\%)$$

Así mismo, se presenta la comparación del valor del contenido de humedad teórico con respecto al valor de esta propiedad (figura 2), obtenido por medio de ensayos de laboratorio (figura 1). El contenido de humedad definido teóricamente fue 9,0 % y el obtenido en el laboratorio fue 9,5 % para la muestra control, lo cual representa una variación experimental del 5,55 %, la cual es aceptable para los propósitos de la investigación. Se observa que independiente de la temperatura de ensayo, el valor de la propiedad es inferior al valor teórico. Esto se atribuye a que durante el proceso de secado en horno parte del diésel se adhirió a las partículas sólidas del suelo, generando un aumento de su masa y, por ende, el descenso del valor de la propiedad, lo cual corrobora que durante los procesos de secado este hidrocarburo puede quedar de forma remanente en las partículas sólidas del suelo. De ello resulta que los valores de los límites de Atterberg, al ser calculados como un contenido de humedad, tienen una gran incertidumbre, aplicando los procedimientos de las normas vigentes. Por otra parte, se observa que según la temperatura de ensayo el valor de la propiedad presenta cambios, con tendencia a tener una mayor tasa de evaporación del diésel a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C.

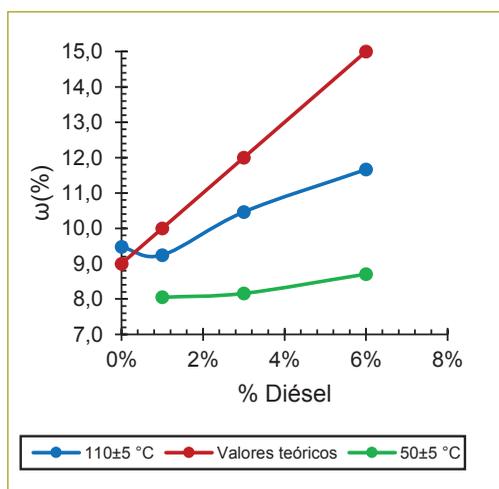


Figura 2. Comparación del contenido de humedad teórico con el obtenido por medio de ensayos de laboratorio. **Fuente:** La autora.

Gravedad específica de los sólidos

Se usó la norma INVE-128-13 (Invías, 2013e), suponiendo que no se conoce la presencia de diésel en el suelo; en el caso contrario se empleó la norma INVE-128-07 (Invías, 2007). Así mismo, se observa que la gravedad específica de los sólidos de esta arcilla era 2,71 para la muestra control y con la adición del 6 % diésel a su estructura disminuyó a 2,60 para la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C (figura 3). Para la temperatura de ensayo de 60 °C pasa de 2,70 para la muestra con tratamiento del 1 % de diésel a 2,62 para la muestra con tratamiento del 6 % de diésel. La temperatura de ensayo afectó ligeramente los resultados obtenidos, evidenciando que a 110 ± 5 °C es mayor la reducción de esta propiedad. Igualmente, la adsorción del diésel a las partículas del suelo produjo la disminución de la fracción sólida, obteniéndose una tendencia descendente en esta propiedad.

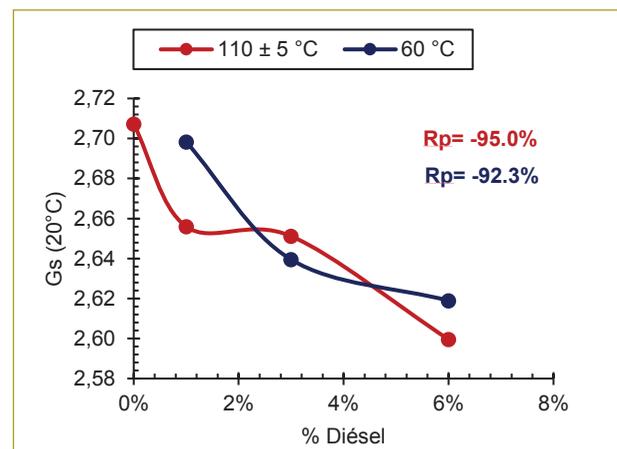


Figura 3. Variación de la gravedad específica de los sólidos con el porcentaje de diésel. **Fuente:** La autora.

Límites de Atterberg

Se usaron las normas INVE-125-13 (Invías, 2013b), INVE-126-13 (Invías, 2013c) y INVE-127-13 (Invías, 2013d), suponiendo que no se conoce la presencia de diésel en el suelo; en caso contrario, se ensayaron las muestras con la adaptación de las normas anteriores para suelos afectados por derrames de hidrocarburo, proyecto desarrollado por la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga, Colciencias y Ecopetrol S.A. - Instituto Colombiano del Petróleo (Serrano Guzmán & Torrado Gómez, 2013b, 2013d).

También se observa que el límite líquido del suelo se incrementó con la adición del hidrocarburo, pasando de 24,4 % para la muestra control a 28,1 % para la muestra con tratamiento del 6 % de diésel a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C, lo cual representa una variación experimental del 15,2 %. Para la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C, pasó de 24,2 % para la muestra con tratamiento del 1 % de diésel a 25,5 % para la muestra con tratamiento del 6 % de diésel, lo cual representa una variación experimental del 5,37 % (figura 4).

Así mismo, se observa que el límite plástico del suelo se incrementó con la adición del hidrocarburo, pasando de 13,5 % para la muestra control a 15,3 % para la muestra con tratamiento del 6 % de diésel a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C, lo cual representa una variación experimental del 13,3 % (figura 5). Para la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C, pasó de 13,4 % para la muestra con tratamiento del 1 % a 13,7 % para la muestra con tratamiento del 6 % de diésel, lo cual representa una variación experimental del 2,24 %.

Se puede apreciar que el límite de contracción del suelo se incrementó con la adición del hidrocarburo, pasando de 9,0 % para la muestra control a 14,7 % para la muestra con tratamiento del 6 % de diésel a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C, lo cual representa una variación experimental del 63,3 %. Para la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C disminuye el valor de la propiedad, al pasar de 11,1 % para la muestra con tratamiento del 1 % de diésel a 10,5 % para la muestra con tratamiento del 6 % de diésel, lo cual representa una variación experimental del 5,4 % (figura 6).

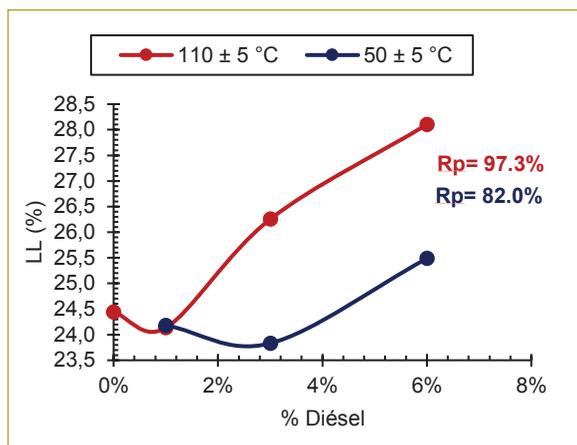


Figura 4. Variación del límite líquido con el porcentaje de diésel. Fuente: La autora.

En este caso, la temperatura de ensayo modifica notablemente el valor de los límites de contracción y su comportamiento. Sumado a que durante el proceso de secado en horno parte del diésel se solidifica y se adhiere a las partículas sólidas del suelo, particularidad que no se tiene en cuenta en la expresión del contenido de humedad de las normas utilizadas, y por ende, los valores de los límites de Atterberg determinados tienen incertidumbre producto de la expresión de cálculo.

El aumento en los límites se explica porque el diésel, al adherirse a las partículas de suelo, les proporciona una cohesión adicional, sin disminución de la doble capa difusa, lo que hace que se requiera más agua para cambiar la consistencia del suelo.

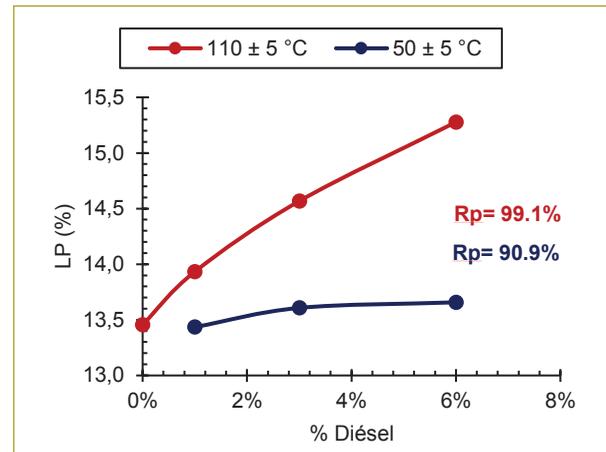


Figura 5. Variación del límite plástico con el porcentaje de diésel. Fuente: La autora.

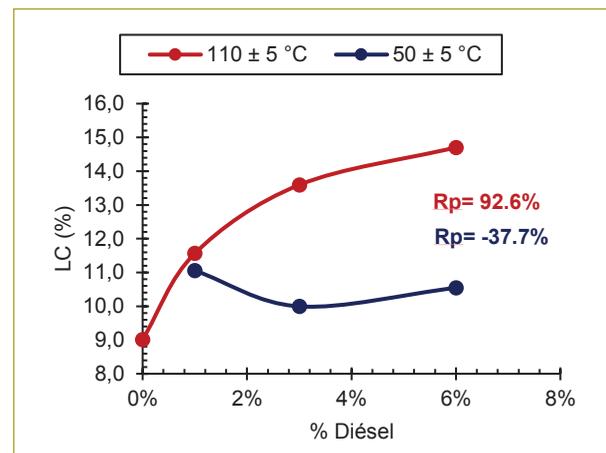


Figura 6. Variación del límite de contracción con el porcentaje de diésel. Fuente: La autora.

Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) (mEq, 100 g) se determinó usando las correlaciones con el límite líquido presentadas en el estudio realizado por Yukselen y Kaya (2006). Por lo tanto, en las figuras 7 y 8 se observa el incremento en el valor de esta propiedad, donde el diésel da una cohesión adicional e incrementa aparentemente la capacidad de intercambiar cationes de las partículas del suelo, sin que se llegue a modificar su potencial de baja expansión (figuras 7 y 8).

$$CIC = 0,45 LL - 5 \text{ (Farrar \& Coleman, 1967)}$$

$$CIC = 1,74 LL - 38,3 \text{ (Smith et al., 1985)}$$

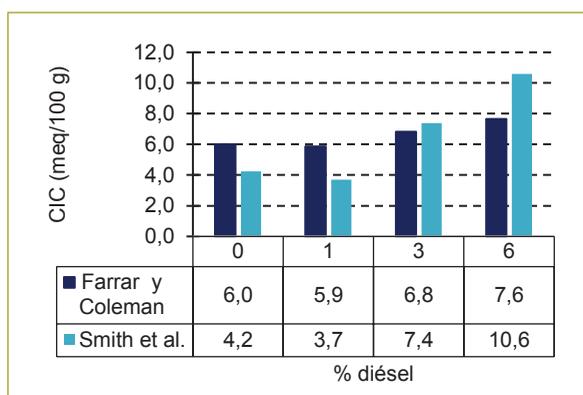


Figura 7. Variación de la CIC a 110 ± 5 °C con el porcentaje de diésel. Fuente: La autora.

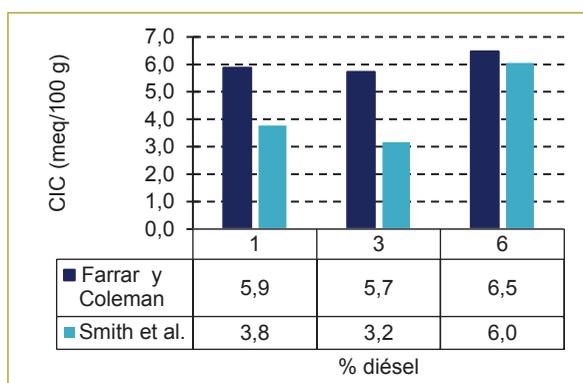


Figura 8. Variación de la CIC a 50 ± 5 °C con el porcentaje de diésel.

Clasificación del suelo

Las muestras se clasificaron según la norma INVE-181-13 (Invías, 2013g). En la figura siguiente se observa que el suelo se clasificó como una arcilla de baja

compresibilidad (CL) para todos los tratamientos y las temperaturas de ensayo utilizadas (figura 9).

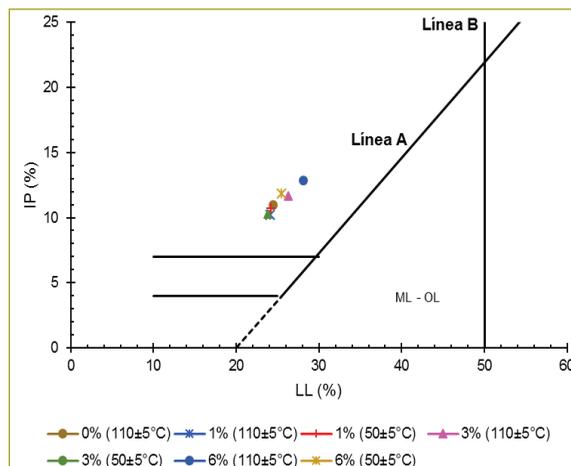


Figura 9. Variación del SUCS con el porcentaje de diésel. Fuente: La autora.

Resistencia a la compresión confinada

Se utilizó la norma INVE-152-13 (Invías, 2013f), suponiendo que no se conoce la presencia de diésel en el suelo; en el caso contrario se usó la adaptación del ensayo de compresión confinada en muestras de suelos afectados por derrames de hidrocarburo, proyecto desarrollado por la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga, Colciencias y Ecopetrol S.A. - Instituto Colombiano del Petróleo (Serrano Guzmán & Torrado Gómez, 2013a).

La densidad total del suelo correspondió a 2.17 g/cm³, y en la figura siguiente se aprecia la pérdida de resistencia del suelo en la medida en que se incrementó la cantidad de diésel presente en su estructura, viéndose reducida su capacidad para deformarse (figura 10). Al trabajar con muestras alteradas la falla que se presentó fue frágil. La resistencia pasó de 246,7 KPa a 112,3 KPa para el tratamiento de 6 % de diésel, lo cual representa una reducción del 54,5 %. Así mismo, con el tratamiento de 6 % de diésel se tiene la menor deformación unitaria de 2,2 %. Esta disminución en la resistencia y la deformación unitaria se explica puesto que, al tener el suelo en sus poros agua y diésel, se reduce la constante dieléctrica de los fluidos de poros, lo que implica que disminuye la capacidad de los fluidos de separar iones de cargas opuestas y se incrementan las fuerzas de atracción, afectándose la doble capa difusa y llevando a la reducción de la resistencia a la compresión confinada y la resistencia al corte.

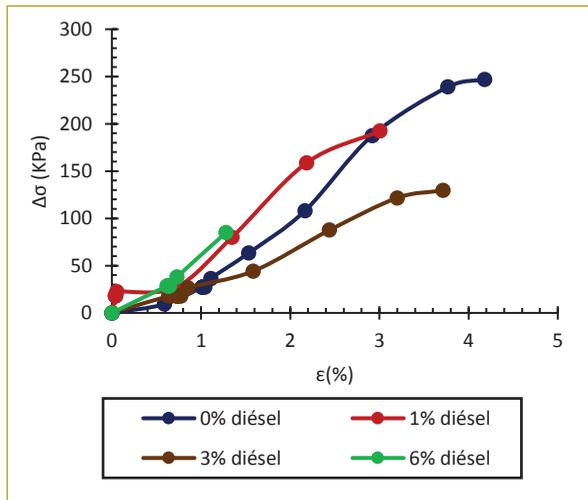


Figura 10. Variación de la resistencia a la compresión inconfina con el porcentaje de diésel. Fuente: La autora.

Relaciones volumétricas y gravimétricas

A continuación se presentan las variaciones en la relación de vacíos, la porosidad y la saturación con el aumento en el porcentaje de diésel. La reducción en la relación de vacíos y la porosidad se asocia a la capacidad del diésel para fomentar que el agua forme estructuras floculadas con las partículas de suelo. Y la saturación aumento en la medida en que se incrementó el hidrocarburo porque ocupó los espacios vacíos del suelo (tabla 1).

Tabla 1

Variación de las relaciones de fase con el porcentaje de diésel

	Diésel							
	0%		1%		3%		6%	
	110 ± 5 °C	110 ± 5 °C	50 ± 5 °C	110 ± 5 °C	50 ± 5 °C	110 ± 5 °C	50 ± 5 °C	
γ_t (KN/m ³)	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	
γ_d (KN/m ³)	19,4	19,5	19,7	19,3	19,7	19,1	19,6	
e	0,37	0,34	0,34	0,35	0,32	0,34	0,31	
η (%)	26,8	25,3	25,6	26,0	24,0	25,3	23,8	
S (%)	69,9	72,6	63,1	82,7	68,0	89,5	72,9	

Fuente: La autora.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El diésel no afectó la estructura mineralógica del suelo, teniendo en cuenta que el periodo de exposición fue muy corto, apenas de siete días. Las fases cristalinas

identificadas fueron cinco, el mineral dominante fue el cuarzo y se encontraron en proporciones más bajas los minerales micas, caolinita, feldespatos y arcillas 14 Å, pero hubo una reducción en el porcentaje de participación de las micas, una atenuación de las reflexiones de las arcillas 14 Å y una acentuación de las reflexiones de la caolinita y los feldespatos.

El contenido de humedad presentó una tendencia a incrementarse, sin ser proporcional con la cantidad de diésel, siendo el valor de la propiedad mayor para la temperatura de 110±5 °C con respecto a la temperatura de 50±5 °C. No obstante, durante el proceso de secado en horno parte del diésel se solidifico y se adhirió a las partículas del suelo, particularidad que no se toma en cuenta dentro de la expresión del cálculo del contenido de humedad, por ende, los valores obtenidos tienen una incertidumbre generada por la expresión de cálculo. La gravedad específica de los sólidos disminuyó, aunque el procedimiento experimental es cuestionable puesto que el diésel interactúa con el agua, y durante el secado en horno parte del hidrocarburo queda de forma remanente en las partículas sólidas del suelo.

Los límites de Atterberg fueron afectados por el diésel, presentándose un incremento, sin embargo, al ser un contenido de humedad su expresión de cálculo cuando se tienen suelos con diésel es cuestionable porque parte del diésel queda remanente en las partículas sólidas del suelo después del proceso de secado en horno, independiente de la temperatura de ensayo. La CIC tiende a aumentar y su potencial de expansión no cambia, se mantiene en baja expansión, precisando que fue determinada a partir de una correlación con el límite líquido. El suelo no cambió su clasificación de arcilla de baja compresibilidad (CL), según el SUCS. El suelo pierde resistencia con la presencia del diésel y reduce su capacidad para deformarse. Se reportó disminución de la relación de vacíos y de la porosidad, así como aumento del grado de saturación. Cuando el suelo tenía 1 % y 3 % de diésel se presentó un comportamiento indefinido en las propiedades del suelo, por lo que estos porcentajes son un valor de transición para el comportamiento de este suelo. La temperatura de ensayo afecta los resultados de los ensayos, siendo su comportamiento indefinido y generando incertidumbre en la estimación de los parámetros del suelo.

Finalmente, se recomienda continuar las investigaciones en esta área, puesto que el diésel ocasionó cam-

bios en el suelo usado en la experimentación durante un periodo de exposición de una semana; luego, si se tienen mayores tiempos de exposición, cómo cambiarían la fábrica, estructura, composición mineralógica y propiedades de los suelos arcillosos.

Por otra parte, la temperatura es un factor influyente en el valor obtenido de las propiedades geotécnicas del suelo, por lo cual se sugiere realizar más estudios con un mayor número de unidades experimentales, con el fin de validar los resultados obtenidos, debido a que la bibliografía hasta la fecha no referencia la temperatura usada en los diversos estudios; además, hay que determinar cambios en las propiedades mecánicas del suelo y curvas de succión. Adicionalmente, se recomienda validar la expresión para la determinación del contenido de humedad, donde se tomen en cuenta la evaporación del hidrocarburo y la parte remanente en estado sólido, pues las normas existentes no tienen estas consideraciones que influyen en el cálculo de los límites de Atterberg.

Finalmente, se deben validar las metodologías para determinar el contenido de humedad, límites de Atterberg y gravedad específica de los sólidos.

REFERENCIAS

- Akinwumi, I. I., Diwa, D. & Obianigwe, N. (2014). Effects of crude oil contamination on the index properties, strength and permeability of lateritic clay. *International Journal of Applied Sciences and Engineering Research*, 3(4), 816–824.
- Bian, H., Liu, S., Cai, G. & Chu, Y. (2016). Influence of diesel pollution on the physical properties of soils. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(14), 552-555. <https://doi.org/10.3208/jgssp.CHN-16>
- Brito, O. O., Lema, I. I. & García, A. G. (2003). La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en México. *Gaceta ecológica*, (69), 83–92.
- Invías (2007). INVE-128-07. Determinación de la gravedad específica de los suelos y del llenante mineral.
- Invías (2013a). INVE-122-13. Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo - agregado.
- Invías (2013b). INVE-125-13. Determinación del límite líquido de los suelos.
- Invías (2013c). INVE-126-13. Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.
- Invías (2013d). INVE-127-13. Determinación de los factores de contracción de los suelos.
- Invías (2013e). INVE-128-13. Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua.
- Invías (2013f). INVE-152-13. Compresión confinada en muestras de suelo.
- Invías (2013g). INVE-181-13. Sistema unificado de clasificación de suelos para propósitos de ingeniería.
- Izdebska-Mucha, D. & Trzcinski, J. (2008). Effects of petroleum pollution on clay soil microstructure. *geologija*, 50, 68–74. <https://doi.org/10.2478/V10056-008-0027-0>
- Joseph, J. & Hari, G. (2015). Investigation on the Effects of Hydrocarbon Spillage on Soil Properties. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4.
- Khosravi, E., Ghasemzadeh, H., Sabour, M. R., & Yazdani, H. (2013). Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite. *Engineering Geology*, 166, 11-16. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.08.004>
- Liu, Z., Liu, S. & Cai, Y. (2015). Engineering property test of kaolin clay contaminated by diesel oil. *Journal of Central South University*, 22(12), 4837-4843. <https://doi.org/10.1007/s11771-015-3035-3>.
- Rasheed, Z. N., Ahmed, F. R., & Jassim, H. M. (2014). Effect of crude oil products on the geotechnical properties of soil (vol. 186, pp. 353-362). *WIT Transactions on Ecology and The Environment*. <https://doi.org/10.2495/ESUS140301>.
- Serrano Guzmán, M. F. & Torrado Gómez, L. M. (2013a). Compresión confinada en muestras de suelos afectados por derrames de hidrocarburo. Tomadao y adaptado de INVE-152-13. Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.
- Serrano Guzmán, M. F. & Torrado Gómez, L. M. (2013b). Determinación del límite líquido de los suelos afectados por derrames de hidrocarburo. Tomado y adaptado de INVE - 125 - 13. Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga.
- Serrano Guzmán, M. F. & Torrado Gómez, L. M. (2013c). Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo afectado por derrames de hidrocarburo, roca y mezclas de suelo afectado con hidrocarburo - agregado. Tomado y adaptado de INVE-122-13. Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga.
- Serrano Guzmán, M. F. & Torrado Gómez, L. M. (2013d). Límite plástico e índice de plasticidad de suelos afectados con hidrocarburo. Tomado y adaptado de INVE - 126 - 13. Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga.
- Tianyuan, Z., Junjie, Y., Yongxia, L. & Jiangjiao, L. (2013). Experimental study on engineering properties of diesel contaminated soil. Recuperado a partir de http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-GCKC201301002.htm.
- Tong, L., Chen, W. S., Zheng, X. L. & Li, M. (2012). Effect of Oil Contamination on Atterberg Limits of Soil. *Advanced Materials Research*, 374-377, 336-338. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.374-377.336>.
- Walia, B. S., Singh, G. & Kaur, M. (2013). Study of diesel contaminated clayey soil. En *Proceedings of Indian Geotechnical Conference* (pp. 22–24). Roorkee, India. Recuperado a partir de http://www.igs.org.in/igc2013/igc_2013_roorkee_proceedings/full_length_paper/14%20Th%20PDF/14%20Th-09.pdf.
- Yukselen, Y. & Kaya, A. (2006). Prediction of cation exchange capacity from soil index properties. *Clay Minerals*, 41(4), 827-837. <https://doi.org/10.1180/0009855064140222>.
- Zárate, A. Y. (2014, agosto 4). *Evaluación del impacto de la contaminación con diésel en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso* (Thesis). Recuperado a partir de <http://ri.uaq.mx/handle/123456789/1738>.

Planes departamentales de acueductos en Colombia. Marco general y conceptual. Criterios

Departments' aqueduct plans in Colombia. General and conceptual framework. Criteria

HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ¹ - MÓNICA LILIANA RODRÍGUEZ MUÑOZ²

1. Profesor Titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Magíster en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.com - monica.rodriguez@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 06/08/2017 Aceptado: 31/08/2017

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

Resumen

Por medio de este artículo los autores quieren presentar un análisis de la estructura y situación actual de los planes departamentales de agua en Colombia. Por consiguiente, es preciso establecer que los planes en relación con el suministro y cobertura de agua potable son una herramienta fundamental, cuyos objetivos primordiales son conocer la situación actual de una región, identificar fortalezas y debilidades, crear y planificar opciones y diseños particulares, incrementar indicadores (calidad, cobertura y continuidad), mejorar la calidad del servicio de suministro de agua potable y, finalmente, permitir el desarrollo y crecimiento de una población.

De acuerdo con estas características mencionadas previamente, los criterios y la estructura actual de los planes, se identificaron las fortalezas y debilidades que han tenido éstos durante su desarrollo, con el fin de exponer algunas recomendaciones que podrían ayudar a transformar en fortalezas las debilidades de los planes en el aspecto técnico (términos de referencia, estudios técnicos y relación con etapas de posdiseño), con la intención de que se cumplan los objetivos del proyecto y que se tengan en cuenta las necesidades actuales y futuras de la población.

Palabras claves: acueducto, términos de referencia, alcance, estudios técnicos, municipio, indicadores.

Abstract

In this article, the authors want to show an analysis of the structure and current situation of departments' water plans in Colombia. Therefore, it is necessary to establish that these plans, in terms of drinking water supply and coverage, are a fundamental tool, whose prime objectives are getting to know the current situation of a region, identifying strengths and weaknesses, creating and planning specific options and designs, increasing statistical results (quality, coverage, and continuity), improving drinking water supply service quality, and, finally, allowing the development and growth of a population.

According to the previous information, strengths and weaknesses throughout the works' development are identified to make suggestions that may help shift weaknesses into strengths for plans in their technical aspects (reference terms, technical designs, and relationship with post-design stages), with the purpose of complying with the expected project goals, bearing in mind the current and future needs of the population.

Keywords: aqueduct, reference terms, reach, technical studies, municipality, estimates.

ANTECEDENTES

Desde el surgimiento de la Constitución Política de 1991, se instituyó en Colombia que todas las personas deberían tener acceso a los servicios públicos básicos, con arreglo a la Ley 142 de 1994. De igual manera, se estableció que sólo en algunos casos los municipios podrían prestar el servicio de agua, dado que siempre debería prestarse a través de empresas especializadas.

Por consiguiente, se asignó a cada uno de los municipios del país la obligación de cumplir con este reto, pero con el paso de los años se pudo observar que era necesario brindar una colaboración no sólo económica sino técnica para estructurar las empresas prestadoras del servicio en cada municipio.

Con base en lo anterior, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial empezó a implementar los programas de modernización empresarial (PME) en 1998, los cuales tenían como fin brindar apoyo económico y técnico, de modo que se permitiera la entrada a nuevos operadores especializados y el mejoramiento de la gestión empresarial de los pequeños prestadores, lo cual se denominó Programa de Cultura Empresarial.

De acuerdo con esta iniciativa, el gobierno nacional brindó apoyo, asistencia técnica y recursos para la financiación de planes de obras e inversiones integrales, así como la estructuración técnica, legal y financiera de esquemas de prestación de los servicios públicos domiciliarios.

Por medio de estos nuevos lineamientos se contribuyó a crear y consolidar entidades autónomas que garantizaran la adecuada prestación del servicio de acueducto, a través del cumplimiento de los indicadores de calidad, continuidad y cobertura.

A pesar de que este programa se inició en 1998, se pudo observar que no se estaba dando cumplimiento a todos los indicadores, lo que llevó al gobierno nacional a diseñar una nueva estructura que ayudara a cada uno de los municipios, pero que en su fundamento cumpliera con los mismos objetivos que tenían los PME.

No obstante, antes de la implementación de los planes departamentales de agua (PDA) en el año 2006, el departamento del Cesar ejecutó un plan piloto a través de la solicitud de créditos, que permitió la construcción de obras de inversiones, ajuste y fortalecimiento institucional de las empresas municipales, al igual que los gastos de evaluación técnica contemplados en el programa de transformación estructural de la prestación

de los servicios de agua potable y saneamiento básico (APSB). Este proyecto se realizó de acuerdo con las políticas establecidas por el gobierno, cuyo principal objetivo era incrementar la cobertura del sistema de abastecimiento de agua potable al 95 % y el de acueducto al 85 %.

Con este antecedente, los municipios, el departamento y el gobierno se unen y crean los planes departamentales de agua para el manejo empresarial de los servicios de agua potable y saneamiento básico en el año 2007.

Por otra parte, los PDA se han ajustado con las experiencias de los últimos años, razón por la cual se dividieron en planes para las capitales y centros urbanos y en planes para acueducto rural. Por tal motivo, los planes para las capitales y centros urbanos se desarrollan en el marco del Programa Agua y Saneamiento para la Prosperidad - Planes Departamentales para el Manejo Empresarial de los Servicios de Agua y Saneamiento (PAP-PDA), los cuales tienen como fundamento la participación interdisciplinaria e interinstitucional del departamento, los municipios o distritos, el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT), el Departamento Nacional de Planeación (DNP) y las autoridades ambientales con jurisdicción en los municipios o distritos ubicados en el territorio del respectivo departamento.

INDICADORES DE LOS SISTEMAS DE ACUEDUCTOS EN COLOMBIA

Con base en lo anterior, una de las maneras para analizar si los planes han surtido efecto en Colombia consiste en determinar el estado en que se encuentran los acueductos. Para ello es necesario analizar varios factores, como la cobertura del sistema, la calidad y la continuidad con la cual se está suministrando agua a una región o lugar.

Dado lo anterior, existen entidades como la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) y la Unicef, que a partir de sus estudios mostraron el avance en la cobertura, la calidad y la continuidad del servicio de acueducto.

Así, para el año 2005 se tienen registros de la cobertura del sistema, a partir de las estadísticas del DANE para ese año, el cual presentó el estado de la cobertura

de los servicios públicos en las zonas urbana y rural, registrando para el año 2005 una cobertura del 94,3 % para la zona urbana y del 47,1 % para la rural, según el índice de necesidades básicas insatisfechas (NBI).

Para el año 2008, el DANE registró un incremento entre los años 2005 y 2008 de la cobertura del suministro de agua potable en la zona urbana, correspondiente a 0,5 puntos porcentuales, mientras que para la zona rural este valor es de 11,2 puntos porcentuales, lo que demuestra que el país se ha concentrado en incrementar la cobertura en la zona rural.

Según los registros definidos por el DANE en la Encuesta Nacional de Calidad de Vida (ENCV), el servicio de acueducto a escala nacional tuvo un aumento del 86,7 (2008) al 87,6 % en el 2010. Al discriminar las zonas urbana y rural, se obtuvo que para las cabeceras se incrementó la cobertura de un 94,8 % (2008) a 95,9 % (2010), mientras que en el sector rural, en comparación con los datos registrados en el año 2008, hubo una reducción del 58,3 al 57,1 %.

A pesar de que el gobierno colombiano hizo un esfuerzo importante para inyectar recursos al sector de agua potable y saneamiento básico, entre los años 2010 y 2011 se presentó el fenómeno climático conocido como la Niña, el cual afectó significativamente la infraestructura y la prestación de los servicios de agua potable en el ámbito nacional. Los perjuicios ocasionados por este fenómeno aún no se han solucionado en su totalidad.

Éste ha sido el mayor inconveniente de tipo económico, pues debido a dicho fenómeno el gobierno nacional ha destinado cuantiosos recursos para la rehabilitación de los sistemas de acueducto y alcantarillado de por lo menos 409 municipios, lo cual redujo en gran medida los dineros destinados al incremento de la cobertura del servicio de agua potable para algunos municipios que aún carecen del sistema o cuya infraestructura es casi nula.

Así, al hacer un análisis comparativo entre las estadísticas registradas para los años 2008 y 2010, se pudo definir que la cobertura en el servicio de acueducto tuvo una disminución significativa del 87,6 al 87,3 % en el 2010. Sin embargo, en el sector rural hubo una reducción un poco mayor, del 57,1 al 56,3 %.

ESTRUCTURA DE LOS PLANES DEPARTAMENTALES DE AGUA

La estructura institucional y el contenido de los planes provienen de una serie de modificaciones desde el surgimiento del Conpes 3463, “Planes departamentales de agua y saneamiento para el manejo empresarial de los servicios de acueducto, alcantarillado y aseo”, hasta la última reglamentación, generada en el Decreto 2446 de 2012.

A continuación se mencionan todos los principales actores involucrados como las características de cada una de las fases que los componen.

Actores de un plan departamental

Los actores son las entidades directamente implicadas en el desarrollo y ejecución de los planes. El Decreto 3200 de 2008 los reglamentó y mediante el Decreto 2446 de 2012 se siguen manteniendo estas instituciones como principales actores involucrados en los planes:

- El departamento.
- Los municipios o distritos.
- El Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
- El Departamento Nacional de Planeación (DNP).
- Las autoridades ambientales con jurisdicción en los municipios ubicados en el territorio del respectivo departamento.

Así mismo, se encuentran las estructuras operativas reglamentadas por el Decreto 3200 de 2008 y modificadas por los decretos 4214 de 2011 y 2446 de 2012. Para esta nueva estructuración, la Gerencia Asesora no está presente; no obstante, el decreto establece que si aparece en los proyectos que se están desarrollando actualmente se debe continuar con ella hasta su finalización.

Fases de un plan departamental de agua

En el Decreto 3200 de 2008 se determina que los planes departamentales se componen de la fase I y la fase II, que tienen como fin el diagnóstico, la estructuración y la implementación de los planes.

Fase I. En esta fase, la cual parte de un convenio que se suscribe entre el Ministerio de Vivienda y el de-

partamento se inician los planes. En este convenio, el departamento se compromete a:

- Acoger la política, lineamientos, principios y objetivos sectoriales establecidos en el Plan Nacional de Desarrollo, documentos Conpes, y los demás que definan las instancias nacionales competentes en materia de agua potable y saneamiento básico.
- Tomar las medidas necesarias para implementar esa política.
- Desarrollar las gestiones que resulten pertinentes, incluyendo las acciones que correspondan al nivel municipal para su vinculación al PDA.
- Aportar los recursos a los que hace referencia el artículo 6 de la Ley 1176 de 2007, de acuerdo con lo previsto en el artículo 10 de dicha ley y en el convenio.

Esta fase, a su vez, se divide en dos etapas: diagnóstico y estructuración, que se definen de la siguiente manera.

Etapa I. Diagnóstico. En la etapa de diagnóstico se recopila la información requerida para conocer el estado actual de la prestación del servicio de acueducto en el municipio. Para ello es necesario acudir a diferentes fuentes, como estudios disponibles, sistemas de información sectorial, DANE, empresas de servicios públicos, planes departamentales de agua y demás fuentes que provean información sobre cobertura, calidad, continuidad y aseguramiento en la prestación de los servicios públicos.

Etapa II. Estructuración. El objetivo de esta segunda fase es definir la estructura final del Plan Departamental de Agua Potable y Saneamiento Básico en sus aspectos técnicos, institucionales y financieros. Es decir, determinar los esquemas óptimos de financiación, operación, administración y ejecución del Plan Departamental, asegurando su viabilidad financiera.

Así mismo, se plantean las estrategias que comprenden las acciones que debe realizar la entidad territorial para suplir las necesidades identificadas en la etapa del diagnóstico, considerando los recursos disponibles. En la formulación de las metas, el municipio debe tener en cuenta las estrategias y programas que implementará durante el periodo de gobierno para alcanzar los objetivos sectoriales.

Fase II. En el Decreto 3200 de 2008 se define que durante esta fase se deben implementar las estructuras operativas y el esquema fiduciario para el manejo de recursos, y se desarrollan el esquema financiero y demás acciones tendientes a alcanzar las metas de los planes. La fase II se inicia con la entrega al MVCT, por parte del departamento interesado, de la documentación correspondiente.

Adicionalmente a lo definido en el Decreto 3200 de 2008, se puede establecer que el principal objetivo de la fase de implementación es la vinculación o el fortalecimiento de los prestadores del servicio y la ejecución y supervisión del Plan de Obras e Inversiones. Esta fase permitirá consolidar la modernización empresarial del sector, así como certificar la ejecución de las inversiones requeridas en los municipios, para garantizar la adecuada provisión de los servicios de acueducto.

AVANCE DE LOS PLANES DEPARTAMENTALES EN COLOMBIA

El avance de los PDA no se ha registrado permanentemente. Sin embargo, en el año 2010 el ministerio expuso algunas estadísticas de los valores, referentes a la cantidad de proyectos aceptados, devueltos, en estudio y que a la fecha estaban pendientes de presentar. Teniendo en cuenta esta información se pudieron reconocer las principales características por las que se devolvían los proyectos. En la siguiente gráfica se presentan los resultados obtenidos:

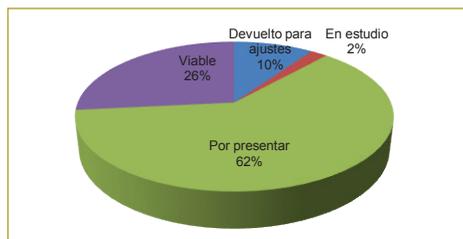


Figura 1. Proyectos presentados a ventanilla única, año 2010.

Fuente: tomado de http://www.minvivienda.gov.co/images/Agua/dinamicas/pda/avance_institucional/160311_grafica_avance_institucional_pda_280211_1800.jpg.

Se puede apreciar que a diciembre de 2010 faltaban por presentar el 62 % de los proyectos previstos para entregar este año, razón por la cual se evidencia el retraso que han tenido permanentemente los PDA en general, ya que si se compara el porcentaje de los proyectos

que faltan por presentar, los devueltos para ajustes, los que están en estudio y los proyectos que son viables, los porcentajes representan una gran diferencia, ya que es el 74 contra el 26%. Estos porcentajes son bastante preocupantes frente al desarrollo de los planes, pues la demora en la presentación a ventanilla única genera un atraso significativo en la ejecución e implementación de los proyectos. Con base en lo anterior, se pudo analizar cuáles fueron los factores determinantes para que hubieran devuelto los proyectos.

A continuación se muestra que la principal causa de devolución son las deficiencias técnicas, es decir, la carencia de memorias técnicas, ajustes en presupuesto o, en los casos más complejos, ausencia de diseños contratados o inconsistencias en los diseños realizados. (figura 2)

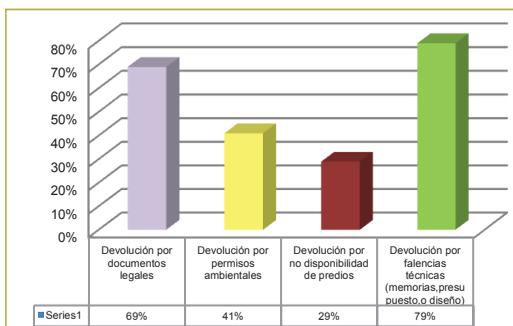


Figura 2. Causales de devolución de los proyectos según proyectos ventanilla única.

Fuente: tomado de http://www.minvivienda.gov.co/images/Agua/dinamicas/pda/avance_institucional/160311_grafica_avance_institucional_pda_280211_1800.jpg.

Después de este análisis presentado por el MVCT no se volvieron a registrar más estadísticas acerca de la ejecución de los proyectos, y sólo hasta el 2013 el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio expuso que en la actualidad se ha incrementado la cobertura de acueducto, alcantarillado y aseo, que ha alcanzado el 100 % en muchas regiones, y que se han comprometido recursos por más de \$2,3 billones en los componentes de infraestructura, preinversión y aseguramiento, y que a la fecha se están consolidando 1.200 estudios contratados en toda Colombia.

Sin embargo, no se ha generado un reporte más detallado del avance de los proyectos; sólo se puede concluir, por la experiencia de muchos consultores, que aún se siguen presentando las mismas causales de devolución de proyectos en la instancia de ventanilla única.

PROPUESTA PARA LA ESTRUCTURACIÓN DE UNOS PLANES DE AGUA. ORGANIZACIÓN INSTITUCIONAL, DIAGNÓSTICO Y TÉRMINOS DE REFERENCIA

Teniendo en cuenta lo determinado en el Conpes 3463, “Planes departamentales de agua y saneamiento para el manejo empresarial de los servicios de acueducto, alcantarillado y aseo”, así como lo estipulado y reglamentado en el Decreto 3200 de 2008, modificado por el Decreto 4214 de 2011, se puede determinar que son numerosos los actores involucrados en el esquema institucional de los planes y cada uno interviene permanentemente en su desarrollo, lo que genera que los planes sean procesos complejos y requieran tiempos excesivos para su desarrollo.

Así mismo, los entes involucrados realizan procedimientos o procesos según la normativa existente con el fin de asignar adecuadamente los recursos, lo cual no se considera una mala estrategia; sin embargo, vale la pena mencionar que los planes departamentales de agua surgen de las necesidades plasmadas por un municipio, razón por la cual sería importante considerar que el ente sobre el cual gire la organización institucional sean los municipios, debido a que éstos son los que conocen las debilidades, fortalezas y dificultades que se presentan en la zona del proyecto.

Por consiguiente, se puede definir que la fase I de los planes debería empezar con el planteamiento de las deficiencias en el sistema y la solicitud de recursos por parte del municipio ante el departamento; por esto los municipios deberían ser el eje central del proceso.

Es importante aclarar que en esta propuesta sólo se habla de la fase de diagnóstico, debido a que durante el estudio de la estructura de los planes departamentales de agua se identificó que allí es donde se inicia el proceso, y que las fases de estructuración e implementación tienen componentes políticos, económicos y jurídicos en su gran mayoría.

Con esta premisa, se sugiere que el municipio sea el que justifique la elaboración de un plan departamental de agua de acuerdo con sus necesidades, estableciendo si existe una infraestructura del sistema de acueducto o no.

Estos diagnósticos deben basarse en información verídica y confrontada en cada municipio o centro poblado, con el fin de conocer la situación actual del sistema para definir el origen de los recursos que se van a invertir en el sistema de acueducto.

Adicionalmente, hay que tomar en cuenta que las deficiencias no sólo se presentan en la definición de los alcances en los términos de referencia sino que además se encuentran en los tiempos transcurridos entre las etapas de diagnóstico, diseño, construcción y operación de los sistemas de acueducto, ya que éstos pueden llegar a ser excesivamente largos, hasta el punto de que cuando se llega a la etapa de construcción es necesario actualizar el diagnóstico y ajustar de nuevo los diseños a las necesidades actuales y reales de la región.

En la figura siguiente se sintetiza todo el proceso que se propone, desde la elaboración de un diagnóstico hasta la operación y mantenimiento del sistema de acueducto. Con esto se pretende que a lo largo del proceso se realicen unos estudios mínimos y se puedan llevar a cabo los diseños y la construcción (figura 3).

Por otra parte, los estudios y diseños deben satisfacer las necesidades del municipio, pues ésta deberá ser la principal premisa que se recomienda en los planes departamentales de agua dentro de sus términos de referencia.

De acuerdo con estas características, a continuación se presenta el proceso adecuado para que exista siempre una interrelación entre cada uno de los estudios, diseños y la etapa de construcción.

Una de las recomendaciones más importantes es definir las estructuras que se requieren, en el caso de que no existan, o el análisis de las estructuras existentes, con el fin de definir y priorizar las obras que se van a construir, pues en muchos casos el municipio no cuenta con todos los recursos ni con la asignación por parte del Estado.

En esta figura se puede establecer que el consultor que esté elaborando el proyecto ha de identificar las principales características que se deben satisfacer en el municipio, las características de los estudios que hay que hacer y la proyección para construir o rehabilitar cada uno de los componentes del sistema de acueducto, para así poder garantizar la cobertura total, la calidad y el suministro permanente de agua potable.

ESTUDIOS TÉCNICOS. DIAGNÓSTICO Y TÉRMINOS DE REFERENCIA

Los términos de referencia son documentos en los que se exponen las condiciones, especificaciones, alcances, objetivos, estructura, condiciones y obligaciones que

se deben tener en cuenta para la elaboración de un proyecto.

Según esta definición y la estructura actual de los planes departamentales de agua, se encuentran los términos de referencia o pliegos elaborados para llevar a cabo los proyectos involucrados en los planes.

Por esto el alcance de los estudios que se incorporan en los términos de referencia para elaborar los planes departamentales de agua en Colombia permite definir el crecimiento del sistema de acueducto, estableciendo las etapas o priorizando las obras que se deben realizar para cumplir con los indicadores que garantizan la calidad del servicio de agua potable.

El alcance de estos estudios debe basarse en la información real y en el estado actual del sistema, con el objeto de proponer objetivos claros y definir los estudios que se deben realizar en cada municipio.

En el presente artículo se propone que el alcance de los estudios definidos en los términos de referencia se establezca a partir del diagnóstico elaborado por el municipio, para conocer realmente el estado actual del sistema y las necesidades de la región. Cabe mencionar que los términos de referencia y el alcance de los estudios deben ser particulares para cada municipio, porque las características físicas y económicas son diferentes y de éstas depende la organización o priorización que se les dé a las obras que se deban hacer para garantizar la cobertura total, la continuidad y la calidad del servicio de agua potable.

Por consiguiente, los estudios técnicos que recomiendan desarrollar para la elaboración de los planes departamentales de acueducto en Colombia se presentan a continuación, al tiempo que se hacen unas recomendaciones para que éstos se ejecuten de manera adecuada y sean útiles durante la etapa de diseño, con el fin de que en la etapa de construcción, operación y mantenimiento se ajusten a las condiciones específicas del área de proyecto:

- Estudios de población y demanda
- Estudios catastrales
- Estudios topográficos
- Estudios hidrológicos e hidrogeológicos
- Estudios hidráulicos
- Estudios ambientales
- Estudios geotécnicos
- Estudios estructurales

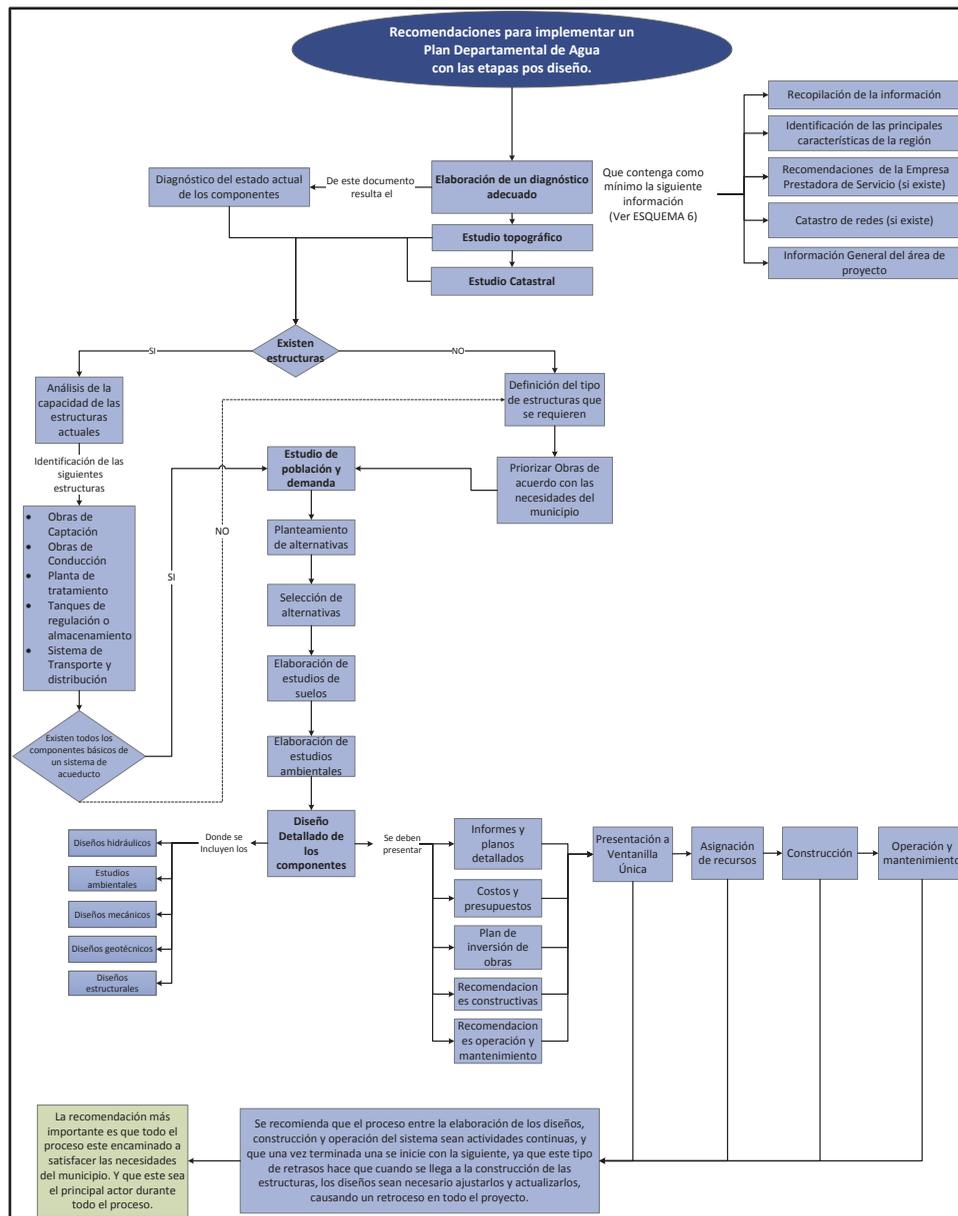


Figura 3. Recomendaciones para implementar un plan departamental de agua.

A renglón seguido se presentan las características básicas de los estudios técnicos, que se deberían incorporar en los diagnósticos (para conocer el estado del sistema de acueducto y de todo el entorno de la región) y el contenido o especificaciones que se deberían incorporar en los términos de referencia de los planes departamentales de agua.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los planes departamentales de acueducto y alcantarillado tienen una estructura con algunas fortalezas, pero

también con grandes debilidades, tales como la cantidad de actores involucrados y la no reglamentación y documentación de los aspectos técnicos en los planes, lo que ha generado que uno de los componentes más importantes en los planes, que son los estudios técnicos y diseños, pasen a un segundo plano; por ello la propuesta presentada consistió en estructurar adecuadamente unos planes que desde la elaboración de términos de referencia presenten claramente los alcances de los diagnósticos por elaborar y de los estudios por desarrollar, razón por cual se considera de vital importancia que

los términos de referencia se elaboren con base en la información suministrada y el conocimiento que puedan tener los municipios de la infraestructura de acueducto.

Esto teniendo en cuenta que en los términos de referencia actuales se pueden encontrar desde términos con características muy básicas hasta algunos demasiado detallados, por lo que se considera que debería existir un nivel intermedio, en el que no se permita o se deje a consideración del consultor el alcance de los estudios que se están realizando.

Por consiguiente, es primordial que los municipios sean el centro y principal pilar de los planes, pues son ellos los que conocen las características reales, las necesidades básicas que existen en el sistema de acueducto, así como también los aspectos económicos y sociales, entre otros, que son fundamentales para plantear las opciones más viables y priorizar las obras más urgentes.

REFERENCIAS

- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio - Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico (2010). RAS 2000. Título B. Sistemas de Acueducto, y Título G. Aspectos complementarios. Bogotá, D.C : s.n.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2008). Departamento Nacional de Planeación (DNP). [En línea] 29 de agosto.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social - Departamento Nacional de Planeación (DNP) (2007). Ministerio de Vivienda. [En línea] 12 de marzo. <http://www.minvivienda.gov.co/Ministerio/Normativa/Agua/Paginas/Conpes>.
- Corcho Romero, F.H. & Duque Serna, J.I. (2005). *Acueductos. Teoría y diseño*. Lorenza Correa Restrepo (ed.). Medellín: Universidad de Medellín.
- Pürschel, W. (1982). *Tratado general del agua y su distribución*, Manuel Villar vol 5 (trad.). Bilbao: Urmo, S.A.
- Cualla López, R.A. (2008). *Elementos de diseño para acueducto y alcantarillado* (2.ª ed.). Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Pérez Parra, J.A. (1995). *Acueductos y alcantarillados*. Medellín: Centro de Publicaciones, Universidad Nacional de Colombia.
- Garcés, L.G. (2012). Estudio geoelectrico Termotasajero II, San Cayetano (N. de Santander). Bogotá: Perfoaguas SAS. Informe técnico.

Uso del *software* Tracker como apoyo en la estrategia de enseñanza del análisis de la dinámica de los cuerpos

Using Tracker to support teaching strategies for the analysis of body dynamics

HEINDEL RICARDO OTERO ARÉVALO¹ - CARLOS COLLAZOS MORALES¹ - JAIME JOSÉ ISAZA CEBALLOS¹ - MARTHA PIMIENTA GIRALDO² - LILIANA PEDRAZA VEGA³

1. Profesores del Departamento de Ciencias Naturales de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Subdirectora de Desarrollo y Fomento de la Investigación de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

3. Coordinadora de Desarrollo Profesional de la Vicerrectoría Académica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

heindel.otero@escuelaing.edu.co - carlos.collazos@escuelaing.edu.co - jaime.isaza@escuelaing.edu.co
-martha.pimienta@escuelaing.edu.co - liliana.pedraza@escuelaing.edu.co

Recibido: 08/08/2017 Aceptado: 31/08/2017

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

Resumen

En este artículo se muestra una experiencia didáctica en la que, a través de metodologías activas y el uso de un *software* para el análisis de videos, se logra que el estudiante pase del simple estudio teórico de conceptos de dinámica de los cuerpos (movimiento de pistones, de bielas, engranes de piñones, proyectiles lanzados en el espacio, máquinas que vibran, movimiento de personas en parques mecánicos, choques o colisiones y cuerpos que oscilan en sistemas amortiguados o forzados, entre otros) a una fase experimental.

Este trabajo se hizo con estudiantes del curso de Física de calor y ondas de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, en el tema de oscilaciones amortiguadas, haciendo uso del *software* libre Tracker, el cual permite realizar medidas del sistema oscilatorio y la aplicación directa al sistema físico que se está analizando.

Palabras claves: Tracker, oscilaciones, energía.

Abstract

This paper shows a learning experience in which, through active methodologies and use of software for video analysis, it is possible that students move from the simple theoretical study of concepts of dynamics of bodies (movement of piston, cranks, gears, sprockets, projectiles launched into space, vibrating machines, mechanical movement of people in mechanical parks, crashes or collisions, and bodies ranging in damped or forced systems, etc.) to an experimental phase. The work is done with students in the Heat and Waves physics course at Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, on the issue of damped oscillations, using the free software Tracker, which allows measurement of the oscillatory system and direct application to the physical system that is being analyzed.

INTRODUCCIÓN

En razón de que la actividad empírica es un eje primordial en las clases de Física, el docente debe recurrir a estrategias pedagógicas que lleven al estudiante a la construcción efectiva de su propio conocimiento por medio del aprendizaje conceptual y experimental. El uso de tecnologías de información y comunicación es un elemento que puede potenciar las estrategias planteadas, además de despertar un mayor interés en el estudio.

Particularmente, la tecnología empleada es el *software* Tracker, de uso experimental, gráfico y de análisis de experimentos físicos, que permite la toma de datos de posición y tiempo de objetos que están en movimiento. Este *software* también puede mostrar gráficos como el de posición vs tiempo, el cual facilita hacer una verificación con el modelo físico planteado en cada situación que se va a analizar.

ESTRUCTURA DEL ARTÍCULO

El artículo está dividido en tres partes: en la primera se muestra el análisis teórico del sistema oscilatorio, en la segunda se hacen el diseño experimental y el análisis usando el *software*, y en la tercera se presentan las conclusiones.

MARCO TEÓRICO

Análisis teórico

Las oscilaciones amortiguadas de un cuerpo son movimientos de vaivén, cuya amplitud va disminuyendo a medida que transcurre el tiempo. Esta disminución de la amplitud se debe a la pérdida de energía que sufre el sistema, por la acción de las fuerzas de fricción, presentes en el fenómeno físico.

Cuando un cuerpo es desplazado hacia la derecha o izquierda y se suelta, comienza a oscilar y en un corto tiempo se detiene, debido a las fuerzas de fricción que se encuentran presentes en el sistema físico. Al aplicar la segunda ley de Newton, se tiene la siguiente ecuación diferencial.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -k_{ef}x - bv$$

Siendo v la velocidad del carrito de masa m , b el coeficiente de fricción y $k_{ef} = k_1 + k_2$.

Siendo k_1 y k_2 las constantes elásticas de los resortes.

$$\begin{aligned} v &= \frac{dx}{dt} \\ m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + k_{ef}x &= 0 \\ \lambda &= \frac{b}{m} \\ w_0^2 &= \frac{k_{ef}}{m} \\ \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{b}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{k_{ef}}{m}x &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Remplazando los valores se tiene:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \lambda \frac{dx}{dt} + w_0^2x = 0$$

Se hace un cambio de variable de x por z

$$\frac{d^2z}{dt^2} + \lambda \frac{dz}{dt} + w_0^2z = 0 \quad (2)$$

Se escribe una solución de la ecuación diferencial, de la siguiente forma:

$$z = A_0 e^{\hat{j}(pt+\alpha)} \quad (3)$$

Se remplaza la ecuación 3 en la ecuación 2.

$$\begin{aligned} (-p^2 + \hat{j}p\lambda + w_0^2) A_0 e^{\hat{j}(pt+\alpha)} &= 0 \\ -p^2 + \hat{j}p\lambda + w_0^2 &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Se escribe $p = n + \hat{j}s$, donde n y s son reales

$$p^2 = (n + \hat{j}s)^2 = n^2 + 2n\hat{j}s - s^2$$

Se lleva esta última ecuación a la ecuación 4.

$$-n^2 - 2n\hat{j}s + s^2 + n\hat{j}\lambda - s\lambda + w_0^2 = 0 \quad (5)$$

En la ecuación 5 se obtienen dos ecuaciones.

$$\text{Parte real } -n^2 + s^2 - s\lambda + w_0^2 = 0 \quad (6)$$

$$\text{Parte imaginaria } -2ns + n\lambda = 0 \quad (7)$$

De la ecuación 7, se tiene

$$s = \frac{\lambda}{2}$$

y se sustituye en la ecuación 6

$$n^2 = w_0^2 - \frac{\lambda^2}{4} \quad (8)$$

El valor de p se sustituye en la ecuación 3

$$z = A_0 e^{-st} * e^{j(nt+\alpha)} \quad (9)$$

La parte real de la ecuación 9 es:

$$x = A_0 e^{-st} \cos(nt + \alpha) \quad (10)$$

Teniendo en cuenta que

$$n = \sqrt{w_0^2 - \frac{\lambda^2}{4}} \quad y \quad s = \frac{\lambda}{2}$$

estos últimos términos se sustituyen en la ecuación 10 y se obtiene la ecuación de posición de la partícula u objeto en función del tiempo.

$$x(t) = A_0 e^{-\frac{\lambda t}{2}} \cos(wt + \alpha) \quad (11)$$

Siendo

$$w^2 = \frac{k}{m} - \frac{b^2}{4m^2}$$

Llamamos A a la amplitud de las oscilaciones.

$$A = A_0 e^{-\frac{\lambda t}{2}}$$

Con A_0 como amplitud máxima o elongación máxima del sistema oscilante.

Energía del oscilador

La energía mecánica de un oscilador amortiguado es:

$$E = \frac{1}{2} k_{ef} A^2 e^{-\lambda t}$$

$$E_0 = \frac{1}{2} k_{ef} A_0^2$$

Energía inicial del sistema.

$$E = E_0 e^{-\lambda t} \quad (12)$$

Factor de calidad Q

Se define como:

$$Q = \frac{w_0}{\lambda}$$

Velocidad del objeto

La velocidad se calcula con la siguiente ecuación.

$$v = \frac{dx(t)}{dt}$$

Y se obtiene la siguiente ecuación de velocidad.

$$v(t) = -A_0 e^{-\frac{\lambda t}{2}} \left[\frac{\lambda}{2} \cos(wt + \alpha) + w \sin(wt + \alpha) \right]$$

Aceleración del objeto

La aceleración del objeto se calcula con la siguiente ecuación.

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt}$$

Se obtiene la siguiente ecuación de aceleración.

$$a(t) = -A_0 e^{-\frac{\lambda t}{2}} \left[\frac{\lambda}{2} \cos(wt + \alpha) - \left(w^2 - \frac{\lambda^2}{4} \right) \sin(wt + \alpha) \right]$$

De acuerdo con el análisis teórico, el gráfico de posición del objeto en función del tiempo se muestra seguidamente (figura 2).

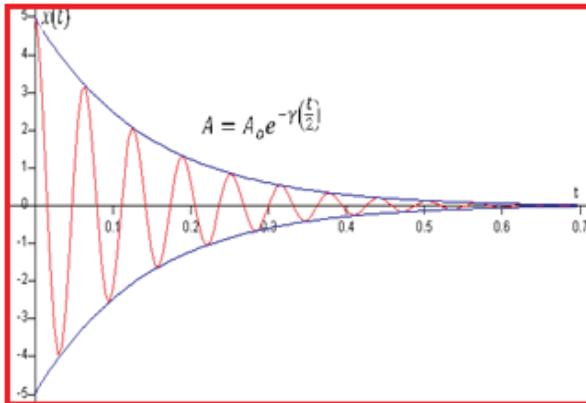


Figura 2. Gráfico de X vs. t.

El gráfico de la energía del oscilador en función del tiempo es (figura 3).

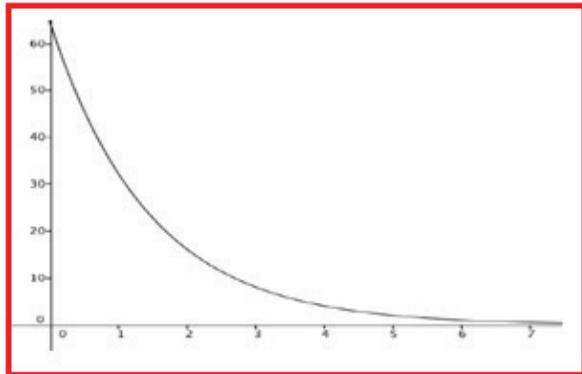


Figura 3. Energía del sistema en función del tiempo.

Diseño experimental y uso del *software* Tracker

Como se menciona anteriormente, lo que se busca con esta experiencia es que el estudiante se vuelva activo en la construcción de su conocimiento, por lo que la estrategia que se plantea es que, para el tema de oscilaciones amortiguadas, el estudiante realice el modelo del fenómeno que quiere analizar y efectúe medidas del sistema oscilatorio mediante el *software* Tracker.

Para el caso, se puede observar el montaje de un carrito que está sujeto por dos resortes fijos en sus extremos (figuras 3A y 3B).

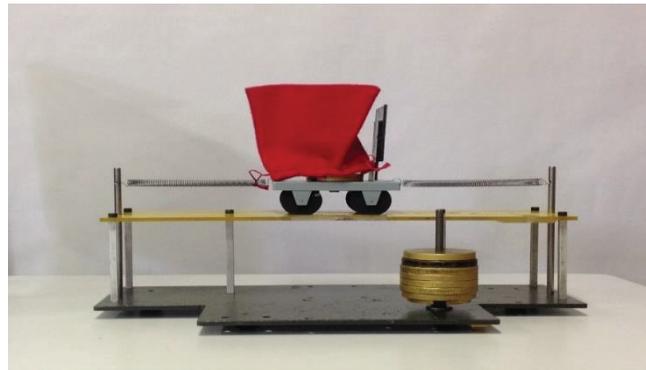


Figura 3A. Sistema oscilatorio que se va a analizar.

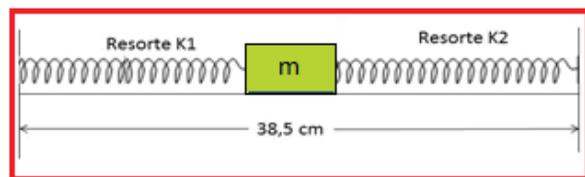


Figura 3B. Esquema del montaje que se va a analizar.

A continuación el estudiante desplaza el carrito hacia cualquiera de los dos lados y filma la oscilación, la cual se analizará posteriormente usando el *software*. Vale la pena mencionar que el video puede hacerse con un teléfono inteligente, una tableta o una cámara, teniendo en cuenta que el fondo y el sistema en movimiento hagan un buen contraste.

Una vez listo el video, el estudiante abre el *software* Tracker y allí selecciona “Importar video” (figura 4), para así cargar la filmación que ha hecho.

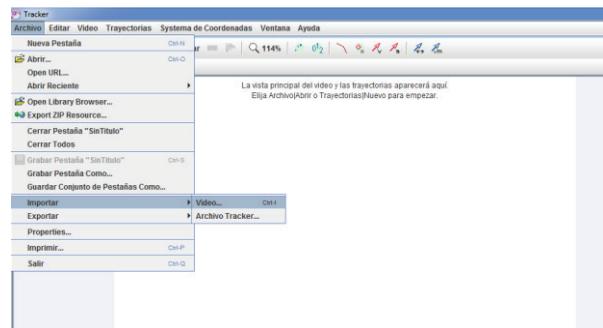


Figura 4. Importar video.

Y éste aparece en la pantalla (figura 5).

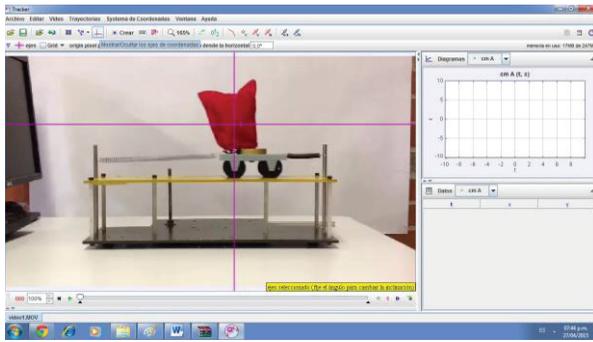


Figura 5. Video cargado.

Enseguida visualiza un plano cartesiano, que el estudiante puede ubicar donde lo crea más conveniente. El siguiente paso es crear una barra de calibración.

Al seleccionar “Barra de calibración”, en la pantalla aparece una barra azul (figura 6), a la cual se le puede variar el tamaño, la ubicación y la orientación; la barra se ubica en una distancia conocida previamente. En este caso, se sabe que la distancia de la base del sistema mide 38,5 cm (figura 3B).

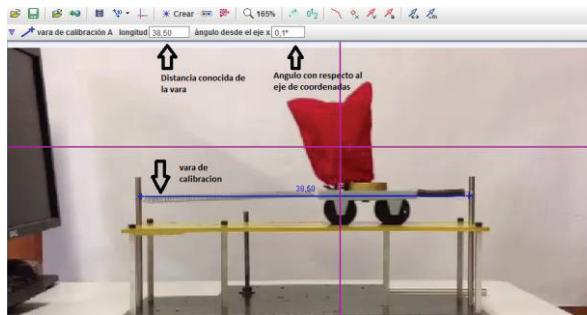


Figura 6. Barra de calibración.

El siguiente paso es escoger un punto al que se le va a estudiar su cambio de posición respecto al tiempo; en este caso, se elige el centro de la masa (color rojo). Esto se hace seleccionando en la barra de herramientas crear \rightarrow masa puntual (figura 7).

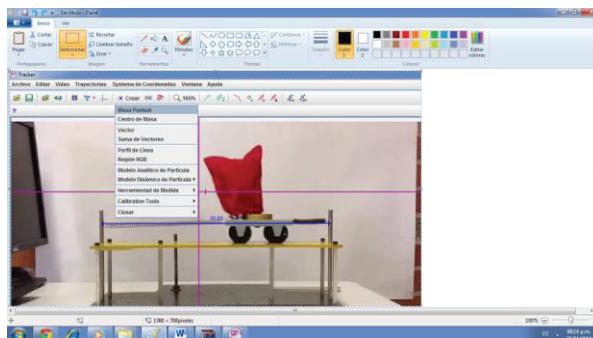


Figura 7. Selección de masa.

Aparece la ventana “Control de trayectoria”, haciendo clic sobre *masa a* \rightarrow *trayectoria automática*, se ve una nueva ventana en la parte derecha de la pantalla; después se hace $\text{ctrl} + \text{shift} + \text{clic}$ sobre el punto que va a estudiar el programa (figura 8).

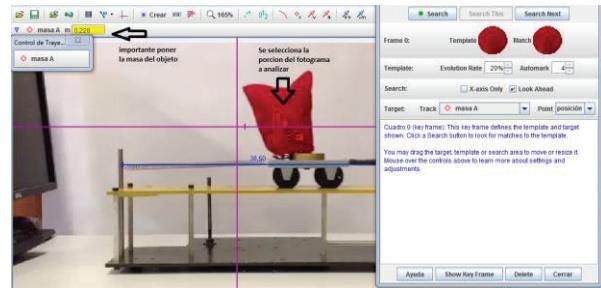


Figura 8. Punto que hay que estudiar.

Después se da clic en el botón “Search”. Esto crea, en forma automática, una tabla de datos y una gráfica en la parte derecha de la pantalla (figura 9) que sin el *software* no se podrían obtener de una manera tan sencilla, y además tan completa.

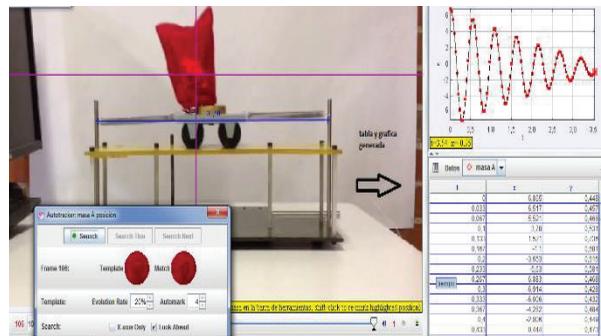


Figura 9. Resultado final.

Para visualizar la tabla de datos en su totalidad, se selecciona donde se indica, al igual que para ver la gráfica producida por el movimiento en la parte superior derecha (figura 10).

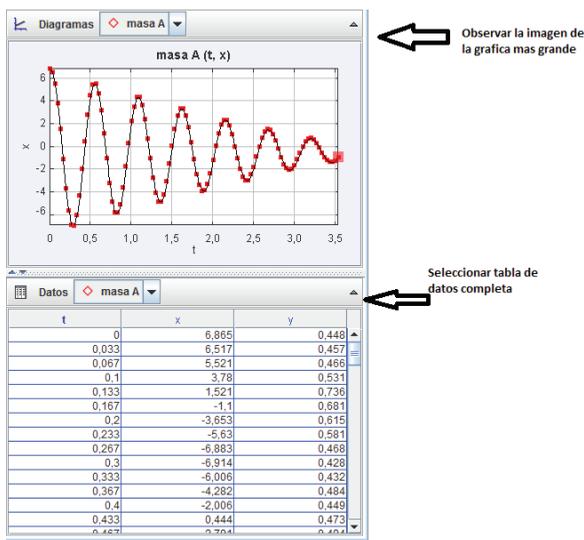


Figura 10. Selección para ver datos completos.

La tabla de datos que ha entregado el *software* para el movimiento del carrito es la siguiente.

t (s)	X (cm)	t (s)	X (cm)
0,00E+00	6,86E+00	7,35E-01	-3,21E+00
3,33E-02	6,52E+00	7,68E-01	-4,89E+00
6,67E-02	5,52E+00	8,02E-01	-5,79E+00
1,00E-01	3,78E+00	8,35E-01	-5,81E+00
1,33E-01	1,52E+00	8,68E-01	-5,09E+00
1,67E-01	-1,10E+00	9,02E-01	-3,59E+00
2,00E-01	-3,65E+00	9,35E-01	-1,75E+00
2,33E-01	-5,63E+00	9,68E-01	2,76E-01
2,67E-01	-6,88E+00	1,00E+00	2,23E+00
3,00E-01	-6,91E+00	1,04E+00	3,50E+00
3,33E-01	-6,01E+00	1,07E+00	4,34E+00
3,67E-01	-4,28E+00	1,10E+00	4,31E+00
4,00E-01	-2,01E+00	1,14E+00	3,67E+00
4,33E-01	4,44E-01	1,17E+00	2,37E+00
4,67E-01	2,79E+00	1,20E+00	6,87E-01
5,00E-01	4,49E+00	1,24E+00	-1,04E+00
5,33E-01	5,45E+00	1,27E+00	-2,77E+00
5,67E-01	5,47E+00	1,30E+00	-4,10E+00
6,00E-01	4,65E+00	1,34E+00	-4,82E+00
6,35E-01	3,13E+00	1,37E+00	-4,83E+00
6,68E-01	1,17E+00	1,40E+00	-4,23E+00
7,02E-01	-1,02E+00	1,44E+00	-3,06E+00

t (s)	X (cm)	t (s)	X (cm)
1,47E+00	-1,53E+00	2,50E+00	-1,79E+00
1,50E+00	6,10E-02	2,54E+00	-9,10E-01
1,54E+00	1,56E+00	2,57E+00	-3,13E-02
1,57E+00	2,71E+00	2,60E+00	7,84E-01
1,60E+00	3,30E+00	2,64E+00	1,30E+00
1,64E+00	3,29E+00	2,67E+00	1,53E+00
1,67E+00	2,71E+00	2,70E+00	1,44E+00
1,70E+00	1,69E+00	2,74E+00	1,07E+00
1,74E+00	3,66E-01	2,77E+00	5,26E-01
1,77E+00	-1,13E+00	2,80E+00	-2,07E-01
1,80E+00	-2,41E+00	2,84E+00	-9,39E-01
1,84E+00	-3,36E+00	2,87E+00	-1,55E+00
1,87E+00	-3,89E+00	2,90E+00	-1,93E+00
1,90E+00	-3,85E+00	2,94E+00	-2,06E+00
1,94E+00	-3,32E+00	2,97E+00	-1,96E+00
1,97E+00	-2,39E+00	3,00E+00	-1,62E+00
2,00E+00	-1,16E+00	3,04E+00	-1,14E+00
2,04E+00	6,65E-02	3,07E+00	-5,55E-01
2,07E+00	1,15E+00	3,10E+00	-2,54E-02
2,10E+00	1,93E+00	3,14E+00	4,17E-01
2,14E+00	2,33E+00	3,17E+00	6,67E-01
2,17E+00	2,30E+00	3,21E+00	7,35E-01
2,20E+00	1,83E+00	3,24E+00	5,92E-01
2,24E+00	1,07E+00	3,27E+00	3,23E-01
2,27E+00	1,50E-03	3,31E+00	-1,29E-01
2,30E+00	-1,06E+00	3,34E+00	-5,61E-01
2,34E+00	-2,01E+00	3,37E+00	-9,42E-01
2,37E+00	-2,66E+00	3,41E+00	-1,22E+00
2,40E+00	-2,96E+00	3,44E+00	-1,38E+00
2,44E+00	-2,96E+00	3,47E+00	-1,38E+00
2,47E+00	-2,46E+00		

Cálculo de las constantes físicas

De la tabla se toma un punto pico del movimiento, que corresponde a un determinado tiempo. Llamamos X_1 y t_1 a estos valores y se remplazan en la siguiente ecuación.

$$A = A_0 e^{-\frac{\lambda t}{2}}$$

$$A = A_0 e^{-\frac{bx}{2m}}$$

El valor de X_1 y t_1 se escoge en el segundo pico positivo del gráfico posición vs tiempo, que se obtiene de la tabla de datos.



Figura 11. Selección de punto.

Estos valores son:

$$X_1 = A = 0,04335567715 \text{ m}$$

$$t_1 = 1,068333333 \text{ seg}$$

La amplitud $A_0 = 0,06865 \text{ m}$ es el valor máximo de la posición del carrito.

La masa del carro es $m = 0,228 \text{ kg}$.

Para calcular el valor de b , el estudiante lo despeja de la ecuación

$$A = A_0 e^{\frac{-bt}{2m}}$$

y reemplaza los valores

$$b = \frac{-2m \times \ln \frac{A}{A_0}}{t}$$

$$b = 0,1961 \text{ kg/s}$$

Luego puede calcular la frecuencia angular w a partir de la ecuación:

$$w^2 = \frac{k}{m} - \frac{b^2}{4m^2}$$

Y el valor es $w = 12,9 \text{ rad/s}$.

Ecuaciones particulares del movimiento oscilatorio

Con todos los valores calculados, se presentan las ecuaciones de $X(t)$, $V(t)$, $a(t)$, $E(t)$ y Q .

La ecuación de posición contra tiempo es:

$$\alpha = 0$$

$$X(t) = 0,06865 \text{ m} e^{-0,43\frac{1}{2}t} \text{Cos} \left(12,9 \frac{\text{rad}}{\text{s}} t \right)$$

La ecuación de velocidad es:

$$V(t) = 0,06865 \text{ m} e^{-0,43\frac{1}{2}t} \left[0,43 \frac{1}{2} \text{Cos} \left(12,9 \frac{\text{rad}}{\text{s}} t \right) + 12,9 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \text{Sen} \left(12,9 \frac{\text{rad}}{\text{s}} t \right) \right]$$

La ecuación de la aceleración es:

$$a(t) = 0,06865 \text{ m} e^{-0,43\frac{1}{2}t} \left[5,54 \frac{1}{\text{s}^2} \text{Sen} \left(12,9 \frac{\text{rad}}{\text{s}} t \right) - 166,56 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \text{Cos} \left(12,9 \frac{\text{rad}}{\text{s}} t \right) \right]$$

La ecuación de energía es:

$$E = 0,0895 \text{ J} e^{-0,86\frac{1}{2}t}$$

El valor del factor de calidad es:

$$Q = 15$$

Con esto el estudiante puede decir cuál es la posición, velocidad, aceleración o energía que tiene la masa m en un determinado tiempo, a partir de un modelo que ha diseñado y haciendo uso de tecnología.

CONCLUSIONES

Las metodologías activas de enseñanza permiten que en cursos de ciencias, concretamente en Física, los estudiantes se sientan más motivados, ya que se vuelven protagonistas de sus aprendizajes al dejar su papel pasivo de receptor de información y convertirse en

un sujeto activo que tiene que diseñar modelos, hacer simulaciones y, en general, reproducir situaciones del mundo real que les permiten comprender y utilizar conceptos inmersos en un sistema físico.

Situaciones de aprendizaje como las que se diseñan con apoyo de tecnología permiten que los estudiantes no sólo se queden en la memorización y utilización de fórmulas en unos ejercicios de práctica mediante repetición, sino que vean en situaciones reales la aplicabilidad de las teorías, y puedan así cuestionarse, reflexionar y comprender dichas teorías.

El diseño y la aplicación de estrategias que involucren el uso del *software* Tracker para el registro de fenómenos relacionados con las oscilaciones ofrecen una alternativa diferente y de bajo costo, ya que, mediante el uso de dispositivos cotidianos como celulares o tabletas, se puede dar un enfoque distinto a los cursos tradicionales.

Mediante la construcción de modelos es posible que el estudiante ponga en práctica conceptos para los que, a través del uso del *software* Tracker, se logra una mayor interpretación y comprensión, debido a que puede verlos en movimiento, y además, en forma simultánea junto a su tabla de datos correspondiente y la gráfica que se genera.

REFERENCIAS

- <https://www.cabrillo.edu/~dbrown/Tracker/>
http://difusion.df.uba.ar/ConectarIgualdad/tutorial_inicial_Tracker.pdf.
<https://www.youtube.com/watch?v=Pu6baLHp8Oc&feature=youtu.be>
 French, A.P. (s.f.). *Vibraciones y ondas*. Editorial Reverté, pp. 72 y 87.
Física de Sears Zemansky, vol 1, pp. 457 y 470. Edición 13. Editorial Pearson.
Física Serway Jewett, vol 1, pp. 436 y 447. Séptima edición. Editorial Cengage.

Estudio comparativo de las características físico-mecánicas de dos cementos comerciales Pórtland tipos 1 y 3

Comparative study of physical and mechanical characteristics of types 1 and 3 commercial Portland cements

CLAUDIA MARITZA SANTOS BERNAL¹ - JOSÉ ALIRIO GUZMÁN ESPITIA² - MAYRA ALEJANDRA PÉREZ CÁRDENAS³ - CAMILO ARTURO TORRES ÁLVAREZ⁴ – NANCY TORRES CASTELLANOS⁵

1. Ingeniera civil. Especialista en Estructuras. Magíster en ingeniería Civil con énfasis en Estructuras.
2. Ingeniero civil. Especialista en Estructuras.
3. Ingeniera civil. Aspirante a maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Estructuras.
4. Ingeniero civil. Especialista en Gerencia y en Estructuras.
5. Ingeniera civil. Magíster en Estructuras y doctora en Ciencia y Tecnología de Materiales.

clamasanber@yahoo.com - jalirioguz@yahoo.com - mayralejaperezc@hotmail.com -
tcproyectoseingenieria@gmail.com - nancy.torres@escuelaing.edu.co

Recibido: 15/08/2017 Aceptado: 09/09/2017

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

Resumen

En el presente artículo se evalúan algunas propiedades del concreto en estado fresco, endurecido y de durabilidad, con dos tipos de cemento (tipo 1 y tipo 3), donde la mitad de los especímenes se sometieron a curado en tanque de agua, mientras que los restantes se dejaron en un ambiente seco y bajo techo. Para el estado fresco se evaluaron la masa unitaria, contenido de aire, asentamiento y temperatura. Para el estado endurecido, la resistencia a la compresión y módulo elástico, en diferentes edades (7, 28 y 90 días). Y para la durabilidad se evaluaron la resistencia a los cloruros, carbonatación y permeabilidad al agua a 28 y 90 días, mientras que los datos de contracción del concreto se tomaron consecutivamente a lo largo del tiempo del estudio.

Palabras claves: resistencia, elasticidad, cloruro, carbonatación, permeabilidad y contracción.

Abstract

This article evaluates some properties of fresh and hardened concrete, as well as its durability condition, with two different types of cement (Type 1 and Type 3), where half of the specimens have been cured in a water tank, while the rest were left in a dry, indoor environment. For the fresh state the unit mass, air content, settlement, and temperature were evaluated. For the hardened state, the compressive strength and the elastic modulus, at different ages (7, 28, and 90 days). And for durability, resistance to chlorides, carbonation, water permeability at 28 and 90 days was evaluated, while the concrete contraction data were taken consecutively along the trials.

Keywords: resistance, elasticity, chloride, carbonation, permeability and contraction.

INTRODUCCIÓN

El cemento es considerado la materia prima más importante para el sector de la construcción. Se puede definir como una mezcla de arcilla molida y otros materiales calcificados en polvo, que después de un debido proceso adquiere propiedades adherentes. Existen varias clases de cementos, con diferentes propiedades, las cuales varían según los materiales y los procesos que se utilicen para su producción; sus propiedades y características varían, dependiendo del porcentaje de dosificación que se aplique de cada materia prima. A continuación se muestran las clases de cemento más comunes en Colombia y los usos (tabla 1).

Tabla 1
Clasificación del tipo de cemento en Colombia

Cemento Pórtland	Uso
Tipo 1	En estructuras y obras pequeñas.
Tipo 1 especial	Por empresas constructoras.
Tipo 2	Donde haya presencia de sulfatos.
Tipo 3	En prefabricados y donde se requieren rápido endurecimiento y buena resistencia.
Tipo 4	Estructuras grandes como presas de concreto, contiene aceptable resistencia a los sulfatos y a la humedad.
Tipo 5	Constructoras que tienen constante contacto con el agua de mar.

Fuente: Andrés Latorre Cañón.

Los cementos que más se distribuyen en Colombia son el tipo 1 y el tipo 3; el primero se comercializa en sacos de 50 kg, y representa alrededor del 70 % de la demanda total del país; el segundo se comercializa en venta directa y grandes cantidades, generalmente para uso industrial (Latorre Cañón, 2008).

Teniendo en cuenta lo anterior, se analizaron los concretos elaborados con cementos tipo 1 y tipo 3 para evaluar algunas propiedades de cada uno y presentar un panorama a pequeñas empresas de construcción, que deben suplir los diseños y construcciones con cemento tipo 1, debido a que el tipo 3 sólo lo comercializan a granel y a través de las concreteras en la producción de los concretos comerciales; sin embargo, hoy en día ya empieza a comercializarse en algunos depósitos, clasificado como cemento estructural, empacado en bultos de 42,5 kg y a un precio mayor que el del tipo 1.

Por otro lado, para garantizar las propiedades del concreto en estado endurecido y evitar la evaporación de agua cuando éste se encuentra en estado fresco, es necesario realizar un curado adecuado. De acuerdo con el reglamento de construcción sismorresistente NSR-10, numeral C.5.11, el concreto debe mantenerse en condiciones de humedad por lo menos durante los primeros siete días después de la colocación (ver normas técnicas NTC 550). Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra (ASTM C31) y NTC 1377. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayo de laboratorio (ASTM C192).

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Se elaboraron dos mezclas de concreto; la mezcla 1 (T-1) contenía cemento Pórtland tipo 1, con densidad de 2860 kg/m³, y la mezcla 2 (T-3) contenía cemento Pórtland tipo 3, con densidad de 3100 kg/m³; con el fin de hacer el comparativo de las características del concreto, se eligieron una serie de ensayos representativos del concreto en estado fresco y en estado endurecido, así como algunos otros que evalúan la durabilidad ante determinados agentes.

Los ensayos desarrollados para estado fresco fueron asentamiento, temperatura y contenido de aire; para estado endurecido se evaluaron resistencia a la compresión y módulo de elasticidad, y para cuantificar la durabilidad se realizaron los ensayos permeabilidad a cloruros, profundidad de carbonatación, permeabilidad al agua y contracción del concreto. Todos los ensayos se hicieron en el Laboratorio de Estructuras y Materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

En cuanto al diseño de las mezclas de concreto, se establecieron las siguientes características:

- Resistencia a compresión ($f'c$) igual a 21 MPa (3000 PSI).
- Asentamiento de 75 mm.
- Tamaño máximo nominal del agregado de $\frac{3}{4}$.
- Relación a/c igual a 0,57.

Con lo anterior se procedió a calcular las cantidades de agregados y cemento para la elaboración de cada una de las mezclas (tabla 2).

Tabla 2
Cantidad de materiales para un m³ de concreto, por tipo de cemento

Resumen de materiales para ensayo		
Material	Cemento tipo 1	Cemento tipo 2
Masa de arena (kg)	944	958
Masa de grava (kg)	773	784
Masa de agua (kg)	200	200
Masa de cemento (kg)	353	353
Relación a/c	0,57	0,57

Fuente: Los autores.

ENSAYOS EN ESTADO FRESCO

Asentamiento

El ensayo de asentamiento, también conocido como **cono de Abrams** o **Slump**, es un método de control de calidad cuyo objetivo principal es medir la consistencia o el grado de fluidez del concreto. A renglón seguido se aprecia el ensayo de asentamiento (figura 1).



Figura 1. Ensayo de asentamiento.

Fuente: Los autores.

Para la ejecución de este ensayo se siguieron los requisitos estipulados en la NTC-396. Asentamiento del concreto.

Temperatura

El método usado para medir la temperatura fue el establecido en la NTC 3357. Método de ensayo para Determinar la temperatura del concreto fresco de cemento hidráulico. A continuación se puede ver la toma de temperatura (figura 2).



Figura 2. Toma de temperatura (termómetro digital).

Fuente: Los autores.

Contenido de aire

El proceso del ensayo de contenido de aire se realizó por el método de presión, el cual tiene por objeto determinar el contenido de aire en concreto fresco elaborado con agregados relativamente densos, a partir del cambio de volumen ocasionado por un cambio en la presión sobre el concreto, según NTC-1032. Contenido de aire método de presión, tal como se puede apreciar (figura 3).



Figura 3. Ensayo de contenido de aire por método de presión.

Fuente: Los autores.

Masa unitaria

La densidad o peso unitario es la masa por unidad de volumen.

Para el cálculo de la masa unitaria se siguió la NTC-1926. Concretos. Método de ensayo para determinar la densidad (masa unitaria), el rendimiento y el contenido de aire por gravimetría del concreto. ASTM C138/C138M - 09.

Tabla 3
Resultados de los ensayos en estado fresco, por tipo de cemento

N.º muestra	Tipo de cemento		Resultados en estado fresco				
			Relación A/C	Contenido de aire (%)	Asentamiento (mm)	Temperatura (°C)	Masa unitaria (kg/m³)
1	I	Normal	0,57	1,9	60	21	2246
2	III	Resistencia alta inicial	0,57	2,3	47	22	2256

Fuente: Los autores.

Resultado y análisis

Los valores de cada una de las propiedades evaluadas en estado fresco para cada tipo de cemento aparecen en la tabla anterior (tabla 3).

Como puede observarse, se tuvo una leve disminución del asentamiento en la mezcla 2, atribuida a la mayor finura y superficie específica del cemento tipo 3, al igual que un mayor contenido de aire en esta muestra 2, atribuido a la menor manejabilidad; por otro lado, en esta misma muestra se aprecia un leve aumento de la masa unitaria, atribuido a la mayor densidad del cemento; en cuanto a la leve variación de temperatura entre muestras, se debe a la temperatura ambiente.

ENSAYOS DE RESISTENCIA

En cuanto a la elaboración de especímenes de concreto, se basó en los requisitos estipulados en las normas NTC 550. Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra, NTC 1377. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio, y NTC 673. Resistencia a la compresión. Esta propiedad se midió en especímenes cilíndricos de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura y se ensayó por triplicado para cada una de las edades estipuladas.

Resistencia a la compresión, ($f'c$)

La resistencia a la compresión es la característica mecánica más empleada para el diseño de los elementos de concreto estructurales y no estructurales. A continuación se aprecia el equipo para fallar a compresión especímenes en concreto (figura 4).



Figura 4. Equipo para fallar a compresión especímenes en concreto.

Fuente: Los autores.

Módulo de elasticidad

Para evaluar el módulo elástico se siguieron los requisitos estipulados en la NTC 4025. Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión.

Para el cálculo de esta propiedad se usaron especímenes cilíndricos de las dimensiones anteriormente especificadas.

Resultado y análisis

Más adelante se presentan los resultados de los ensayos realizados, para caracterizar los concretos en las diferentes edades de ensayo, para los dos ambientes de curado nombrados anteriormente. Para estos ensayos se analizaron 36 muestras (cilindros en concreto) repartidas en 2 tipos, cemento tipo 1 (T-1) y cemento tipo 3 (T-3), que a su vez se divide en curado y sin curar, los cuales se fallaron a 3 edades 7, 28 y 90 días (tabla 4).

Como se puede observar la variación de resistencias para los dos tipos de concreto y a edades iguales en diferente ambiente de curado va hasta el 50 %. De igual manera, al comparar las resistencias, para una misma

Tabla 4

Resultados de los ensayos en estado endurecido por tipo de cemento, curado y sin curar, a 7, 28 y 90 días

Resumen de resultados de resistencia para estado endurecido del concreto													
Ensayo	Unidad	7 días				28 días				90 días			
		T-1		T-3		T-1		T-3		T-1		T-3	
		C.	S.C.	C.	S.C.	C.	S.C.	C.	S.C.	C.	S.C.	C.	S.C.
Resistencia a la compresión $f'c$	MPa	7	8	22	20	16	13	29	26	27	13	41	28
Módulo de elasticidad E_c	MPa	16,478	14,964	18,630	17,933	18,756	16,179	21,302	18,470	21,821	16,244	27,106	20,038
$\frac{E_c}{\sqrt{f'c}}$		6,369	5,192	3,980	3,990	4,626	4,497	3,927	3,605	4,166	4,439	4,215	3,755

C. = curado.

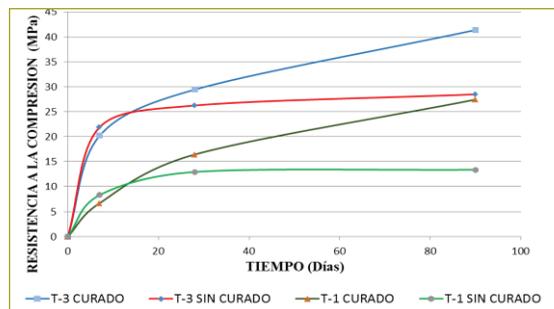
S.C.: sin curado

Fuente: Los autores.

edad con los dos tipos de cemento y el mismo curado, se pueden detallar diferencias también mayores del 50 %.

Más adelante se evidencia la influencia del curado del concreto, con la variación de las resistencias a partir de los catorce días, como puede observarse, se presentan diferencias hasta de tres veces la una con respecto a la otra para el mismo tipo de cemento; por otro lado, se visualiza desde edades tempranas, la variación de la resistencia entre los dos tipos de cemento estudiados con la misma dosificación.

Cabe destacar la ganancia de resistencia de los dos concretos a lo largo del tiempo, donde para el cemento tipo 1 no se logró la resistencia de diseño esperada a los 28 días, pero sí se superó a los 90 días, caso contrario al cemento tipo 3, donde desde los 7 días ya se estaba superando la resistencia de diseño (figura 4).

**Figura 4.** Curva de resistencia a la compresión a diferentes edades (7, 28 y 90 días).

Fuente: Los autores.

De acuerdo con lo esperado, la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad aumentan con la edad de ensayo. En dicha tabla también se presentan los resultados de la relación $E_c/\sqrt{f'c}$, en la cual obtenemos para 28 días valores que oscilan entre 3600 y 4600, dependiendo del tipo de cemento y del ambiente de curado, variables con respecto a los sugeridos para análisis en el capítulo C.8. NSR-10. Al comparar con los resultados obtenidos se observa que los especímenes sometidos a curado tienen valores similares para los dos tipos de cemento, mientras los de ambiente seco o sin curado están en promedio en un 80 % de este valor.

A renglón seguido se pueden apreciar los cilindros elaborados con cemento tipo 3 dejados en curado, la forma en que fallan estos cilindros de concreto es cónica, típico de un concreto con buenas características mecánicas.

**Figura 5.** Falla cónica en cilindros elaborados con cemento T-3 curado.

Fuente: Los autores.

ENSAYOS DE DURABILIDAD

Cloruros

La durabilidad del concreto reforzado se puede ver afectada por la penetración del ion cloruro en los elementos estructurales, generando corrosión en el acero de refuerzo y el posterior deterioro en el concreto, disminuyendo la vida útil y afectando su óptimo funcionamiento.

Para evaluar la penetración del ion cloruro se utilizaron especímenes de concreto, de 100 mm de diámetro y 50 mm de espesor; la muestra de ensayo, después de un acondicionamiento previo, se posiciona en una celda que contiene una reserva de soluciones en ambos lados. Para el RCPT o prueba de Coulumb, una reserva es llenada con una solución de 3 % NaCl y la otra con solución 0,3 N NaOH. Se aplicó un potencial de 60 VCD a través de la celda. La terminal negativa se conecta en la reserva con NaCl y la terminal positiva se conecta a la reserva con NaOH. Los iones cloruros cargados negativamente migran hacia la terminal positiva.

Se emplearon 24 muestras de dimensiones descritas anteriormente, repartidas en 2 tipos de cemento (T-1 y T-3), que a la vez se divide en curado y sin curar, en 2 edades: 28 y 90 días, en ese orden.

A continuación se aprecia el ensayo de penetración de cloruros. Se observan las celdas que contienen las muestras, las cuales tienen en un extremo una solución de NaOH y en otro una solución de NaCl (figura 6).



Figura 6. Foto de ensayo de penetración de cloruros.

Fuente: Los autores.

Carbonatación

La carbonatación es un agente clave en el concreto expuesto a la acción del CO_2 , como es el caso de estructuras en centros urbanos, especialmente cerca de avenidas de importante tráfico vehicular.

Con el fin de evaluar la profundidad de carbonatación del concreto, en ambientes acelerados de CO_2 , se utilizaron 24 muestras con los dos tipos de cemento en

estudio, los dos ambientes de curado y edad de especímenes indicados en el presente artículo.

Para este ensayo se utilizó “la cámara de carbonatación”, disponiendo en su interior condiciones controladas con una concentración de CO_2 del 10,0 %, mucho mayor de la que se encuentra en el ambiente normal. Igualmente se mantuvieron las muestras con humedad relativa del 65 % y temperatura de 23 °C.

Seguidamente, se presenta una imagen de la cámara de carbonatación, perteneciente a los laboratorios de la Escuela Colombiana de Ingeniería (figura 7).



Figura 7. Cámara de carbonatación.

Fuente: Los autores.

Contracción y retracción del concreto

La retracción o contracción del concreto es la variación volumétrica que experimenta el concreto durante el proceso de fraguado, endurecimiento y secado, como consecuencia de la pérdida por evaporación del exceso de agua contenida en la muestra.

Por lo anterior, se realizó un ensayo que midió la variación volumétrica del concreto, para evaluar la influencia que tiene el tipo de cemento y el ambiente de curado, siguiendo los requisitos estipulados en la norma ASTM C157-93. Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete.

Para ello se fundieron 6 viguetas de sección transversal de 50 mm y longitud de 280 mm, de las cuales 3 se dejaron expuestas al aire y 3 se dejaron en curado en un tanque con agua.

En la figura siguiente se puede observar el equipo usado para la toma de datos del ensayo de contracción del concreto (figura 8).



Figura 7. Ensayo de contracción del concreto.
Fuente: Los autores.

A renglón seguido se observan las viguetas fundidas para la ejecución del ensayo.



Figura 8. Moldes de las viguetas en estado fresco.
Fuente: Los autores.

Permeabilidad al agua - ISAT

Con el fin de obtener un parámetro de permeabilidad al agua de las muestras de concreto, se llevó a cabo el ensayo ISAT tasa de absorción superficial inicial (Initial Surface Absorption Test BS 1881 part 208). Este ensayo se realizó a doce muestras de concreto para las variables de estudio indicadas anteriormente.

Dicha norma describe el método de ensayo, aunque no aparece una clasificación de concretos de acuerdo con el resultado obtenido (British Estándar, s.f.). Sin embargo, existe una escala creada por la Concrete Society, que clasifica los concretos de acuerdo con el parámetro ISAT (tabla 5).

De acuerdo con esto, la clasificación 1 corresponde a una buena durabilidad (poca absorción) y 5 corresponde a una mala durabilidad (gran absorción).

La permeabilidad y la absorción capilar están principalmente influenciadas por el volumen total de vacíos, su tamaño, su forma y su conectividad. En la figura siguiente se presenta el montaje para el ensayo de ISAT (figura 9).

Tabla 5
Clasificación de acuerdo con Concrete Society

Clasificación de durabilidad	ISAT (ml/m ² .s) x 10 ⁻²
1	<50
2	51 - 70
3	71 - 90
4	91 - 110
5	>110

Fuente: Concrete Society.



Figura 9. Ensayo ISAT.
Fuente: Los autores.

Resultados y análisis ensayos de durabilidad

Cloruros

A renglón seguido se muestra la penetración del ion cloruro a las edades de 28 y 90 días, en ambiente de curado y no curado, de los dos tipos de cemento analizados (figura 10).

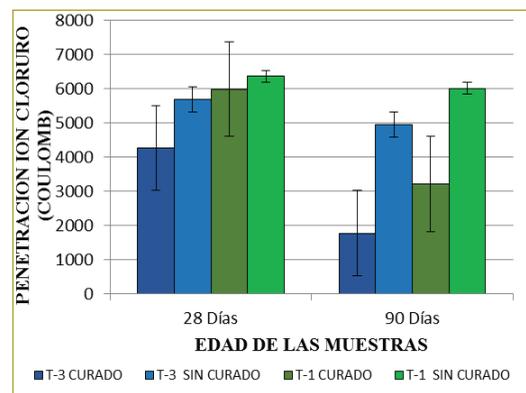


Figura 10. Penetración de ion de cloruro a diferentes edades (28 y 90 días).

Fuente: Los autores.

En la figura anterior se observa que los testigos de concreto curado, en los que se emplearon cemento tipo 1 y cemento tipo 3 entre los 28 y 90 días, tienen un aumento de permeabilidad al ion cloruro, con respecto a los no curados, entre el 41 y el 46 %, respectivamente.

Para los testigos de concreto curado, en los que se usaron cemento tipo 1 y cemento tipo 3 a los 28 días, tienen un aumento de permeabilidad del ion cloruro a los 90 días del 46 y 58 %, en ese orden.

Finalmente los testigos de concreto sin curar, en los que se emplearon cemento tipo 1 y cemento tipo 3 a los 28 días, tienen un aumento de permeabilidad del ion cloruro a los 90 días del 5 y 13 %, respectivamente.

Para clasificar la penetración de cloruros se utilizó la tabla siguiente, extraída de la ASTM C1202 (tabla 6).

Tabla 6
Clasificación del concreto según la penetración de cloruros

Carga	Penetrabilidad del ion cloruro
>4000	Alta
2000-4000	Moderada
1000-2000	Baja
100-1000	Muy baja
<100	Despreciable

Fuente: ASTM C1202.

A continuación se clasifican las muestras en las que se observa una baja permeabilidad de las muestras con cemento T3 a los 90 días en ambiente curado y si no se curan, la permeabilidad es alta; por otro lado, las muestras con cemento T1 curado a la misma edad pasan a moderada y si no se cura el concreto se mantienen en permeabilidad alta.

Tabla 7
Datos de resistencia a la penetración de ion de cloruro a diferentes edades (28 y 90 días)

	Resistencia a la penetración de ion cloruro Coulomb			
	28 días	Clasificación	90 días	Clasificación
T-3 curado	4,269	Alta	1,774	Baja
T-3 sin curado	5,684	Alta	4,953	Alta
T-1 curado	5,985	Alta	3,207	Moderada
T-1 sin curado	6,361	Alta	6,017	Alta

Fuente: Los autores.

Carbonatación

Los resultados de penetración de la carbonatación se presentan en mm, de acuerdo con los testigos descritos anteriormente (figura 11).

Se puede ver que la muestra T-1 (sin curado) se carbonató totalmente, incluso no alcanzó a soportar el primer periodo de exposición; la siguiente en tener más resistencia a la carbonatación es la muestra T-1 (curado), la cual alcanzó a tener una carbonatación del 70 % respecto a la profundidad máxima carbonatada, a los 14 días de inicio del ensayo.

La muestra que tuvo el mejor comportamiento a la carbonatación fue la muestra T-3 (curada), la cual tuvo una carbonatación máxima de 14 % en los testigos llevados a la cámara por 14 días y una madurez de 28 días, a diferencia de las muestras curadas a 90 días, las cuales sólo se carbonataron un 3 %, dejando claro que un adecuado curado es clave para la obtención de concreto de características adecuadas.

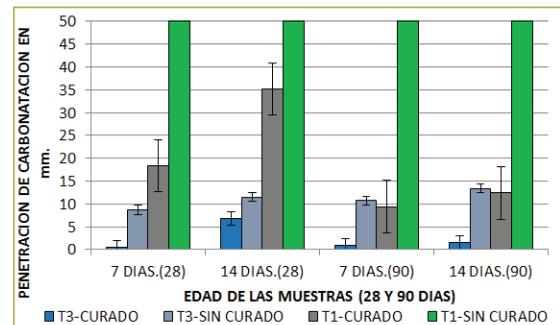


Figura 11. Penetración de carbonatación según tiempo de carbonatación (7 y 14 días), tipo de cemento y edades (28 y 90 días).

Fuente: Los autores.

En el ensayo de carbonatación se calcula la constante de carbonatación, de acuerdo con la ecuación siguiente; así mismo, se puede ver dicha constante para cada uno de los casos estudiados (tabla 8).

Ecuación 5.1. Constante de carbonatación

$$K = \frac{x}{\sqrt{t}}$$

Fuente: Diapositivas de tecnología del concreto.

Donde:

K = constante de carbonatación.

x = profundidad de capa carbonatada.

t = tiempo (edad del concreto).

Tabla 8

Coefficientes de carbonatación (K) de los especímenes en exposición acelerada (mm/día^{0,5}) de acuerdo con el tiempo de carbonatación (7 y 14 días) y tipo de concreto a diferente edades (28 y 90 días)

K (ambiente 10 % de CO ₂)					
Edad	Concreto 28 días		Concreto a 90 días		K _{prom}
Días de ensayo	7	14	7	14	
T-3 curado	0,18	1,82	0,38	0,42	0,70
T-3 sin curar	3,28	3,06	4,06	3,58	3,49
T-1 curado	6,94	9,39	3,55	3,31	5,80
T-1 sin curado	18,90	-	18,90	-	18,90

Fuente: Los autores.

En la tabla anterior se puede ver que la carbonatación que presentó el concreto T-3 curado es de K=0,70 mm / día^{0,5}, un poco inferior al esperado en un concreto de estas características (K=0,93 mm/día^{0,5}).

Contracción y retracción del concreto

En cuanto al ensayo de contracción del concreto, se puede observar que la mezcla con cemento T-3 presenta una contracción mayor que la de cemento tipo 1, lo que se atribuye a la mayor finura del cemento T3; de igual manera, la contracción es mayor para las que no fueron sometidas a curado (figura 12).

Por lo anterior, la forma como se realice el curado en el concreto dependerá de la magnitud de la contracción que resulte en un concreto estructural.

Se realizó una gráfica de promedio móvil de tres datos, para atenuar y observar el comportamiento de las muestras, y obtener una tendencia más clara de la variación volumétrica de las dos muestras (en curado y sin curar).

Igualmente, se observa que el comportamiento de las muestras curadas presenta una tendencia menor a contraerse a lo largo del tiempo que las muestras sin curar, donde su cambio volumétrico aumenta casi cuatro veces (figura 12).

De acuerdo con esto, se puede deducir que la contracción se incrementa en forma significativa a medida que pasa el tiempo en las muestras T-3 (sin curado) y T-1 (sin curado).

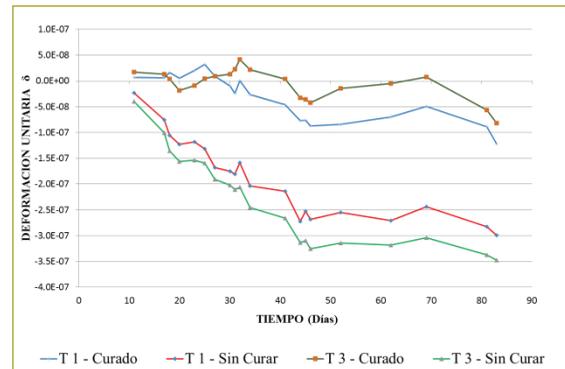


Figura 12. Promedio móvil de tres de variación volumétrica del concreto, según el tipo de cemento (curado y sin curar) a diferentes edades (28 y 90 días)

Fuente: Los autores.

Permeabilidad al agua ISAT

Con respecto al ensayo ISAT, a continuación se indica la tasa de absorción inicial del agua para las muestras analizadas.

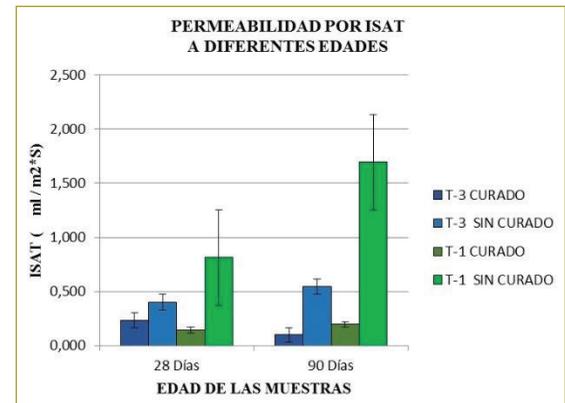


Figura 13. Tasa de absorción superficial inicial ISAT del concreto a diferentes edades (28 y 90 días).

Fuente: Los autores.

Tabla 9

Tasa de absorción superficial inicial ISAT a diferentes edades (28 y 90 días)

Descripción	ISAT - Tasa de absorción superficial inicial (ml/m ² .s)			
	28 días	Durabilidad (Concrete Society)	90 días	Durabilidad (Concrete Society)
T-3 sin curado	0,401	1 muy buena	0,545	2 buena
T-3 curado	0,234	1 muy buena	0,099	1 muy buena
T-1 sin curado	0,814	3 regular	1,696	5 muy mala
T-1 curado	0,144	1 muy buena	0,196	1 muy buena

Fuente: Los autores.

Por otra parte, se puede apreciar que el curado influye en la permeabilidad del concreto; para el caso de absorción superficial inicial ISAT, las muestras sin curado tienen una absorción entre dos y ocho veces mayor que las muestras sometidas en curado (figura 13).

En los resultados del ensayo ISAT, el tipo de cemento utilizado también es influyente en la tasa de absorción inicial del concreto, resultando para el cemento T-1 una absorción de una a tres veces mayor que la absorción con el cemento tipo 3.

De acuerdo con la clasificación de durabilidad de Concrete Society (tabla 9), las muestras sometidas a curado mantuvieron su clasificación entre 1 y 2 (muy buena a buena), en tanto que las muestras sin curar variaron entre 1 y 5 (muy buena a muy mala).

Se pudo verificar que la tasa de absorción inicial va disminuyendo con el tiempo a lecturas de 10 min, 20 min y 30 min, dado que los capilares con el tiempo de medición ya se encuentran llenos.

CONCLUSIONES

De los ensayos realizados se observó que el concreto elaborado con cemento T-1 posee unas bajas propiedades, tanto mecánicas como de durabilidad, lo cual se agrava profundamente con la falta de un adecuado curado. Por otra parte, las buenas propiedades del concreto elaborado con el cemento T-3 pueden aumentarse aún más si se implementan técnicas de curado acordes con las buenas prácticas de la construcción.

En Colombia es normal el uso de concretos elaborados con cementos comprados en ferretería, bien sea por los bajos volúmenes de concretos por fundir, o

por falta de plantas concreteras cercanas; esta razón, al igual que la falta de una buena cultura de elaboración y curado del concreto, lleva a que la gran mayoría de las pequeñas construcciones en Colombia se construyan con concreto de bajas características, tanto mecánicas como de durabilidad, si no se tienen los adecuados controles de calidad, y se necesite mayor cantidad de cemento T1 para lograr mejores prestaciones.

Aunque no es el alcance del presente artículo, podemos ver que no es suficiente obtener buenas resistencias a la compresión para garantizar otras propiedades importantes, como es el caso de la resistencia a la penetración del ion cloruro. Por eso es recomendable implementar el uso de adiciones, incorporar aire y una baja relación a/c para disminuir la afectación de las propiedades del concreto por agentes patológicos externos.

REFERENCIAS

- British Estándar (s.f.). *Referencia 3*. s.l.:s.n.
- Huerta Maza, M. A. y otros (2014). *Resistencia por adherencia pasta - agregados*. s.l.:Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo.
- INV E 406-7 (s.f.). *Contenido de aire en el concreto fresco Método de presión*. s.l.: Instituto Nacional de Vías (Invías).
- Latorre Cañón, A. (2008). *La industria del cemento en Colombia. Determinantes y comportamiento de la demanda (1996-2005)*. Tesis. Bogotá, D.C.: Pontificia Universidad Javeriana - Facultad de Ciencias Económicas.
- NTC 3357 (2006). *Concretos. Método de ensayo para determinar la temperatura del concreto fresco de cemento hidráulico*. s.l.: Icontec.
- NTC 396 (1992). *Ingeniería civil y arquitectura. método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto*. s.l.: Icontec.
- NTC 673 (2010). *Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto*. s.l.: Icontec.
- Proove'it. (1993). *Instruction and Maintenance Manual*. s.l.: Germann Instruments A/S.

Efectos de la presurización de los túneles de la conducción San Juan en el proyecto río Ranchería

Effects of tunnel pressurization in the San Juan conduit at the Ranchería river project

JUAN CAMILO TORRES ZAPATA - GERMÁN MONSALVE SÁENZ

1. Magíster en Ingeniería Civil.

2. Ingeniero civil de la Universidad de los Andes. Magíster en Ingeniería Hidráulica de la Universidad de Delft (Holanda).

juan.torres-z@mail.escuelaing.edu.co - german.monsalve@escuelaing.edu.co

Recibido: 18/08/2017 Aceptado: 09/09/2017

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

Resumen

En el proyecto río Ranchería, ubicado en el departamento de La Guajira, se evidenció que en la conducción San Juan (de 18,11 km) existen problemas de presurización de túneles que están diseñados para trabajar como canales. La presurización de estas estructuras puede ocasionar problemas de estabilidad de las paredes y techos, haciendo inoperante el sistema de transporte de agua de futuros distritos de riego y acueductos. En este artículo se presentan las características técnicas del problema y alternativas de solución para este tipo de conducciones.

Palabras claves: conducción, estabilidad, flujo libre, La Guajira, presurización, Ranchería, túnel.

Abstract

The Ranchería river project, located in La Guajira department, evidences that in the San Cesar conduit (18.11 km) there are pressurization problems in tunnels that are designed to work as canals. Pressurization in these structures may cause stability problems in walls and ceilings, rendering the water transport systems for future irrigation and aqueduct districts useless.

This article shows the technical characteristics of the problem and provides alternative solutions for these types of conduits.

Keywords: conduit, stability, free flow, La Guajira, pressurization, Ranchería, tunnel.

INTRODUCCIÓN

Debido al gran problema de abastecimiento de agua que tiene el departamento de La Guajira, se construyó en la cuenca del río Ranchería un embalse con el fin de optimizar el aprovechamiento del recurso hídrico en propósitos de acueductos, riego y generación eléctrica. Esta obra contempló la construcción de una conducción hidráulica cuyo sistema tiene tramos a presión y otros que deben trabajar a flujo libre en túneles.

Durante la operación del proyecto, los túneles construidos trabajarán muy posiblemente como un sistema presurizado, motivo por el cual es necesario conocer en detalle el comportamiento en este tipo de escenarios.

En el presente artículo se expone el análisis de la conducción con la condición planteada en el diseño y la condición presente durante la operación. Igualmente, se evidencian los posibles problemas y se hacen propuestas de solución técnica hidráulica.

RESULTADOS

Problema propuesto

La obra construida de la conducción San Juan tiene la capacidad de transportar un caudal de 2,50 m³/s. Se contemplan 15,88 km en tubería de CCP (cilindro en acero con refuerzo de varilla y revestimientos en mortero de cemento) de 1300 mm de diámetro, y dos tramos de túnel que suman una longitud de 2,23 km, los cuales tienen una sección transversal en herradura

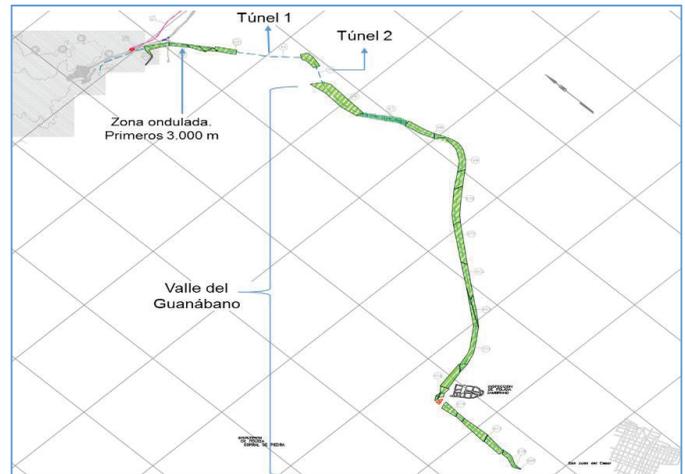


Figura 2. Planta del trazado de conducción San Juan del Cesar.

de paredes verticales y solera plana, de 3,0 m de ancho y 1,50 m de radio en su clave.

Antes de la construcción y operación de los distritos de riego, y como parte de procedimientos propios del mantenimiento de las obras, se realizó en el año 2012 una prueba de carga de la conducción San Juan, que proporcionó como resultado la presurización de los dos túneles que se encuentran en el trazado.

Según el diseño, ambos túneles deberían trabajar a flujo libre, dado que no tienen el revestimiento o protección necesaria para estar presurizados, escenario que puede ocasionar un colapso súbito de las paredes o techo. Adicionalmente, en algunos documentos se menciona que la roca está diaclasada y el revestimiento

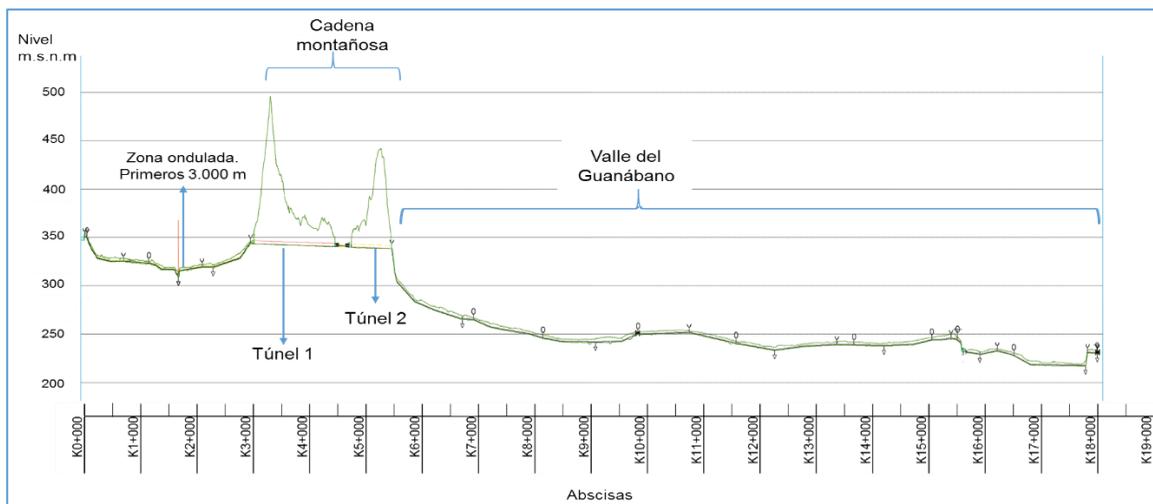


Figura 1. Perfil descriptivo de la conducción San Juan.

de concreto lanzado no aporta mayor resistencia a los esfuerzos y arrastre del flujo de agua.

Una vez evidenciado el problema de la presurización total del sistema (tubería y túneles), se modelaron en programas de simulación hidráulica (como Epanet y HEC-RAS) las condiciones de diseño y la condición real presentada en las pruebas de carga, con el fin de comparar resultados y analizar alternativas de solución. En las modelaciones se encontró que los túneles había presiones desde 0 hasta casi 6,0 mca y esta situación prolongada ocasionaría problemas de estabilidad en la roca.

Solución propuesta

Como resultado del análisis para la solución del problema, se presentaron tres opciones:

1. Recubrimiento de los túneles en concreto.
2. Instalación de tubería.

3. Construcción de vertederos de excesos en portales de entrada y salida de cada túnel.

Teniendo en cuenta las alternativas de solución propuestas, a continuación se analiza cada una de ellas.

Alternativa 1. Recubrimiento de los túneles en concreto

Actualmente, los túneles presentan una sección en herradura; tienen la solera y parte de los hastiales construidos en concreto hidráulico de 4000 psi, elementos que son el 56,0 % del total del perímetro del túnel. La bóveda o parte superior del túnel, que constituye el 44,0 % del perímetro del túnel, se encuentra construida en concreto neumático de poca resistencia, dado que su función sólo es evitar la caída de pequeños fragmentos de roca.

La solución planteada consiste en hacer un refuerzo estructural de los túneles mediante la colocación de concreto hidráulico de 4000 psi en las partes que se

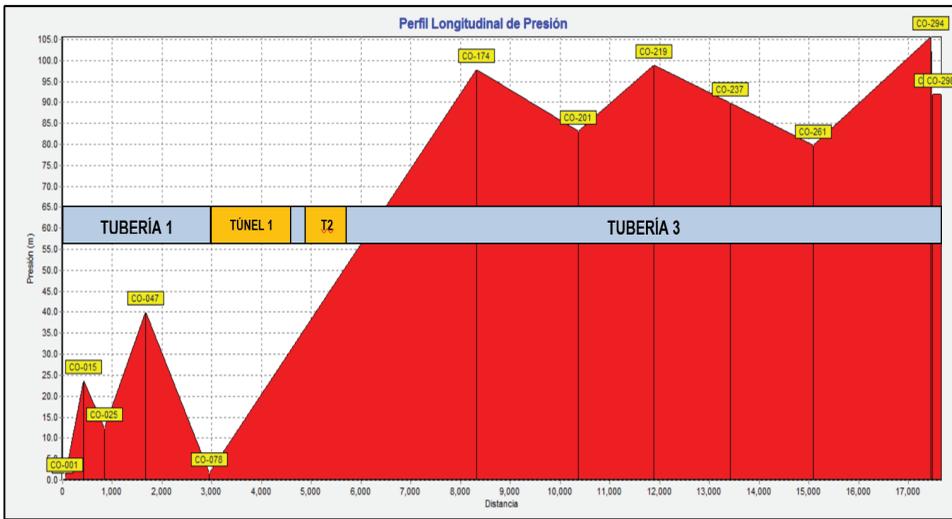
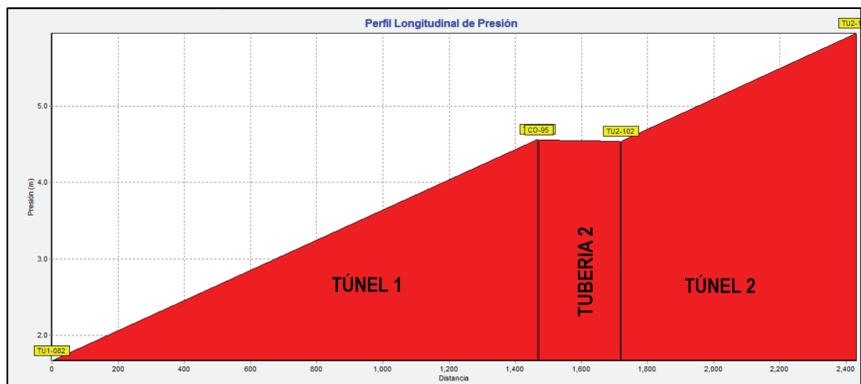


Figura 3. Gráfico de presiones de la conducción San Juan, con modelo de las pruebas realizadas en el año 2012.

Figura 4. Análisis de presurización de túneles, presiones variables desde 0 hasta 6 mca.



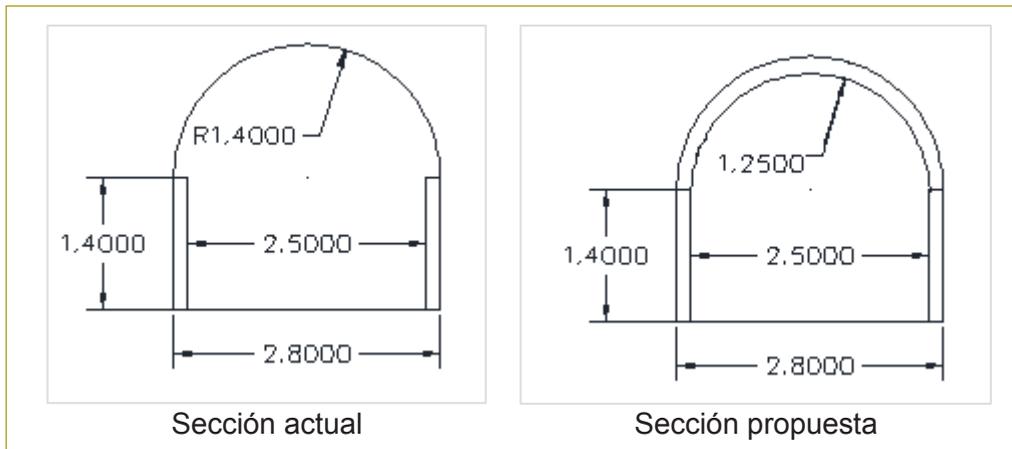


Figura 5. Alternativa de recubrimiento de sección de túneles.

encuentra el concreto neumático. El espesor del nuevo recubrimiento debería ser como mínimo de 15 cm, que es el mismo que se encuentra en la parte inferior del túnel. En la siguiente figura se presentan la sección actual y la propuesta en esta alternativa.

Al modelar el sistema en el programa Epanet, se evidencia que los túneles de la conducción no tienen problemas de presiones, dado que presentan presiones que varían de 1,67 a 5,97 mca que son superados fácilmente con la resistencia del revestimiento.

Alternativa 2. Instalación de tubería

Para resolver el problema de estabilidad de los túneles de la conducción San Juan, se plantea instalar en cada túnel dos tramos de tubería que permitirán dar continuidad al sistema presurizado que se encuentra aguas arriba y

abajo de éstos, en tubería de CCP de 1,30 metros de diámetro.

Una vez reconocida la instalación de tubería como posible solución a los problemas, se procedió a hacer modelaciones en Epanet con los respectivos análisis, utilizando como base tubería en GRP (tubos de poliéster reforzados con fibra de vidrio) y tubería en CCP (cilindro en acero con refuerzo de varilla y revestimientos en mortero de cemento). Los diámetros de tubería considerados para el estudio son de 800 y 1300 mm, teniendo en cuenta la facilidad de instalación y los procesos constructivos.

- Modelo 1. Tubería GRP de 800 mm y rugosidad de 0,009

En el modelo se presentan presiones negativas desde el inicio de los túneles, debido a la disminución de sec-

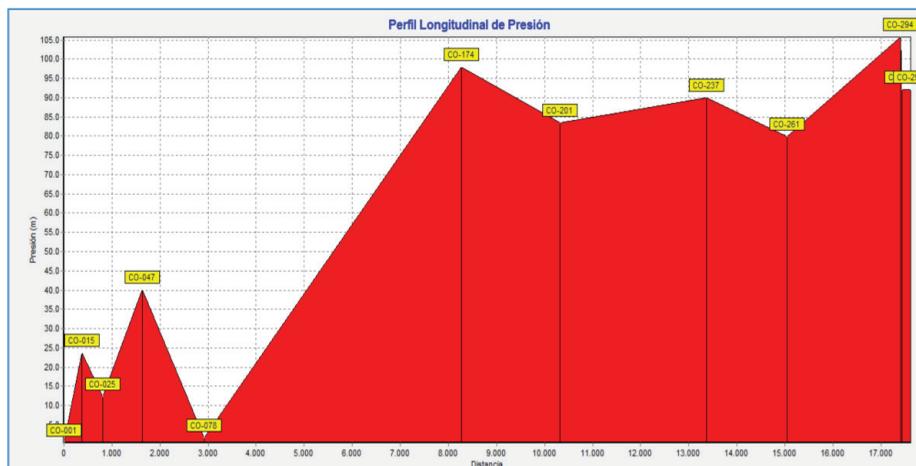


Figura 6. Perfil longitudinal de presiones de alternativa 1. Recubrimiento de túneles.

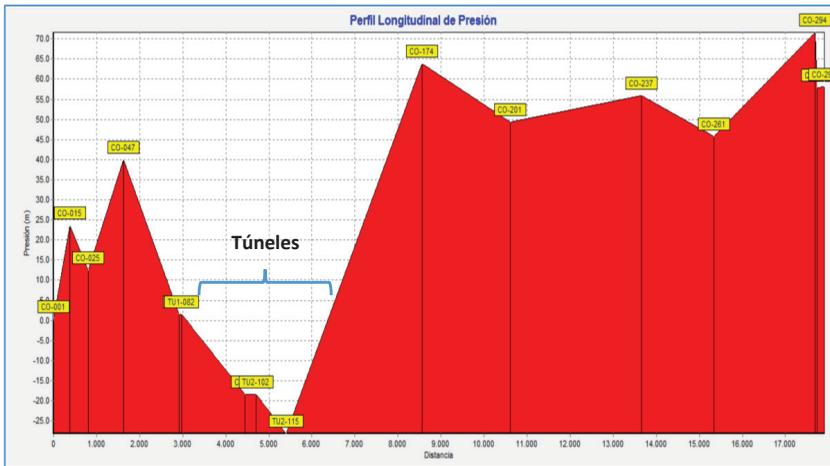


Figura 8. Perfil longitudinal de presiones de alternativa 2. Tubería CCP de 800 mm.

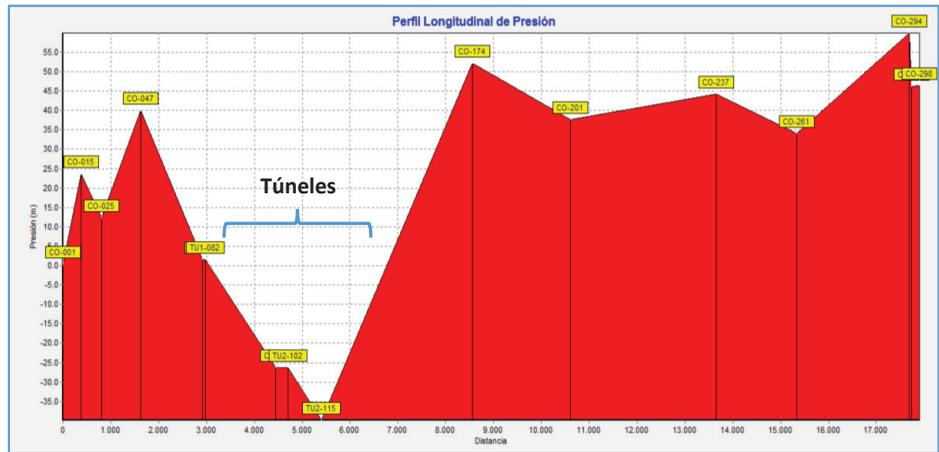


Figura 7. Perfil longitudinal de presiones de alternativa 2. Tubería GRP de 800 mm.

ción, que pasa de 1300 a 800 mm. Esta situación genera aumento de velocidad y disminución de presión, lo que indica que se presentan problemas de cavitación y se necesitaría mayor energía en la conducción para hacer funcionar el sistema correctamente.

- Modelo 2. Tubería CCP de 800 mm y rugosidad de 0,012

En el modelo se presentan presiones negativas desde el inicio de los túneles debido a la disminución de sección, que pasa de 1300 a 800 mm. Esta situación genera aumento de velocidad y disminución de presión, lo que indica que se presentan problemas de cavitación y se necesitaría mayor energía en la conducción para hacer funcionar el sistema correctamente. Las presiones negativas del modelo son superiores al modelo 1, debido a que el material de la tubería de CCP es más rugoso que el GRP.

- Modelo 3. Tubería GRP de 1300 mm y rugosidad de 0,009

El modelo no presenta presiones negativas y el valor mínimo es de 1,67 m en el nodo a la entrada del primer túnel. En términos generales, el sistema no presenta problemas y la tubería trabaja de manera adecuada.

- Modelo 4. Tubería CCP de 1300 mm y rugosidad de 0,012

El modelo no presenta presiones negativas y el valor mínimo es de 1,67 m en el nodo a la entrada del primer túnel. En términos generales, el sistema no presenta problemas y la tubería trabaja de manera adecuada.

Alternativa 3. Construcción de vertederos de excesos en portales de salida de cada túnel

Con el fin de solucionar el problema de estabilidad de los túneles de la conducción San Juan, se plantea dar una

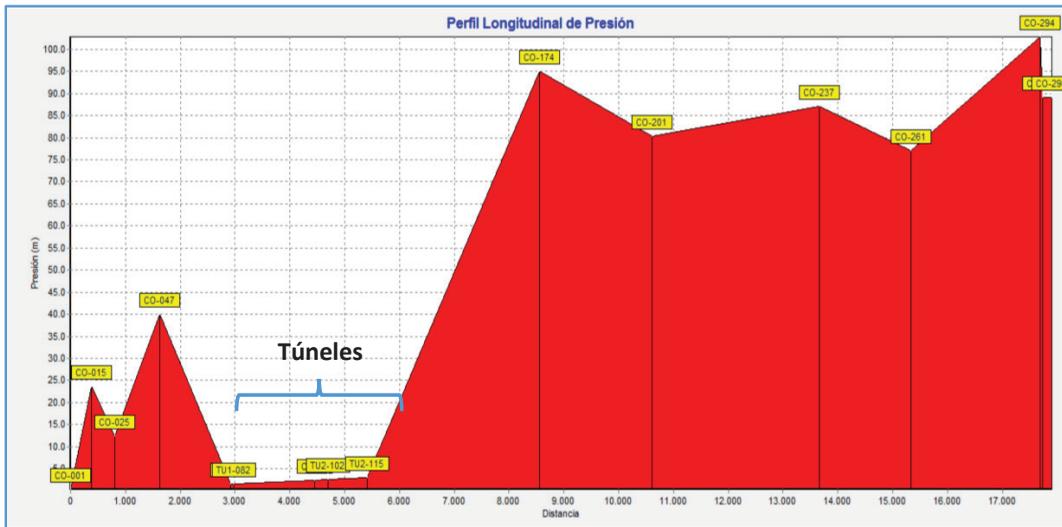


Figura 9. Perfil longitudinal de presiones de alternativa 2. Tubería GRP de 1300 mm.

apertura a los portales de entrada y salida de cada túnel, que permita el rebose de agua y evite la presurización del sistema en estos tramos. La altura de esta apertura en cada uno de los portales es de aproximadamente 30 cm, y en cada punto se encuentra instalada una malla contra murciélagos para evitar la entrada de estos animales, dado que las condiciones del túnel son aptas para su hábitat.

Para la construcción de un vertedero de excesos en los portales de los túneles es necesario el retiro de la malla, que desde el punto de vista técnico de ingeniería sería la mejor alternativa en cuanto a que la intervención realizada a los túneles es mínima en comparación con las otras obras propuestas, pero al dejar los túneles

expuestos al ingreso de animales u otros agentes contaminantes del agua no se considera viable. Para esta solución se deben analizar componentes ambientales y de calidad de agua para cultivos que se encuentran por fuera del alcance del presente artículo.

CONCLUSIONES

- El recubrimiento de los túneles relacionado en la alternativa 1 cumple con las condiciones hidráulicas de los diseños, pero para este tipo de intervención se pueden generar problemas de estabilidad de los túneles y se requiere un análisis detallado del macizo

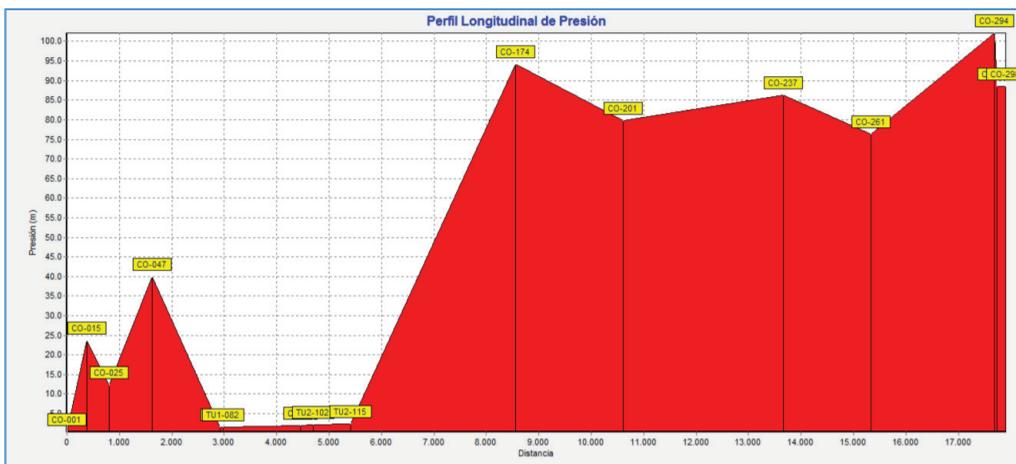


Figura 10. Perfil longitudinal de presiones de alternativa 2. Tubería CCP de 1300 mm.

rocoso. La roca presente en la zona se encuentra diaclasada y para aplicar esta alternativa se requiere un estudio geológico.

- Con respecto a la instalación de tubería, se consideraron cuatro tipos tubos de diámetros y materiales diferentes, que son los que se utilizan actualmente en estas obras. En Epanet se modeló cada uno, y se llegó a las siguientes conclusiones:
 - Las tuberías con diámetros de 800 mm, sin importar el material, presentan presiones negativas que ocasionarían problemas de cavitación en el sistema, y velocidad mayor de 2,0 m/s, que son superiores a los requerimientos de diseño. Una vez analizadas estas opciones, no se considera viable técnicamente.
 - Las tuberías de 1300 mm de GRP y CCP se comportan de manera similar en el modelo y cumplen con las condiciones del diseño.
- Para la construcción de un vertedero de excesos en los portales de entrada, es necesario retirar la malla antimurciélagos, lo cual dejaría los túneles expues-

tos al ingreso de animales. Ambientalmente, esta alternativa no es viable, dado que se compromete la calidad del agua.

- Se deben analizar los costos de instalación de las tuberías de GRP y CCP de 1300 mm, debido a que pueden ser un factor determinante al momento de tomar la decisión de construcción. El presente artículo tiene un propósito académico, por lo que sólo incluye el análisis técnico hidráulico y no analiza el valor de las obras.

Como resultado de esto, se concluye que la instalación de tubería de 1300 mm en el interior de los túneles garantiza la continuidad del sistema presurizado y evita que se puedan presentar problemas de estabilidad en las estructuras. Teniendo en cuenta que la construcción del sistema de la conducción San Juan se encuentra en tubería tipo CCP 1300 mm y que ésta no presenta mayor diferencia con la tubería de otro material, es preciso concluir que la instalación de este elemento es la mejor solución para el problema planteado.

E-health y m-health en Colombia: antecedentes, restricciones y consideraciones para el desarrollo de nuevas tecnologías basadas en software

E-health and m-health in Colombia: Background, restrictions and considerations for the development of new software-based technologies

HÉCTOR FABIO CADAVID RENGIFO

Profesor del Programa de Ingeniería de Sistemas de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

hector.cadauid@escuelaing.edu.co

Recibido: 25/08/2017 Aceptado: 15/09/2017

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

Resumen

Los conceptos de *e-health* y *m-health* representan una gran oportunidad para superar las grandes limitaciones de cobertura, equidad y calidad de los servicios de salud de países como Colombia.

Por eso se busca, mediante una revisión de los antecedentes de dichas tecnologías en el país, y las restricciones legales y técnicas para su implementación, que el presente artículo sea una referencia de base para la formulación de futuros proyectos en los grupos de investigación que quieran incursionar en el tema. Igualmente, se proponen una serie de conclusiones en cuanto a las posibilidades concretas de acción conforme a la legislación colombiana actual, y se dan recomendaciones concretas (desde el punto de vista técnico) para ser consideradas dentro de las actividades de investigación de futuros proyectos en el área.

Palabras claves: telemedicina en Colombia, *e-health*, *m-health*.

Abstract

E-Health and M-Health, as a concept, represent a great opportunity to overcome the great limitations of coverage, equity, and quality of health services in countries like Colombia. This article intends, through a background review of these technologies in the country and legal and technical restrictions for its implementation, to be a basic reference for the formulation of future projects in research groups that want to venture into this subject. It also proposes a series of conclusions regarding concrete possibilities of action under the current Colombian legislation and gives specific recommendations -from the technical point of view- to be considered within the research activities of future projects in the area.

Keywords: Telemedicine in Colombia, E-Health, M-Health.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de salud estatales han sido siempre tema de intenso debate político y técnico en prácticamente todos los países del mundo, pues de éstos depende muy buena parte de la calidad de vida de cualquier sociedad. En el caso colombiano, con su muchas veces polémica Ley 100, se apostó por un modelo que, aunque buscó alcanzar una cobertura total de los ciudadanos, no lo logró, pues parte de la población ha tenido la percepción de que se ha quedado corta en aspectos como la calidad y la oportunidad del servicio.

Sin embargo, un aspecto que cabe destacar dentro del modelo colombiano, que va más allá de cualquier percepción, dadas las características geográficas y sociales del país, es el limitado acceso a los servicios. En el documento de trabajo sobre economía regional de Jhorland Ayala (Ayala, 2014) se evidencia el hecho de que aún con una tendencia a la cobertura del 100 %, el tener departamentos como el Vichada y el Guainía, con una extensión superior a la de Cundinamarca pero con menos de la centésima parte de su población (80.000 habitantes, aproximadamente¹), hace que sea muy difícil garantizar el acceso y, por ende, cumplir de manera efectiva con la misión social de los regímenes de salud.

La pregunta en cuestión es, entonces, cómo lograr mejorar a mediano y largo plazo el acceso a los servicios de salud a las regiones menos densamente pobladas del país, en particular aquellos especializados. Desde hace ya bastantes años en Colombia se ha planteado que la solución está en la integración de la tecnología con los servicios de salud, de modo que éstos puedan hacerse llegar, con mayor facilidad, a las zonas más apartadas del país. Aunque los avances que en esta materia han conseguido diversas entidades y grupos de investigación colombianos no son muy conocidos, éstos han sido significativos y ameritan ser usados como referente y como motivación para, desde la academia y la industria, seguir contribuyendo a la solución del problema del acceso a los servicios de salud.

Este artículo tiene como propósito poner en el contexto colombiano los conceptos de *e-health* y *m-health*, en cuanto a sus antecedentes y a la reglamentación legal a la que ha conducido su muy particular historia. Por otro lado, sobre la base de las restricciones legales del

e-health actuales en cuanto a calidad, y el estado de las tecnologías disponibles para este tipo de soluciones, se plantean una serie de recomendaciones que desde un punto de vista más técnico se deberían considerar al momento de desarrollar nuevos proyectos en el área.

El artículo está estructurado de la siguiente manera: la sección 2 introduce los conceptos básicos y avances de la telemedicina a través de una reseña histórica con énfasis en el contexto de Colombia. La sección 3 recoge y revisa la evolución en el aspecto legal de la telemedicina en el país, destacando aquellos aspectos técnicos sobre los cuales se podría contribuir desde diferentes áreas de la ingeniería. La sección 4 se enfoca en una revisión de aspectos fundamentales desde la perspectiva de la ingeniería de *software* y la seguridad informática para la creación de soluciones de telemedicina soportadas por *software*, incluyendo riesgos y sus estándares asociados. Finalmente, en la sección 5 se presentan recomendaciones sobre las oportunidades de investigación a manera de conclusiones.

CONCEPTOS BÁSICOS Y ANTECEDENTES EN COLOMBIA Y EL MUNDO

En el contexto general de la tecnología aplicada a la salud, suelen emplearse indistintamente los términos *e-health*, *m-health*, telesalud y telemedicina. El término *e-health* (o e-Salud, una traducción poco utilizada) hace referencia al uso general de las TIC en medicina, incluyendo un amplio espectro de tecnologías como los EHR (Electronic Health Record), asociados con el manejo de historias clínicas electrónicas y demás datos diagnósticos, las plataformas de procesamiento e intercambio de imágenes diagnósticas o datos de laboratorio, entre otros. Así mismo, el término *m-health* hace referencia al medio de interacción entre médicos (o dispositivos médicos) y pacientes, de modo que se podría decir que este último está contenido en el primero.

De acuerdo con las definiciones dadas para Colombia en este tema por la Ley 1419 de 2010, el término telemedicina estaría estrechamente relacionado con el de *m-health*, al definirse como “la provisión de servicios de salud a distancia en los componentes de promoción, prevención, diagnóstico, tratamiento y rehabilitación, por profesionales de la salud que utilizan tecnologías de la información y la comunicación, que les permiten intercambiar datos con el propósito de facilitar el

1. Según consulta a la plataforma gubernamental Datos Abiertos <https://www.datos.gov.co/>.

acceso y la oportunidad en la prestación de servicios a la población que presenta limitaciones de oferta, de acceso a los servicios o de ambos en su área geográfica". Según estas mismas definiciones, telesalud puede verse como un superconjunto de la telemedicina, ya que hace referencia a cualquier tipo de actividad realizada a distancia relacionada con el tema de la salud, incluyendo actividades (además de la telemedicina) como la educación a distancia en temas de salud.

Por su parte, la bibliografía existente da cuenta de decenas de términos derivados de la telemedicina que permiten hacer referencia directa a la especialidad con la que se relaciona la respectiva tecnología, tales como teleradiología, telecardiología, teleendoscopia, teledermatología y teleoftalmología.

Orígenes de la telemedicina

Si se entiende a la telemedicina como la aplicación de las telecomunicaciones en salud, las primeras aplicaciones pueden ser imposibles de identificar, pues podrían remontarse a los orígenes mismos de este concepto (telecomunicaciones), donde cabrían las señales de humo o los heliógrafos (señales con reflejos solares) (Zundel, 1996). Sin embargo, en el siglo XX se le pueden atribuir los primeros avances en telemedicina con dispositivos electrónicos a la carrera espacial de los sesenta y setenta, en donde la NASA tuvo que desarrollar dispositivos de telemetría para poder controlar los signos vitales de los astronautas (Bashur, Armstrong & Youssef, 1975). Por esta misma época también se encuentran registros de las primeras aproximaciones al telediagnóstico mediante el uso de las líneas telefónicas analógicas de esa época para la transferencia de imágenes diagnósticas y señales cardíacas (Ray et al., 1965; Gardner, Bennet & Vorce, 1974).

Antecedentes de la telemedicina en Colombia

Aunque se tienen antecedentes documentados desde 1973 en el desarrollo de tecnologías colombianas para la transmisión telefónica de electrocardiogramas (Yunda Perlaza et al., 2015), el programa de telemedicina del grupo de investigación Bioingenium (Universidad Nacional de Colombia) y el Centro Nacional de Telemedicina del Instituto del Corazón (Fundación Cardiovascular de Bucaramanga) podrían considerarse los pioneros de la telemedicina aplicada entre 2002 y 2003.

Desde esa época, ambas entidades han desarrollado un número importante de avances en la creación y aplicación de soluciones de telemedicina orientadas a la prestación de servicios en diferentes municipios y regiones apartadas del país, a través de las cuales médicos generales pueden interactuar desde lugares remotos con personal especializado en temas como medicina interna, pediatría o cardiología. A la fecha, el programa de telemedicina de Bioingenium reporta cerca de 22.000 teleinterconsultas con un cubrimiento en 50 hospitales, mientras que el Centro Nacional de Telemedicina reporta un cubrimiento en 100 hospitales ubicados en 23 departamentos del país.

En el año 2009 se publicó, por primera vez, una revisión sistemática de los proyectos de telemedicina desarrollados en el país hasta el 2008 (Rey-Moreno et al., 2010), dando cuenta de 32 trabajos asociados al tema desarrollados por 10 grupos de investigación. Aunque se advierte sobre la falta de evaluación de las mejoras en la calidad y cubrimiento de los mecanismos de diagnóstico remoto propuestos, se habla de una población de cerca de 550.000 pacientes beneficiados (o al menos involucrados) con estos proyectos, a través de 650 instituciones prestadoras de servicios de salud. Entre los proyectos mencionados en esta investigación cabe destacar:

- Teledianóstico - Clínica Leticia. Caso de éxito en 2005 de diagnóstico remoto de caso de tuberculosis cutánea, a través de herramientas de teledermatología y la aplicación remota de técnicas de biología molecular (Ángel et al., 2005).
- T@lemed. Proyecto del programa @lis (Alianza para la Información de la Sociedad), programa de cooperación entre la Comisión de la Unión Europea y América Latina, con instituciones de Brasil y Colombia. Desde 2006, la Universidad Santiago de Cali y la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, forman parte de este proyecto, haciendo uso de la plataforma e-Salud para la presentación del servicio a zonas remotas y rurales del país (Sachpazidis et al., 2006).
- Centro de Servicios en Telemedicina - Fundación Santa Fe de Bogotá². Este centro, creado en 2008,

2. <http://www.fsfb.org.co/node/216>.

soporta servicios de prevención, promoción y atención de salud en diversos municipios de Cundinamarca, la Costa Atlántica y la Costa Pacífica. De este centro sobresalen proyectos como DoctorChat, plataforma creada en 2007 para la asesoría médica abierta y gratuita (Valenzuela et al., 2007), la cual fue portada, en 2014, a una aplicación móvil que permite a los jóvenes hacer consultas en temas de sexualidad y salud reproductiva (López et al., 2014). Por otro lado, este centro tiene casos documentados en áreas específicas, como la teleoftalmología (Castaño et al., 2009).

Posterior a la fecha de la revisión antes mencionada, se encuentran una serie de trabajos que, desde diferentes perspectivas, han buscado contribuir a la telemedicina en el país. Desde la perspectiva de la infraestructura y el *software* requerido para soportar labores de telemedicina, se puede encontrar la plataforma de telemedicina propuesta en 2014 por la Universidad Nacional de Colombia (Romero, 2014), la cual considera elementos de arquitectura de *software*, y elementos de estandarización y seguridad, tales como HL7 y la certificación de los datos manejados. Por otro lado, en la Escuela Colombiana de Ingeniería (Héctor & Javier, 2014; Corredor & Cadavid, 2015) se ha trabajado desde 2013 en el desarrollo del *hardware* y la arquitectura de *software* para plataformas específicas de telemonitoreo de señales cardíacas, teniendo como énfasis la posibilidad de integrar técnicas de diagnóstico automático basadas en el procesamiento computarizado de señales.

En el área de la teleoptometría, la Universidad de La Salle y la Universidad Jorge Tadeo Lozano (2014-2016) han trabajado en el desarrollo de plataformas de telemonitoreo de problemas concretos, como la retinopatía, a través del uso de móviles (Lancheros-Cuesta et al., 2014), y posteriormente en el desarrollo del marco médico y legal que eventualmente permita la prestación de este servicio en el sistema de salud colombiano (Elizalde et al., 2016).

Entre los avances recientes en el área, vale la pena destacar las iniciativas que surgen fuera de la academia, bien sean de empresas privadas o de fundaciones sin ánimo de lucro. La compañía ITMS (International Telemedical Systems Colombia), además de desarrollar investigación alrededor de la telemedicina en temas como la viabilidad del riesgo vascular a través de la

telemedicina (Osorio et al., n.d.), vende equipos biomédicos especializados y presta servicios telemédicos. El esquema de telemedicina evaluado por la empresa hace uso de una estación remota, cámaras, sensores (toma de signos vitales) y un formato de historia clínica digital, en la cual se pueden anexar estudios y fotos de cada uno de los pacientes. A partir de esto, se plantea un protocolo en el que el médico define si, con la información suministrada, puede o no manejar el caso a distancia.

Por otro lado, Lumen Global, una fundación sin ánimo de lucro que crea y apoya iniciativas para reducir los casos de muerte a causa de los infartos al miocardio, en 2014 desarrolló el programa Latin (Latin America Telemedicine Infarct Network) (Sameer Mehta et al., 2016), un piloto de red de telemedicina que permita mejorar el acceso a la atención médica del infarto agudo, buscando reducir las desigualdades en la atención de estos casos creadas por las barreras sociales.

Esta red, en la que ya se cuenta con la participación de siete departamentos, permite que un conjunto de expertos pueda, en forma remota, hacer interpretaciones de electrocardiogramas y realizar teleconsultas con el respectivo paciente. Cada punto asociado a la red (aquellos que no cuentan con especialistas en cardiología) tiene dispositivos patentados ECG con capacidades de transmisión de la señal usando un formato digital estandarizado.

ASPECTOS LEGALES DE LA TELEMEDICINA EN COLOMBIA

Los siguientes son los hitos más importantes de la normativa legal desarrollada alrededor de los conceptos de telesalud y telemedicina en Colombia.

1999. Ley 527 de 1999. Por la cual se define y reglamenta el acceso y uso de los mensajes de datos, del comercio electrónico y de las firmas digitales.

2004. Resolución 2182 de 2004. Define las condiciones de habilitación para las instituciones que prestan servicios de salud en la modalidad de telemedicina. Ésta define los términos de institución remitora y centro de referencia (usados en actos legislativos posteriores) de la siguiente manera: **Institución remitora.** Es aquella institución prestadora de servicios de salud localizada en un área con limitaciones de acceso o en la capacidad resolutoria de uno o más de los componentes que conforman sus servicios, y que cuenta con tecnología

de comunicaciones que le permite enviar y recibir información para ser apoyada por otra institución de mayor complejidad que la suya, en la solución de las necesidades de salud de la población que atiende, en los componentes de promoción, prevención, diagnóstico, tratamiento o rehabilitación de la enfermedad. **Centro de referencia.** Es aquella institución prestadora de servicios de salud que cuenta con los recursos asistenciales especializados, y con las tecnologías de información y de comunicación suficientes y necesarios para brindar a distancia el apoyo en los componentes de promoción, prevención, diagnóstico, tratamiento o rehabilitación de la enfermedad, requeridos por una o más instituciones remisoras en condiciones de oportunidad y seguridad.

2006. Resolución 1448 de 2006. Define las condiciones de habilitación para las instituciones que prestan servicios de salud en la modalidad de telemedicina: “Es el conjunto de normas, requisitos y procedimientos mediante los cuales se establece, registra, verifica y controla el cumplimiento de las condiciones básicas de capacidad tecnológica y científica, de suficiencia patrimonial y financiera y de capacidad técnico-administrativa, indispensables para la entrada y permanencia en el sistema, los cuales buscan dar seguridad a los usuarios frente a los potenciales riesgos asociados a la prestación de servicios y son de obligatorio cumplimiento por parte de los prestadores de servicios de salud y las empresas administradoras de planes de beneficios (EAPB)”.

2007. Ley 1122 de 2007. La nación y las entidades territoriales promoverán los servicios de telemedicina para contribuir a la prevención de enfermedades crónicas y a la disminución de costos y mejoramiento de la calidad y oportunidad de prestación de servicios, como es el caso de las imágenes diagnósticas. Especial interés tendrán los departamentos de Amazonas, Casanare, Caquetá, Guaviare, Guainía, Vichada y Vaupés.

2008. Ley 1266 de 2008. Por la cual se dictan las disposiciones generales del *habeas data* y se regula el manejo de la información contenida en bases de datos personales, incluidos los servicios de salud, y especifica que los datos personales no pueden ser transmitidos ni compartidos sin consentimiento del cliente.

2009. Ley 1341 de 2009. Por la cual se definen principios y conceptos sobre la sociedad de la información y la organización de las tecnologías de la información y

las comunicaciones (TIC), se crea la Agencia Nacional del Espectro (ANE) y se dictan otras disposiciones.

2009. Ley 1273. Por medio de la cual se modifica el Código Penal, se crea un nuevo bien jurídico tutelado (denominado “de la protección de la información y de los datos”) y se preservan integralmente los sistemas que utilicen las tecnologías de la información y las comunicaciones.

2010. Se crea el documento Conpes 3670, para el acceso a internet en áreas remotas y a las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) a través del programa Compartel, con patrocinio del Estado colombiano.

2010. Ley 1419, Consejo Nacional de Política Económica y Social (Conpes). “Es la provisión de servicios de salud a distancia en los componentes de promoción, prevención, diagnóstico, tratamiento y rehabilitación, por profesionales de la salud que utilizan las TIC, que les permiten intercambiar datos con el propósito de facilitar el acceso y la oportunidad en la prestación de servicios a la población que presenta limitaciones de oferta, de acceso a los servicios o de ambos en su área geográfica”.

2014. Resolución 2003. Define los procedimientos y condiciones de inscripción de los prestadores de servicios de salud y de habilitación de servicios de salud en las modalidades intramural, extramural y telemedicina. Para la habilitación, se hace una distinción entre los centros de referencia y las instituciones remisoras.

2016. Resolución 3595 de 2016. Modificación a la Resolución 5159 de 2015, relacionada con el modelo de atención en salud a la población carcelaria, para incluir el concepto de telesalud. Es la modalidad de prestación de servicios de salud, realizados a distancia, en los componentes de promoción, prevención, diagnóstico, tratamiento y rehabilitación, por profesionales de la salud que utilizan tecnologías de la información y la comunicación que les permiten intercambiar datos con el propósito de facilitar el acceso y la oportunidad en la prestación de servicios de salud a la población que presenta limitaciones de oferta y de acceso a los servicios, o problemas de seguridad en el caso de los establecimientos de reclusión.

Habilitación de servicios de telemedicina en Colombia

De acuerdo con las normas vigentes del Ministerio de Salud de Colombia referentes al Sistema Único de Habilitación³, ésta se define como “el conjunto de normas, requisitos y procedimientos mediante los cuales se establece, registra, verifica y controla el cumplimiento de las condiciones básicas de capacidad tecnológica y científica, de suficiencia patrimonial y financiera y de capacidad técnico-administrativa, indispensables para la entrada y permanencia en el sistema, los cuales buscan dar seguridad a los usuarios frente a los potenciales riesgos asociados a la prestación de servicios, y son de obligatorio cumplimiento por parte de los prestadores de servicios de salud y las empresas administradoras de planes de beneficios (EAPB)”.

Dicho sistema se basa, fundamentalmente, en unos estándares documentados continuamente a través de resoluciones del Ministerio de Salud y Protección Social, los cuales, con este mismo conjunto de normas, se definen como las condiciones tecnológicas y científicas mínimas e indispensables para la prestación de servicios de salud, aplicables a cualquier prestador de servicios de salud, independientemente del servicio que éste ofrezca. Los estándares de habilitación son principalmente de estructura y delimitan el punto en el cual los beneficios superan a los riesgos. El enfoque de riesgo en la habilitación procura que el diseño de los estándares cumpla con ese principio básico y que éstos apunten a los riesgos principales.

Por lo tanto, en el escenario del desarrollo e incorporación de tecnologías de telemedicina, los estándares de habilitación son, además de la referencia del Ministerio de Salud para habilitar (autorizar) la prestación de un determinado servicio a una IPS, una hoja de ruta para que ésta implemente dichos servicios a cabalidad. Las dimensiones consideradas en estos estándares son:

- *Talento humano*. Condiciones que debe cumplir el recurso humano de la IPS.
- *Infraestructura*. Condiciones o características de las áreas físicas asistenciales.
- *Dotación*. Condiciones o características de los equipos médicos.

3. Resoluciones 1416 de 2016, 5158 de 2015, 3678 de 2014, 2003 de 2014, 4445 de 1996 y Decreto 1011 de 2006.

- *Medicamentos, dispositivos médicos e insumos*. Condiciones asociadas a los procesos de gestión de medicamentos e insumos.
- *Procesos prioritarios*. Condiciones asociadas a los procesos estandarizados para la prestación de servicios asistenciales.
- *Historia clínica y registros*. Condiciones técnicas para el manejo de historias clínicas y demás registros digitales.
- *Interdependencia*. Condiciones que garanticen la disponibilidad y uso oportuno de los servicios prestados por terceros.

Para ilustrar los aspectos que una IPS debe considerar para lograr la habilitación de un servicio de telemedicina, a continuación se presenta una selección de los criterios de habilitación relacionados específicamente con aspectos técnicos, de infraestructura y de procesos (es decir, las dimensiones a las que se podría contribuir desde las disciplinas trabajadas en los programas de la Escuela):

Prestador remitidor/institución remitora

Talento humano

1. El personal asistencial que presta directamente el servicio en la modalidad de telemedicina cuenta con certificado de formación en el manejo de la tecnología utilizada por el prestador.

Infraestructura

1. Conexión a internet (conectividad) con una velocidad y ancho de banda que permita garantizar durante la consulta o transmisión de información la prestación de servicios en esta modalidad **con integridad y continuidad** en forma sincrónica o asincrónica, según sea el caso.

Dotación

1. La institución garantiza el mantenimiento de los equipos de captura, transmisión y almacenamiento de datos e imágenes para garantizar la calidad de la información, el seguimiento de protocolos y la continuidad del servicio.
2. Los equipos de captura utilizados por la institución garantizan que la información obtenida es equiva-

lente a la original, de modo que al ser reproducida se garanticen su calidad y confiabilidad en condiciones comparables a la modalidad en atención convencional.

3. Si la institución realiza teleconsulta especializada de primera opinión que implique la necesidad del especialista de visualizar directamente el fondo del ojo, el oído o las membranas mucosas de los sistemas respiratorio, gastrointestinal, reproductor o urinario, cuenta con oftalmoscopio, otoscopio o los endoscopios que se requieran, según el caso, que permita la transmisión de la imagen.

Procesos prioritarios

1. El prestador cuenta con procedimientos documentados para la prestación de servicios en esta modalidad, de acuerdo con el modelo de atención donde se evidencien claramente los flujos, los responsables, los tiempos de respuesta, las características y formas del relacionamiento con el centro de referencia y con la(s) institución(es) responsable(s) de pago.
2. Los parámetros de digitalización y compresión seleccionados en los equipos, durante la captura de datos o imágenes, deben garantizar la resolución necesaria para permitir el diagnóstico.

Historia y registros

1. Los mecanismos de compresión utilizados por el prestador garantizan que la información recuperada corresponda al dato, imagen o señal original (compresión sin pérdidas).
2. Todos los eventos y transacciones que se realicen con ocasión de la prestación de servicios en la modalidad de telemedicina deben ser documentados y almacenados, y ser parte integral de la historia clínica.
3. El prestador deberá encriptar la información para su transmisión y crear mecanismos de acceso a ésta de acuerdo con políticas institucionales.

ATRIBUTOS DE CALIDAD DEL SOFTWARE

La normativa vigente del proceso de habilitación de telemedicina da algunas directrices sobre la calidad de los artefactos usados en los servicios de telemedicina (entre ellos el *software*). Sin embargo, por no poder incluir detalles técnicos, deja abiertas a la interpretación las consideraciones necesarias para prestar un servicio

adecuado. Teniendo en cuenta que las soluciones de *e-health* y *m-health* basadas en *software* pueden catalogarse en muchos casos como sistemas de misión crítica (ya que pueden estar asociados a riesgos que involucren pérdidas económicas o incluso de vidas humanas), éstas deben satisfacer requerimientos no funcionales propios de este tipo de sistemas, tales como seguridad, disponibilidad y escalabilidad, los cuales son definidos (de manera cuantificable) como atributos de calidad.

La siguiente es la revisión de un conjunto de atributos de calidad de *software* que, según la bibliografía existente, deben tener especial consideración para un proyecto de *software* orientado hacia la implementación de un modelo de *e-health* o *m-health*.

Interoperabilidad

Las múltiples iniciativas de soluciones de *e-health* planteadas desde entidades gubernamentales o prestadoras de servicios de salud públicas han llevado a la creación de un gran número de formatos y protocolos para el almacenamiento y transmisión de datos de naturaleza clínica. Esto ha limitado tanto las posibilidades de interoperabilidad entre dichas plataformas, como las de migrar información de una plataforma a otra. Un problema común en muchos países, y en Colombia en particular, se da con la historia clínica de los pacientes cuando éstos cambian de empresa prestadora de servicios de salud, la cual es prácticamente iniciada de ceros en los registros de la nueva empresa.

Como respuesta a lo anterior, varias organizaciones desarrolladoras de estándares han creado comités técnicos cuyos grupos de trabajo se enfocan en los aspectos antes mencionados. El CEN (European Committee for Standardization) fue el primero en hacer esto con el comité técnico 251 (CEN/TC 251)(CEN, 2008), cuyos estándares se enfocan en la representación de la información, estándares de mensajería, registros electrónicos de salud y algunas especificaciones para la interoperabilidad entre dispositivos médicos (en consonancia con el Mandato 40315 de la Comisión Europea de Interoperabilidad en Salud). Entre el año 1993 y la fecha de creación de este documento, el comité técnico ha publicado 105 estándares (CEN, 2008).

De la misma manera, a partir del año 1998, la Organización Internacional para la Estandarización (ISO, por su sigla en inglés) creó el comité técnico 215

(ISO, 2003) –*Health informatics*–, que además de desarrollar estándares en temas de *e-health* (168 a la fecha), ha avalado y renombrado (incluyendo el prefijo ISO) especificaciones de otras organizaciones –incluyendo el CEN–, tal como se observa en los últimos estándares registrados por el CEN (figura 1). Este comité es conformado por varios grupos de trabajo, cada uno enfocado en un aspecto diferente, de los cuales vale la pena señalar aquellos relacionados directamente con los retos y problemas antes mencionados:

- WG 2: Comunicaciones y mensajería.
- WG 3: Representación de conceptos de salud.
- WG 4: Privacidad y seguridad.
- WG 7: Dispositivos médicos.
- WG 8: Requerimientos de negocio para registros en salud electrónicos.

EN ISO 13940:2016	2016-01-27	Health informatics - System of concepts to support continuity of care (ISO 13940:2015)
EN ISO 16278:2016	2016-03-23	Health informatics - Categorical structure for terminological systems of human anatomy (ISO 16278:2016)
EN ISO 21549-5:2016	2016-04-27	Health informatics - Patient healthcard data - Part 5: Identification data (ISO 21549-5:2015)
EN ISO 17523:2016	2016-06-29	Health informatics - Requirements for electronic prescriptions (ISO 17523:2016)
EN ISO 11073-10419:2016	2016-06-29	Health informatics - Personal health device communication - Part 10419: Device specialization - Insulin pump (ISO/IEEE 11073-10419:2016)
CEN ISO/TS 20440:2016	2016-06-29	Health informatics - Identification of medicinal products - Implementation guide for ISO 11239 data elements and structures for the unique identification and exchange of regulated information on pharmaceutical dose forms, units of presentation, routes of administration and packaging
EN ISO 11073-10424:2016	2016-06-29	Health informatics - Personal health device communication - Part 10424: Device specialization - Sleep apnoea breathing therapy equipment (SABTE) (ISO/IEEE 11073-10424:2016)
EN ISO 11073-10425:2016	2016-06-29	Health informatics - Personal health device communication - Part 10425: Device specialization - Continuous glucose monitor (CGM) (ISO 11073-10425:2016)
CEN ISO/TS 17251:2016	2016-07-20	Health informatics - Business requirements for a syntax to exchange structured dose information for medicinal products (ISO/TS 17251:2016)
EN ISO 11073-20601:2016	2016-08-10	Health informatics - Personal health device communication - Part 20601: Application profile - Optimized exchange protocol (ISO/IEEE 11073-20601:2016, including Cor
EN ISO 27799:2016	2016-08-10	Health informatics - Information security management in health using ISO/IEC 27002 (ISO 27799:2016)
EN ISO 11073-10418:2014/AC:2016	2016-10-19	Health informatics - Personal health device communication - Part 10418: Device specialization - International Normalized Ratio (INR) monitor - Technical Corrigendum 1 (ISO/IEEE 11073-10418:2014/Cor 1:2016)
EN ISO 21549-7:2016	2016-12-14	Health informatics - Patient healthcard data - Part 7: Medication data (ISO 21549-7:2016)
EN ISO 25237:2017	2017-01-25	Health informatics - Pseudonymization (ISO 25237:2017)

Figura 1. Estándares del CEN desarrollados entre 2016 y 2017.

Aunque el número de estándares desarrollados es inmenso, los desarrollados por HL7 y DICOM –conjuntamente con CEN/TC251 e ISO/TC– han sido los de mayor penetración en la industria de la salud, convirtiéndose casi en estándares *de facto*. La organización HL7 (Health Level 7) se ha orientado al desarrollo de estándares para la representación de documentos clínicos y los mensajes asociados a éstos de modo que a partir de ellos se puedan plantear mecanismos de interoperabilidad entre aplicaciones o dispositivos médicos.

Dada la evolución que ha tenido el mundo del *software* en aspectos asociados a la interoperabilidad, esta organización ha planteado la especificación FHIR (*Fast Healthcare Interoperability Resources*), la cual plantea esquemas de representación de recursos compatibles con el estilo arquitectónico REST (*Representational State Transfer*), usado hoy casi universalmente para la publicación de servicios web.

Por otro lado, Dicom es un estándar para almacenar, manipular y transmitir imágenes diagnósticas (señales ECG, radiografías, etc.) entre diferentes equipos, considerando tanto el formato de los archivos como el protocolo para su transferencia. Este estándar ha sido asimilado casi universalmente por las empresas fabricantes de los sistemas computarizados de archivo digital de imágenes médicas (PACS), y está altamente integrado con los estándares de HL7.

Seguridad

La seguridad informática es un área amplia y compleja, en la que se libra una competencia continua entre quienes buscan proteger la privacidad y la integridad de la información en los sistemas informáticos, y quienes (por razones que van desde lo académico hasta lo criminal) buscan vulnerarla. Al considerar atributos de calidad asociados a seguridad para cualquier sistema basado en *software*, uno de los referentes más importantes es el material desarrollado por OWASP (*Open Web Application Security Project*)⁴, una organización abierta, sin ánimo de lucro, dedicada a empoderar a las organizaciones para que mantengan sus sistemas informáticos en niveles confiables de seguridad.

Sin embargo, en el contexto específico de la telemedicina, se han identificado aspectos particulares de seguridad prioritarios para plantear los atributos de calidad que éste requiera. En particular, existen estadísticas alarmantes (Goyal & Dragoni, 2016) de la cantidad de registros médicos que han sido comprometidos en los últimos años por el surgimiento y masificación del concepto de IoT (internet de las cosas). Actualmente cada dispositivo IoT para telemedicina, bien sea un sensor remoto de señales biomédicas vestible, o un monitor hospitalario conectado a la nube, representa un riesgo potencial que puede ser explotado (Suci et

4. <http://www.owasp.org>.

al., 2015), muchas veces en perjuicio de los pacientes, a través de técnicas de suplantación de identidad como la clonación de *tags* RFID⁵ y el *Spoofing*⁶, o del bloqueo o interferencia intencional a las comunicaciones entre dispositivos (*RF Jamming*).

Dado lo anterior, de la bibliografía reciente se puede recoger el siguiente conjunto de recomendaciones –complementarias a las documentadas por Owasp (Owasp, 2010; Wichers, 2013)– para ser consideradas dentro de los atributos de calidad relacionados con seguridad:

Autenticación de dispositivos y cifrado a través de certificados digitales

El concepto de PKI (*Public Key Infrastructure*), o de criptografía asimétrica con llaves públicas y privadas, por décadas ha sido el mecanismo *de facto* para la realización de comunicaciones cifradas en internet, y fue el precursor del concepto de firma digital. Desde hace años son las firmas digitales, junto con las entidades certificadoras que avalan su autenticidad, las que han permitido que en una operación en la web se pueda identificar si el sitio en el que se está haciendo la transacción es legítimo o no.

En el contexto de IoT para telemedicina, el concepto de firma digital se ha vuelto muy relevante, pero con un modelo de aplicación diferente. Dado que en este escenario los clientes no son seres humanos, capaces de proveer credenciales de autenticación de forma relativamente segura, sino máquinas cuya identidad es fácilmente suplantable, se requiere que cada dispositivo cuente con su propia firma digital, igualmente avalada por una entidad certificadora.

Esto implica un reto importante, ya que del proceso tradicional de generación de certificados digitales, que requería incluso de intervención humana (para el envío y verificación de documentos legales), se necesita ahora un proceso que permita generar y habilitar muy rápidamente los certificados requeridos por el gran número

de dispositivos que pueda llegar a tener una solución de telemedicina (Doukas et al., 2012).

Como consecuencia de esta tendencia, entidades certificadoras como DigiCert⁷ o GlobalSign⁸ han empezado a ofrecer el servicio de generación de certificados digitales para dispositivos IoT, cuya principal característica es la velocidad y automatización del proceso (se promete la capacidad de generar miles de certificados por segundo).

Identificación de dispositivos mediante PUF

Como alternativa a los certificados digitales para validar la identidad de un dispositivo IoT, otra tendencia son los PUF (*Public Physical Unclonable Functions*). Los PUF son entidades físicas (circuitos electrónicos, materiales reactivos, etc.) encapsulados en estructuras físicas que son fáciles de fabricar pero imposibles de clonar (Potkonjak & Goudar, 2014). A diferencia de los certificados digitales, con un PUF la autenticación se logra mediante un mecanismo de reto-respuesta, donde la respuesta, dada una misma entrada, es repetible pero imposible de extrapolar o clonar bien sea como una función o como entidad física.

Recientemente este concepto ha tenido un nuevo hito, con el inicio de la producción en masa de soluciones integradas para IoT, como es el caso del microcontrolador Exynos i T200 de Samsung⁹, que integra, además de capacidades de procesamiento y comunicación inalámbrica, mecanismos de seguridad basados en PUF.

Escalabilidad y disponibilidad

Las soluciones de telemedicina, como se mencionaba anteriormente, en ocasiones pueden considerarse como sistemas de misión crítica al tener el riesgo de afectar la salud, o incluso poner en peligro la misma vida de seres humanos. En estos casos, el atributo de calidad de disponibilidad es muy relevante, pues –en concordancia

5. Etiquetas -normalmente autoadhesivas- con circuitos que permiten la identificación de productos de manera inalámbrica.
6. Técnicas para suplantar la identidad de una entidad del sistema, a través de la falsificación de los datos en una comunicación.

7. <https://www.digicert.com/internet-of-things/>.

8. <https://www.globalsign.com/en/internet-of-things/>.

9. <https://news.samsung.com/global/samsung-begins-mass-production-of-first-exynos-branded-iot-solution-the-exynos-i-t200>.

con el tipo de aplicación— define el porcentaje de tiempo que el sistema estará en capacidad de cumplir con su función. Cuando se habla de alta disponibilidad, que podría servir, por ejemplo, para un servicio de monitoreo continuo de señales, generalmente se emplean como referencia valores muy cercanos al 100 % (por ejemplo, 99,9 %, que corresponde a una inactividad de 8,76 horas/año). Esta alta disponibilidad, por lo general, se ve reflejada en la provisión de redundancia a diferentes niveles (red, servicios y almacenamiento), de modo que si algún elemento falla, haya otro disponible listo para tomar su lugar.

La escalabilidad como atributo de calidad, por otro lado, describe la habilidad del sistema de adaptarse al aumento o disminución en la carga de trabajo. La escalabilidad es complementaria del atributo de disponibilidad, pues en la medida en que no logra cumplir con el primero puede llevar a una interrupción del servicio a algunos clientes cuando la carga (por ejemplo, el número de pacientes que usa el servicio concurrentemente) sea muy alta.

Aunque las estrategias para satisfacer requerimientos no funcionales planteados en términos de estos dos atributos de calidad son muy diversas, para el caso concreto de soluciones de telemedicina que requieren procesamiento de señales en tiempo real vale la pena considerar tecnologías cuya naturaleza sea distribuida. En la bibliografía se encuentran reportes de buenos resultados con arquitecturas no muy convencionales, como las basadas en el modelo de Actores (Corredor & Cadavid, 2015; Chica, Felipe & Rivera, 2017), o las plataformas de computación distribuida usadas típicamente en aplicaciones de IoT y BigData (Ko et al., 2015).

CONCLUSIONES

De acuerdo con el panorama actual de la telemedicina, dada por la legislación colombiana, y de los avances en el área logrados en el país, vale la pena destacar dos puntos en cuanto a los retos, oportunidades y limitaciones para la investigación aplicada desde la ingeniería hacia el sector de la salud:

- Los criterios de habilitación que ha venido definiendo y ajustando el Ministerio de Salud muestran una oportunidad de acción importante de instituciones de educación superior de carácter tecnológico,

como la Escuela. Aún hay mucho trabajo por delante para lograr acercar a los especialistas médicos a las regiones más apartadas del país, cumpliendo con condiciones como las planteadas en cuanto a integridad y seguridad de los datos involucrados en una solución de telemedicina.

A continuación se muestran diferentes elementos de los criterios de habilitación antes mencionados (sección 3.1) de los que se podrían desprender futuros proyectos de investigación (en este caso, sólo alrededor de temas trabajados en programas como el de Ingeniería de Sistemas de la Escuela).

Tabla 1
Criterios de habilitación y su relación con algunos de los conceptos trabajados en el programa de Ingeniería de Sistemas de la Escuela

Infraestructura tecnológica	Atributos de calidad de software	Procesos de negocio
IN.1.	DO.2.	TH.1.
HR.3.	PP.2.	DO.1.
	HR.1.	PP.1.
	HR.2.	
	HR.3.	

IN: Infraestructura, TH: Talento Humano, DO: Dotación, PP: Procesos Prioritarios, HR: Historia y Riesgos.

- En la investigación presentada por Yunda et al. (2015), uno de los trabajos más recientes que revisan las estadísticas de los servicios de telemedicina habilitados, se indica que en para la época (2013) ya había más de 600 servicios de telemedicina habilitados en el país, lo que significa un desarrollo notable de este tipo de aplicaciones. Sin embargo, un elemento que limita enormemente las posibilidades de incorporación de tecnologías de telemedicina desarrolladas en la academia al sector de la salud es la norma dada en la Resolución 1448 de 2006, según la cual sólo se pueden habilitar servicios de telemedicina prestados dentro de una IPS, a cargo de un profesional de la salud. Lo anterior significa que el desarrollo de soluciones de *hardware* y *software* portátiles que pudieran apoyar el proceso de seguimiento a pacientes mediante la transmisión inalámbrica, por ejemplo, de señales médicas, no podría, por ahora, terminar con una incorporación a un servicio de

una IPS. Por lo tanto, es necesario orientar este tipo de investigaciones a una aplicación dentro de IPS remisoras, o eventualmente a aplicaciones en ambulancias, dado que son legalmente consideradas como entidades prestadoras de servicios de salud.

Por otro lado, la convergencia del concepto de telemedicina y del Internet de las cosas (IoT), junto con los nuevos retos que este último presenta, ha abierto todo un nuevo panorama de retos para la investigación en diferentes áreas. Se requiere el desarrollo de dispositivos médicos electrónicos que no sólo sean confiables y precisos sino seguros a pequeña y gran escala.

REFERENCIAS

- Ángel, D. et al. (2005). "Cutaneous Tuberculosis Diagnosis in an Inhospitable Amazonian Region by Means of Telemedicine and Molecular Biology." *Journal of the American Academy of Dermatology* 52 (5). Elsevier:S65–S68.
- Ayala, J. et al. (2014). "La salud en Colombia: más cobertura pero menos acceso". Banco de la República-Economía Regional.
- Bashur, R.L., Armstrong, P.A. & Youssef, Z.I. (1975). "Telemedicine: Explorations in the Use of Telecommunications in Health Care; Charles c Thomas Publisher Limited: Springfield." USA.
- Castaño, G. et al. (2009). "Movimientos oculares a distancia utilizando cámaras de teléfonos celulares". *SCO* 42 (3)259.
- CEN, TC. 2008. "251 (European Standardization of Health Informatics) Env 13606, Electronic Health Record Communication." Chica D., L.F. & White Rivera, C.A. (2017). "Plataforma escalable para el procesamiento de señales basada en un modelo de actores y canales reactivos." En http://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/510/2/PGR_Paper.pdf.
- Corredor, M.A. & Cadavid, H.F. (2015). "M-Health System Backend Supported by an Actors Model." In *Computing Colombian Conference (10CCC), 2015 10th*, 150–56. IEEE.
- Doukas, C. et al. (2012). "Enabling Data Protection Through Pki Encryption in IoT M-Health Devices." In *Bioinformatics & Bioengineering (Bibe), 2012 IEEE 12th International Conference on*, 25–29. IEEE.
- Elizalde, L. et al. (2016). "Concepto y aplicación de la teleopometría." *Ciencia & Tecnología Para La Salud Visual Y Ocular* 14 (2):25–41.
- Gardner, R.M., Bennet, D. & Vorce, R. (1974). "Eight Channel Data Set for Clinical EEG Transmission over Dial-up Telephone Network." *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 21 (3), 246–49.
- Goyal, R. & Dragoni, N. (2016). "Why Hackers Love eHealth Applications." In *Proceedings of the 3rd Eai International Conference on IoT Technologies for Healthcare (HealthyIoT), 2016, Lnicst*.
- Cadavid, H. & Chaparro, J. (2014). "Plataforma mhealth para investigación y desarrollo de sistemas automáticos de diagnóstico en enfermedades cardiovasculares." In *Proceedings Congreso Internacional en Ingeniería Clínica y Biomédica, Bogotá, Colombia, May 8-9, 2014*.
- ISO, TC. 2003. "215. International Organization for Standardization, Health Informatics, ISO TS 18308.
- Ko, Y.-J. et al. (2015). "A Patient-Centered Medical Environment with Wearable Sensors and Cloud Monitoring." In *Internet of Things (Wf-IoT), 2015 IEEE 2nd World Forum on*, 628–33. IEEE.
- Lancheros-Cuesta, D.J. et al. (2014). "Telemedicine Platform for Monitoring Diabetic Retinopathy." In *Information Systems and Technologies (Cisti), 2014 9th Iberian Conference on*, 1–6. IEEE.
- López, C. et al. (2014). "Sexual and Reproductive Health for Young Adults in Colombia: Teleconsultation Using Mobile Devices." *JMIR mHealth and uHealth* 2 (3). JMIR Publications Inc., Toronto, Canada:e38.
- Mehta, S. et al. (2016). "Global Challenges and Solutions: Role of Telemedicine in St-Elevation Myocardial Infarction Interventions." *Interventional Cardiology Clinics* 5 (4). Elsevier, 569–81.
- Mehta, S. et al. (2016). "Latin America Telemedicine Infarct Network (Latin)-Results of a Pilot Phase Including Mortality, Cost-Benefit, and Logistics." In *European Heart Journal*, 37:1065–5. Oxford Univ Press Great Clarendon St, Oxford OX2 6DP, England.
- Osorio, C.J. et al. (n.d.). "Telemedicina Aplicada a La Valoración Del Riesgo Cardiovascular: Experiencia en el Hospital María Angelines de Puerto Leguizamo, Putumayo. 2013." *Ciencia E Innovación En Salud* 1 (2), 95–100.
- Owasp, Top. 2010. "Top 10-2013: The Ten Most Critical Web Application Security Risks." *The Open Web Application Security*.
- Potkonjak, M. & Goudar, V. (2014). "Public Physical Unclonable Functions." *Proceedings of the IEEE* 102 (8). IEEE:1142–56.
- Ray, C. et al. (1965). "Experiences with Telemetry of Biomedical Data by Telephone, Cable and Satellite: Domestic and International." *Medical Electronics and Biological Engineering* 3 (2):169–77.
- Rey-Moreno, C. et al. (2010). "A Systematic Review of Telemedicine Projects in Colombia." *Journal of Telemedicine and Telecare* 16 (3). SAGE Publications Sage UK: London, England:114–19.
- Romero, E. (2014). "Modelo para telemedicina, educación virtual y administración de imágenes de la Universidad Nacional de Colombia." *Revista Medicina* 32 (1), 8–14.
- Sachpazidis, I. et al. (2006). "A Medical Network for Teleconsultations in Brazil and Colombia." In *Proceedings of the Second Iasted International Conference on Telehealth. Anaheim, Calgary. Zurich: IASTED/Acta Press*, 16–21.
- Suciu, G. et al. (2015). "Big Data, Internet of Things and Cloud Convergence—an Architecture for Secure E-Health Applications." *Journal of Medical Systems* 39 (11). Springer:141.
- Valenzuela, J. et al. (2007). "Web-Based Asynchronous Teleconsulting for Consumers in Colombia: A Case Study." *Journal of Medical Internet Research* 9 (4). JMIR Publications Inc., Toronto, Canada:e33.
- Wichers, D. (2013). "Owasp Top-10 2013." *OWASP Foundation, February*.
- Yunda Perlaza, L. et al. (2015). "Telesalud E Informática Médica." Zundel, K.M. (1996). "Telemedicine: History, Applications, and Impact on Librarianship." *Bulletin of the Medical Library Association* 84 (1). Medical Library Association:71.

REVISTA 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 literatura 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