

Lineamientos para la recuperación ambiental de cauces urbanos en las zonas de montaña.

Una aproximación desde la academia a la evaluación del estado de la superficie de vías en la red terciaria.

Diseño de tratamiento de un efluente proveniente del beneficio de la industria avícola.

Conceptos básicos y principales metodologías del diseño estructural para condiciones de incendio según normas internacionales, aplicadas al Reglamento Colombiano de Construcciones Sismorresistentes (NSR-10).

Difusión del conocimiento aplicativo y tecnológico para el desarrollo de métodos analíticos bioquímicos, como la extracción y purificación de proteínas.

Factibilidad de una instalación solar fotovoltaica residencial, según la Ley 1715 y la Resolución CREG 121 del 2017.

Metodología para la evaluación del riesgo por flujos de lodos y avalanchas en Colombia.

Modelación numérica del comportamiento de la represa del proyecto hidroeléctrico El Guavio.

Propuesta de adaptación del documento ASCE/SEI31-03 "Evaluación sísmica de edificaciones existentes".

Julio - septiembre de 2018

ISSN 0121-5132

P.V.P. Colombia \$12.000.00

03



Tarifa postal reducida N.º 2017-107 4-72

Servicios Postales Nacionales S.A.

Vence 31 de diciembre de 2018 - ISSN 0121-5132

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) JOHN ÉDGAR HERRERA DÍAZ (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

Salud moral

Jairo Alberto Romero Rojas

7-15

Lineamientos para la recuperación ambiental de cauces urbanos en las zonas de montaña

Alberto Polo Cueto - Rubén Darío Ochoa Arbeláez

En muchas de las poblaciones colombianas es posible observar el deterioro ambiental de los cuerpos hídricos, la invasión de las rondas hidráulicas y los cauces que ocasionan riesgos a los habitantes de los sectores más vulnerables de la población.

17-25

Una aproximación desde la academia a la evaluación del estado de la superficie de vías en la red terciaria

Leidy Paola Benítez Robayo - Sandra Ximena Campagnoli Martínez

El Semillero de Investigación en Pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito hizo el trabajo que se presenta en este artículo, en el que, aplicando el método Viziret, evaluó el estado de las superficies de vías, con el fin de proponer soluciones para la intervención, en tramos de la red vial terciaria de los departamentos de Santander y Boyacá que pasan por los municipios de Jesús María, La Belleza, Florián y Saboyá.

27-33

Diseño de tratamiento de un efluente proveniente del beneficio de la industria avícola

Rodrigo Cáceres Escorcia - Jairo Alberto Romero Rojas

En este artículo se propone un sistema de tratamiento y se expone su diseño conceptual para la industria de beneficio de aves de corral, que les permita cumplir con la Resolución 631 de 2015, así como disminuir el caudal de vertimiento, implementando prácticas de recirculación, reúso y reducción de consumo del agua utilizada en el proceso productivo.

35-47

Conceptos básicos y principales metodologías del diseño estructural para condiciones de incendio según normas internacionales, aplicadas al Reglamento Colombiano de Construcciones Sismorresistentes (NSR10)

Fabián Torres Zafra - Nancy Torres Castellanos

En el presente artículo se pretende compilar los principales conceptos y premisas del diseño estructural para condiciones de incendio en Colombia (plasmados en la NSR10), con base en las normas internacionales, y se definen las metodologías de análisis del diseño estructural más usadas actualmente.

49-52

Difusión del conocimiento aplicativo y tecnológico para el desarrollo de métodos analíticos bioquímicos, como la extracción y purificación de proteínas

Diana Alexandra Ospina Riaño

La proposición de nuevos tratamientos, alternativas diagnósticas y herramientas clínicas de última generación se ha soportado en rigurosas técnicas bioquímicas. Una

de estas técnicas es la extracción y purificación de proteínas, la cual ha servido para elucidar múltiples mecanismos biológicos y postular diversas conclusiones de interés médico y científico.

53-63

Factibilidad de una instalación solar fotovoltaica residencial, según la Ley 1715 y la Resolución CREG 121 del 2017

Natalia Pascuas Araújo - Andrés Fernando Salvador Perilla - Edwin Jobjan Quiroga Guerrero - Javier Andrés Ruiz Garzón - Daniel José González Tristáncho

Este artículo trata sobre un caso de estudio presentado para la implementación de un sistema fotovoltaico de autogeneración a pequeña escala en una vivienda ubicada en la ciudad de Bogotá. Para determinar el tamaño óptimo de la instalación se utilizó como criterio el mayor rendimiento financiero, según lo establecido en la Ley 1715 y la Resolución 121 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG).

65-76

Metodología para la evaluación del riesgo por flujos de lodos y avalanchas en Colombia

Jorge Eduardo Uparela Olivera - Manuel García López

A lo largo del presente artículo se establece una metodología para la evaluación del riesgo por flujos de lodos y avalanchas en Colombia mediante el estudio de algunas metodologías existentes a escalas nacional e internacional, la cual se aplicó al caso de estudio de la cuenca de la quebrada La Chapa, un sitio históricamente vulnerable a la ocurrencia de flujos de lodo.

77-86

Modelación numérica del comportamiento de la represa del proyecto hidroeléctrico El Guavio

Carlos Fernando Peña Pinto - Ricardo Salazar Ferro

En el presente artículo se registran los resultados de la modelación numérica que se realizó del comportamiento, relativo a esfuerzos efectivos, presiones de poros y deformaciones, de la represa Alberto Lleras, dentro del proyecto hidroeléctrico El Guavio. Esta represa es del tipo ECRD (*Earth Core Rockfill Dam*), tiene una altura de 247 m y posee registros de instrumentación de más de 20 años.

87-94

Propuesta de adaptación del documento ASCE/SEI31-03, “Evaluación sísmica de edificaciones existentes”

Paulo Marcelo López Palomino - Pedro Nel Quiroga - Nancy Torres Castellanos

Con la premisa de que es importante que los ingenieros colombianos cuenten con una metodología alterna para la evaluación sísmica, como la metodología ASCE/SEI 31-03, en este artículo se presentan las diferencias significativas entre esta metodología y la del NSR-10.

95 / ALCANCE Y POLÍTICAS

Editorial

Salud moral

JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

jairo.romero@escuelaing.edu.co

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define salud como el bienestar físico, mental y moral, y no sólo como ausencia de enfermedad.

Colombia es una nación enferma porque carece de salud moral. La salud moral es una limitante del desarrollo humano y social en el país, pues sin ella seremos un pueblo deprimido y avergonzado por un comportamiento deshonesto que, lamentablemente, se ha generalizado. Un país sin calidad moral no recibe la confianza que se necesita para llevar a cabo los programas requeridos para su desarrollo, pero peor aún, no tiene autoridad para imponer esta clase de calidad a los ciudadanos.

El ejemplo de quienes son modelos de calidad moral es indispensable para que recuperemos y mantengamos siempre nuestra salud moral, porque como dijo Julio César: “La mujer del César no sólo debe ser honesta, también debe parecerlo”.

La sociedad no puede permitir asesinos ni ladrones en el Congreso, ni en las asambleas, ni en los concejos municipales, ni en juntas directivas de empresas, ni en ningún cargo ejecutivo, ni mucho menos como profesores en universidades o colegios.

Enfrentar la permisiva conducta de tolerar la presencia de hampones en los cuerpos directivos y en las acti-

vidades de la vida nacional es una necesidad imperiosa para recuperar el orgullo de ser ciudadano colombiano.

Ser honrado no es sólo una distinción de ser católico, judío, musulmán, protestante o de cualquier fe religiosa, sino también una concepción moral necesaria para satisfacer la ventura de ser un hombre de bien.

Colombia nunca estará segura ni en paz mientras aplique justicia a los ciudadanos del común y permita que los delitos cometidos por antisociales y ladrones queden impunes. A los criminales hay que tratarlos siempre como lo que son: criminales.

Tenemos demasiadas leyes, fruto de la exageración por satisfacer la sed de justicia y de moral, pero lo que requerimos son hombres buenos. Los derechos no son gratuitos, son el resultado del cumplimiento de nuestras obligaciones como ciudadanos; hemos olvidado la verdadera razón de existir: ser justos y cumplidores de nuestros deberes para garantizar los derechos de los demás.

Sin moral, el hombre no puede ser feliz porque no está sano; por tal razón, nada mejor para terminar que esta frase del gran Aristóteles: “Los que obran bien son los únicos que pueden aspirar en la vida a la felicidad”.

Lineamientos para la recuperación ambiental de cauces urbanos en las zonas de montaña

Guidelines for environmental recovery of urban riverbeds in mountain zones

ALBERTO POLO CUETO¹ - RUBÉN DARÍO OCHOA ARBELÁEZ²

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

2. Magíster en Recursos Ambientales.

alberto.polo@mail.escuelaing.edu.co - ruben.ochoa@escuelaing.edu.co

Recibido: 02/02/2018 Aceptado: 01/03/2018

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

<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En muchas de las poblaciones colombianas es posible observar el deterioro ambiental de los cuerpos hídricos, la invasión de las rondas hidráulicas y los cauces que ocasionan riesgos a los habitantes de los sectores más vulnerables de la población.

En la actualidad, la recuperación del medio natural es un objetivo de las autoridades encargadas de la planeación de las ciudades. Se requiere generar espacios de vida para mitigar los efectos ambientales y propiciar el desarrollo sostenible en los sectores vulnerables de las ciudades (Pomca, Decreto 1640 de 2012, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible). De este modo, es necesario plantear lineamientos para el análisis de la situación y el manejo del problema ambiental, con el propósito de establecer acciones que recuperen el paisaje, que sean sostenibles y se adecuen a la realidad de las ciudades.

Desde este punto de vista y teniendo en cuenta los problemas que se presentan en la periferia de las ciudades se plantean en forma general los aspectos que pueden considerarse en la caracterización de los cauces urbanos en la zona de montaña y una metodología que puede implementarse en procesos de recuperación de cauces urbanos.

Palabras claves: recuperación ambiental, rehabilitación, recuperación.

Abstract

In many Colombian settlements, it is possible to observe an environmental decay in water bodies, invasion of riparian corridors and riverbeds that create risks for the most vulnerable inhabitants of the area.

Currently, environmental recovery is a goal of all urban planning authorities. It is necessary to generate life areas to ameliorate the environmental effects and foster sustainable development in vulnerable sectors of cities (Pomca, Decreto 1640 de 2012, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible). Therefore, it is needed to establish guidelines to analyze situations and deal with environmental problems, in order to set out actions that rebuild landscapes, in a sustainable manner and coherent with the reality of cities.

Considering the above and all problems present in the outskirts of cities, an outline of the aspects to be considered for characterizing urban riverbeds in mountain zones is presented as well as a methodology that can be implemented in the process of recovering urban riverbeds.

Keywords: environmental recovery; rehabilitation; recovery.

INTRODUCCIÓN

Desde hace siglos, las orillas de los ríos han sido lugares atractivos para el desarrollo urbano.

El conflicto producido por la urbanización desordenada en las zonas altas de las cuencas ha de gestionarse, con el fin de evitar daños a la vida humana y a la propiedad, pero se requiere una metodología de intervención, con actividades orientadoras a los profesionales interesados en la recuperación ambiental de quebradas intervenidas que atraviesan poblaciones en las zonas de montaña. Ese fue el motivo para desarrollar un trabajo de grado en la maestría con la Escuela Colombiana de Ingeniería, cuyos resultados se socializan en el presente artículo.

METODOLOGÍA Y LINEAMIENTOS PARA LA RECUPERACIÓN DE CAUCES EN ZONAS DE MONTAÑA

Para lograr los objetivos propuestos hay que tener claro que la recuperación de cauces no es una acción concreta, sino un proceso que comprende múltiples iteraciones que le deben permitir al ingeniero establecer los mecanismos de optimización y comprobación de las soluciones que proyecte; eso supone la dificultad que presentan estos procesos, pues deben evaluarse constantemente durante la implementación de las acciones propuestas, debido a la dinámica fluvial de los cauces.

El proceso metodológico que permitirá la identificación del problema, su evaluación, el planteamiento de las acciones de recuperación y su monitoreo, se resume más adelante (figura 1).

Los aspectos fundamentales propuestos en la metodología para la recuperación de cauces urbanos en las cuencas altas se describen a continuación:

Paso 1: Identificación del problema del cauce. Antes de un proceso de recuperación de cauces y cuencas intervenidas, es necesario hacer un diagnóstico en el que se establezca una línea base con el objetivo de determinar hasta dónde es posible llegar en el proceso de recuperación del cauce.

El grado de alteración del cauce determinará las intervenciones requeridas para alcanzar el grado de recuperación que se desee. Esto plantea la necesidad de fijar unas metas y objetivos en la recuperación, las cuales se deberán sopesar para establecer la viabilidad de lograr tales objetivos.

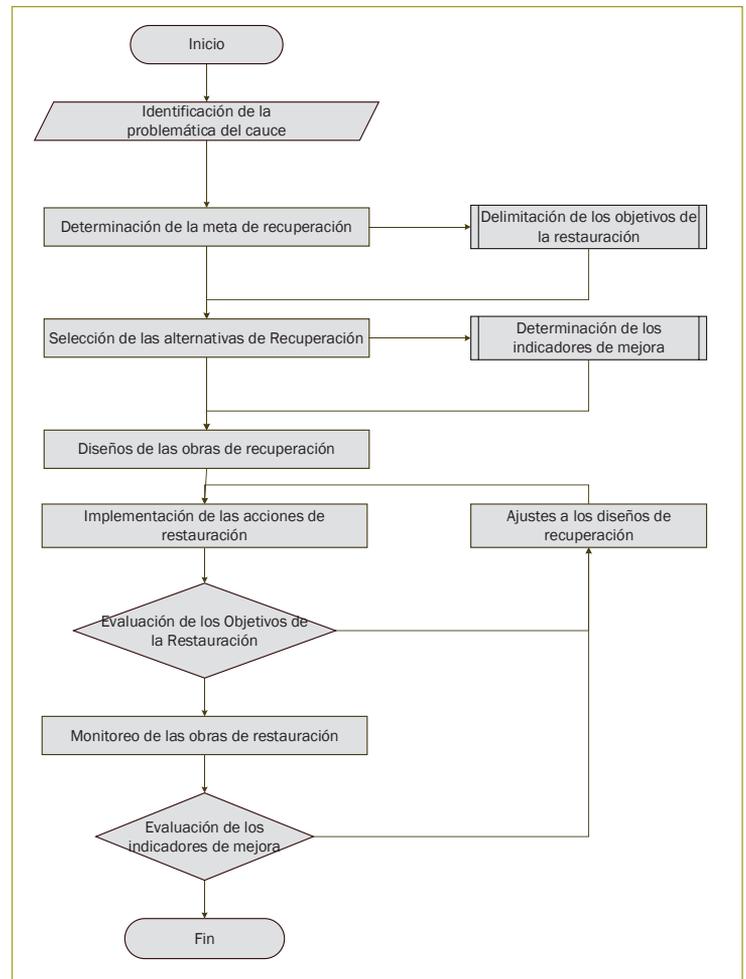


Figura 1. Diagrama de flujo. Proceso de recuperación de cauces en zonas de montaña.

En el diagnóstico preliminar se deberán determinar las condiciones actuales del cauce, determinando mediante recorridos previos aspectos generales que pueden ayudar a definir el grado de intervención antrópica y el establecimiento de una condición restaurada posible.

Desde este punto de vista en el establecimiento de la línea base (diagnóstico) se deberán contemplar los siguientes análisis:

Análisis hidrológico. Se efectúa con el propósito de fijar los caudales de flujo y la caracterización de la respuesta hidrológica de la cuenca. Dentro de este análisis debe tenerse en cuenta que es necesario implementar un modelo de lluvia escurrentía para caudales máximos (puede aplicarse el método racional para cuencas pequeñas menores de 80 ha), determinar el caudal base, aplicar modelos para definir caudales mínimos (caudal

ecológico) y calcular los caudales de importancia morfológica (caudal generador o de *bank-full*).

Análisis hidráulico. Su propósito es determinar los caudales de flujo y la delimitación de las zonas inundables del cauce. Para ello puede utilizarse un modelo unidimensional o bidimensional de flujo (por ejemplo, el HEC-RAS, para lo cual se deberán verificar resultados con las limitaciones del modelo). Para el análisis hidráulico, hay que determinar los coeficientes de resistencia al flujo mediante verificaciones de campo (aforos en secciones de flujo para calibrar el modelo).

Análisis geomorfológico. Se debe hacer para definir los aspectos que afectan la morfología del cauce. Hay que recopilar la información aerofotogramétrica existente con el propósito de realizar un análisis multitemporal de la morfología del cauce, mediante visitas de campo; hacer el reconocimiento de las unidades litológicas y geomorfológicas, y describir en forma detallada y sistemática afloramientos, medición y análisis de estructuras geológicas; se deberá hacer el levantamiento del perfil de meteorización y los depósitos de vertiente o aluviales involucrados, así como establecer si los cambios geomorfológicos dentro del cauce están asociados a procesos de degradación lateral, degradación vertical, y variaciones de las márgenes y fondo del cauce; se efectuará la identificación de procesos morfodinámicos activos, inactivos y potenciales, tales como deslizamientos, caídas de roca, inundaciones, avenidas torrenciales y, en general, toda clase de procesos de origen geológico o geomorfológico que puedan afectar la zona de interés y las obras de estabilización; habrá que caracterizar las obras de arte y estructuras que se encuentren en el área de estudio del cauce, tales como puentes, pontones, contenciones y demás que ameriten un análisis de estabilidad. También deberán caracterizarse el suelo del canal (erosionable, cohesivo, no cohesivo), los perfiles de las riberas y el material de las bancas; finalmente, deben determinarse las condiciones de inestabilidad de las bancas y fijar los controles geológicos y de las estructuras de control (alcantarillas, pasos bajo agua, etc.).

Análisis desde los puntos de vista biológico, ambiental y social. Desde el punto de vista biológico se desea la recuperación de hábitats para los animales, el restablecimiento de corredores de flora y fauna, la recu-

peración de las interacciones lógicas y el mejoramiento estético y visual del entorno. De esta forma, se hace necesario identificar los eventos que hayan generado impactos negativos en los corredores ecológicos de ronda, relacionados con eventos de inundación o de remoción en masa; realizar la revisión detallada de la bibliografía técnica y científica existente sobre la vegetación (vegetación riparia, vegetación acuática, especies invasoras, plantaciones, jardinería); elaborar el diagnóstico ambiental de campo, para definir la tipología y caracterización de los tipos de vegetación y de flora más representativa; generar el mapa de coberturas vegetales a escala detallada, así como hacer el inventario forestal de la ronda hidráulica y la zonificación ambiental del cauce.

Caracterización socioeconómica. Permitirá determinar las expectativas comunitarias y lograr, mediante talleres de socialización, la integración de la comunidad al proyecto de recuperación.

Más adelante se muestra la interrelación de las actividades requeridas en el proceso de identificación del problema del cauce (figura 2).

Paso 2: Determinación de las metas y objetivos de la recuperación. La definición de la realidad posible dentro del proceso de recuperación dependerá de condicionantes técnicos, sociales y económicos.

Desde el punto de vista técnico, deberán tenerse en cuenta los aspectos que pueden modificarse para recuperar la calidad de las aguas en el cauce o minimizar el impacto de las aguas de escorrentía provenientes de las zonas urbanas, o identificar situaciones de inestabilidad geotécnica o morfológica que se puedan mitigar o no.

Desde el punto de vista social, cabe anotar que en un proceso de recuperación es incluyente con la comunidad, ya que ésta debe ser partícipe activo del proceso, y se requiere que se apropie del espacio y valore su función ambiental. Actividades que generan problemas en el cauce, como el pastoreo, cultivos en la zona de ronda, o asentamientos de población indigente en las orillas del cauce, se deben eliminar si se espera conseguir un proceso sostenible en el tiempo.

En lo económico, se destaca que las metas y objetivos de una recuperación se definen de acuerdo con los recursos requeridos y la realidad económica de las administraciones municipales, que deberán establecer y priorizar los rubros de inversión en recuperación del

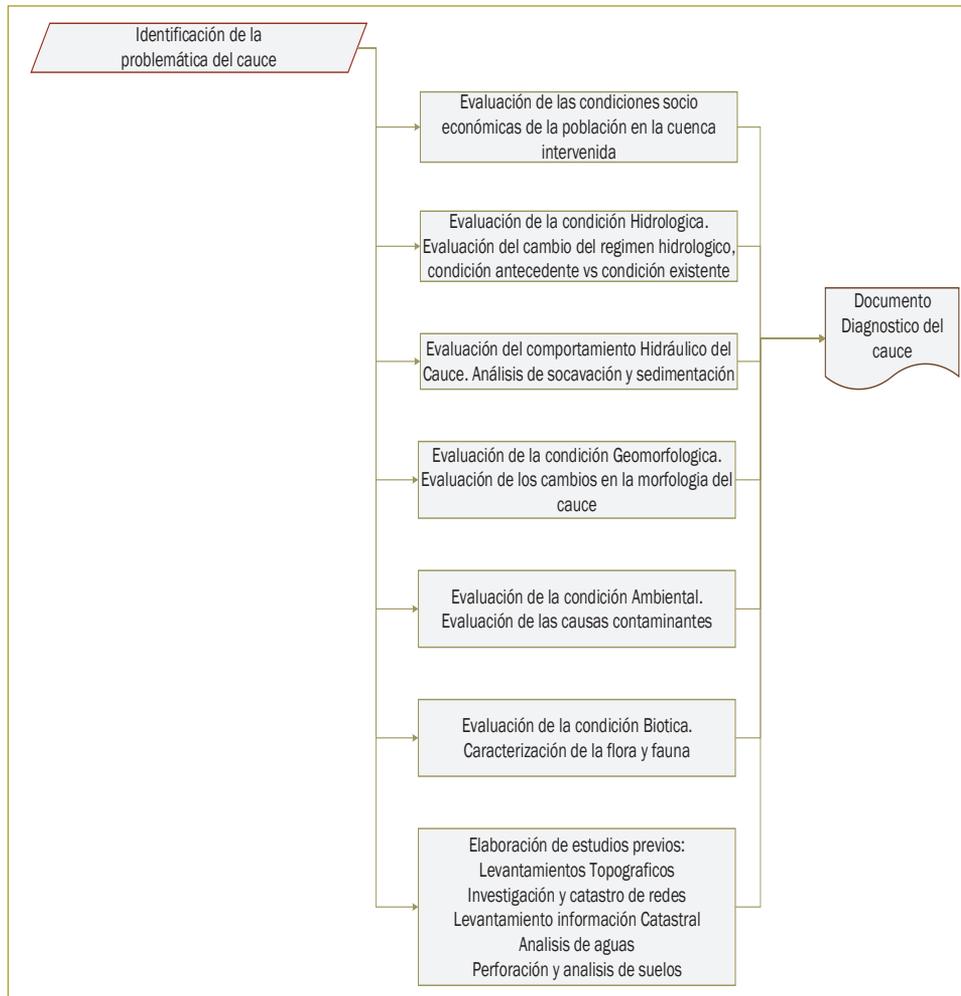


Figura 2. Diagrama de flujo. Paso 1: Identificación del problema del cauce.

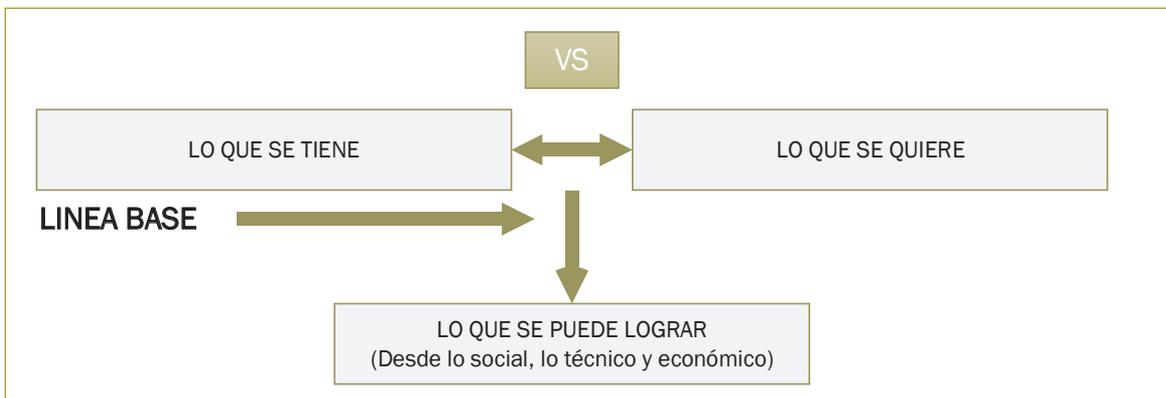


Figura 3. Determinación de los objetivos de la recuperación del cauce.

espacio público y obras de infraestructura necesarias, según la condición referente deseada.

Un proceso de recuperación dependerá, entonces, de la perspectiva real evaluada; es decir, de las conclusiones a las que se llegó en el análisis de la línea base, en la cual se definió exactamente hasta dónde se puede llegar dentro de la recuperación que se pretende realizar.

Así el alcance de un proceso de recuperación dependerá, entonces, de poder delimitar aquellos aspectos que representen la realidad del proceso de recuperación; es posible que un proceso no se pueda ejecutar porque no se cuenta con los recursos suficientes para realizar las acciones de recuperación o que la comunidad no presente ningún interés en el mejoramiento de las condiciones de su entorno.

Sin embargo, cabe anotar que una vez que se plantea un proceso de recuperación debe considerarse, en primer término, que un proceso de recuperación requiere la participación de la comunidad aledaña localizada en la

ronda del cauce y que es importante la apropiación del espacio por parte de la comunidad, para que ella misma sea garante de la sostenibilidad de las posibles intervenciones que se hagan en el cauce; en segundo lugar, que un proceso de recuperación comprende una serie de intervenciones continuas y sostenidas en el tiempo y que la inversión de recursos se hará en etapas programadas a corto, mediano y largo plazo. Las inversiones a corto plazo se encaminarán a solucionar problemas que generen peligro a la integridad de la comunidad (por ejemplo, en la recuperación de la ronda hidráulica mediante la compra de predios en la zona de ronda para eliminar asentamientos en las zonas inundables del cauce o la eliminación de vertimientos, y su reubicación); las inversiones a mediano plazo estarán representadas en la recuperación del cordón ripario mediante obras de protección del cauce y acciones de revegetalización, y capacitación a la comunidad. Las inversiones a largo plazo tienen que ver con el ordenamiento urbano y

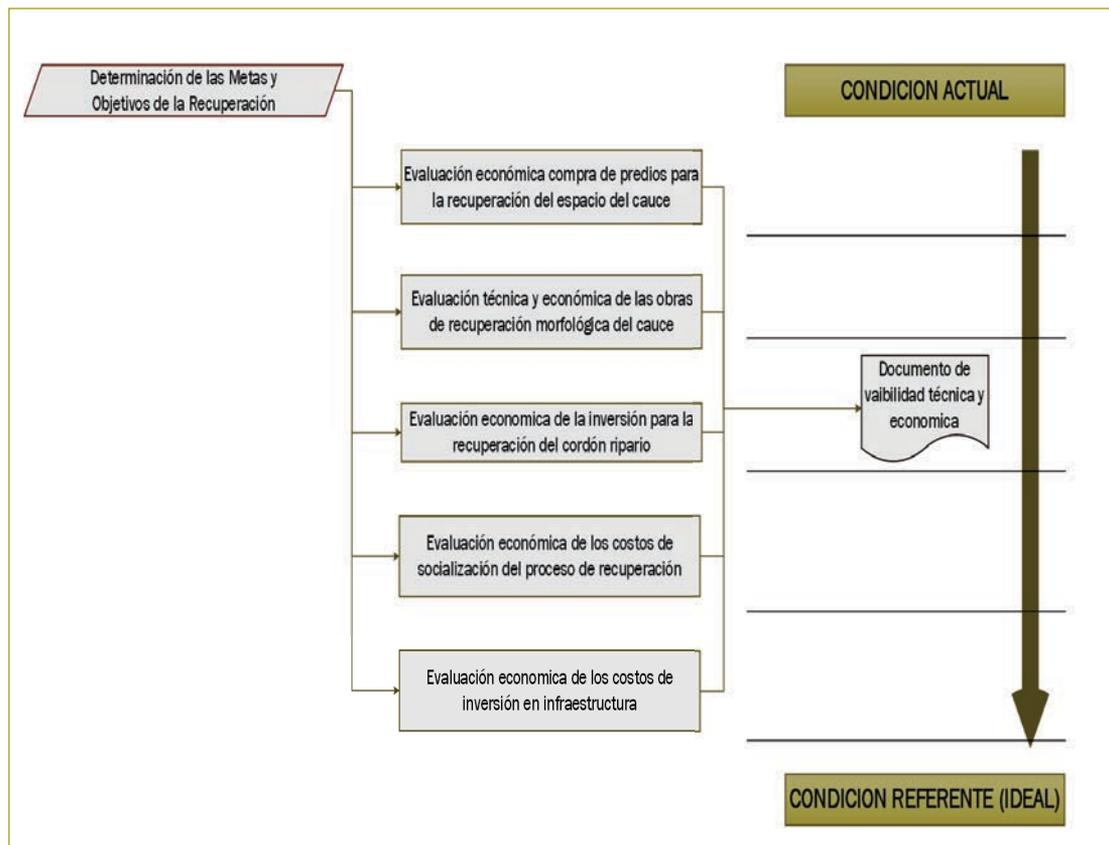


Figura 4. Paso 2: Determinación de las metas y objetivos de la recuperación.

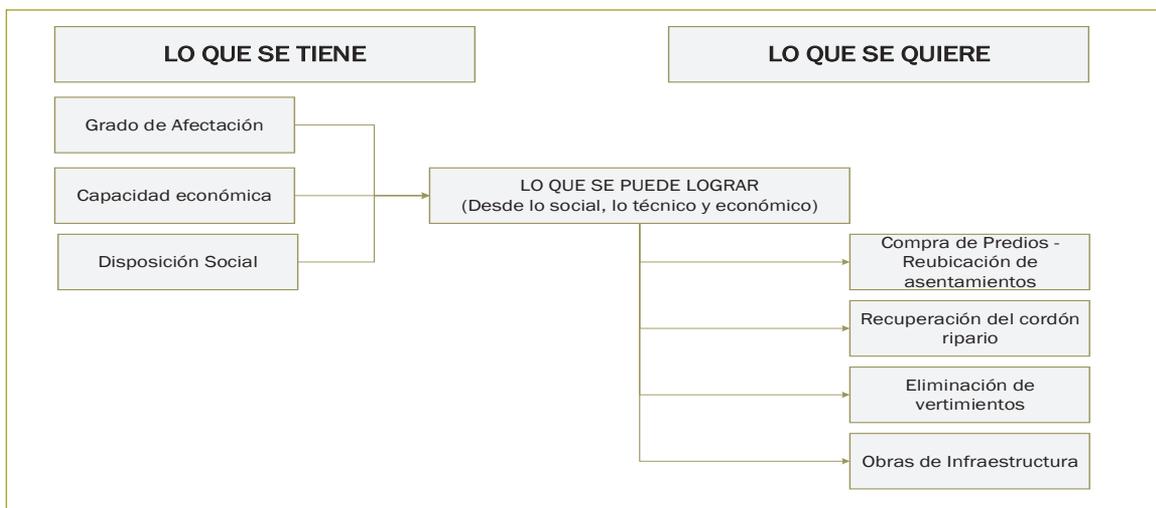


Figura 5. Prioridades en los objetivos de la recuperación de cauces.

obras de infraestructura que eliminen definitivamente los problemas asociados a la contaminación y deterioro del cauce.

Paso 3: Diseño de las alternativas de recuperación.

En el diseño de los procesos de recuperación se plantean tres etapas en el diseño que permitirán establecer el proceso del diseño de recuperación.

Etapas 1: Restablecimiento de la condición hidrológica.

Esto en atención a que el régimen de caudales determina los cambios ecomorfológicos, los cuales inciden de manera directa sobre los parámetros ecológicos. El análisis de la morfología y dinámica fluvial ofrecerá los determinantes para manejar los caudales y limitar los procesos de erosión.

Etapas 2: Restablecer el espacio del cauce.

Se plantea en cauces urbanos la recuperación del territorio fluvial. El territorio fluvial delimitado ha de ser coherente con las simulaciones hidráulicas realizadas para diferentes periodos de retorno, con el fin de caracterizar e identificar las zonas inundables y favorecer la reducción de los riesgos asociados a las crecidas fluviales. La integración de estas simulaciones con los estudios de régimen de caudales ambientales aporta la base para un éxito funcional sostenible del sistema posterior a las actuaciones.

Etapas 3: Restablecimiento del cordón ripario.

A partir del diagnóstico de la vegetación se pueden diseñar

las actuaciones necesarias para mejorar su composición específica, al igual que la estructura y funcionamiento de los bosques riparios. Entre otras, se destaca la utilización en entornos urbanos y periurbanos de técnicas de bioingeniería que permiten solventar problemas de estabilidad de los cauces, sin prescindir de la existencia de una formación vegetal riparia que permita el desarrollo de varios procesos ecológicos.

Las soluciones de recuperación están enfocadas en eliminar la causa que las origina. Es claro que la urbanización no ha de desaparecer para que el ecosistema se recupere, pero en la actualidad existen técnicas que permiten la minimización del impacto, y con un sistema de indicadores (hidrológicos, hidráulicos, geomorfológicos y ambientales), establecer el grado de recuperación que pueda llegar a lograrse sobre el cauce.

Los diseños que se propongan en un proceso de recuperación deberán ser dinámicos, pensados en los procesos y funciones del río. El objetivo es ayudar a que el río consiga un equilibrio dinámico sostenible. Esto implica tratar de dar continuidad al río para que recupere su forma, eliminando los obstáculos en el cauce y propendiendo a plantear obras que mitiguen los procesos de degradación. Además, en la etapa de diseño los componentes ecológicos deben identificarse claramente, y evaluarse para generar indicadores que puedan medir la mejora llevada a cabo por el proyecto de recuperación en el ecosistema.

Paso 4: Proceso de implementación de las obras de recuperación.

De manera similar a lo expresado en

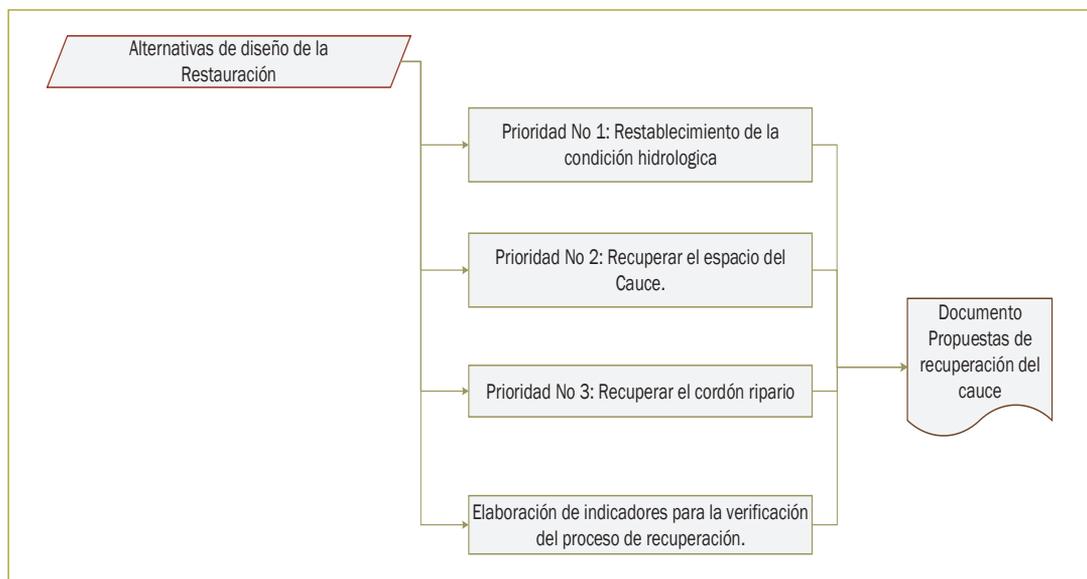


Figura 6. Paso 3: Diseño de alternativas para la recuperación de cauces.

los diseños de alternativas de recuperación, es necesario presentar un orden lógico para su implementación.

En primer término, la comunidad debe adoptar y socializar los procesos de recuperación. Lo que implica realizar una serie de talleres con la comunidad para poder reubicarla en zonas donde no se invada el espacio del cauce. También debe capacitarse a las comunidades aledañas, fuera de las zonas de ronda, para evitar que arrojen basuras a los cauces y soslayan prácticas que atenten contra el sistema ecológico que va a recuperarse. Esto es fundamental en el sostenimiento de las soluciones que se vayan a implementar.

En segundo lugar, es necesario restablecer el espacio del cauce, lo que implica la compra de predios en zonas de ronda hidráulica. En especial, debe recuperarse el espacio público definido como la ronda hidráulica, para generar el espacio al río y el lugar donde se deberán efectuar las actuaciones para mitigar el impacto producido por los cambios hidrológicos en la cuenca. En esta zona también se construirán interceptores de alcantarillado que eliminen los vertimientos de aguas residuales a los cauces, lo que significa que en esta zona se construirán obras de infraestructura bajo tierra que permitan la recuperación del cauce.

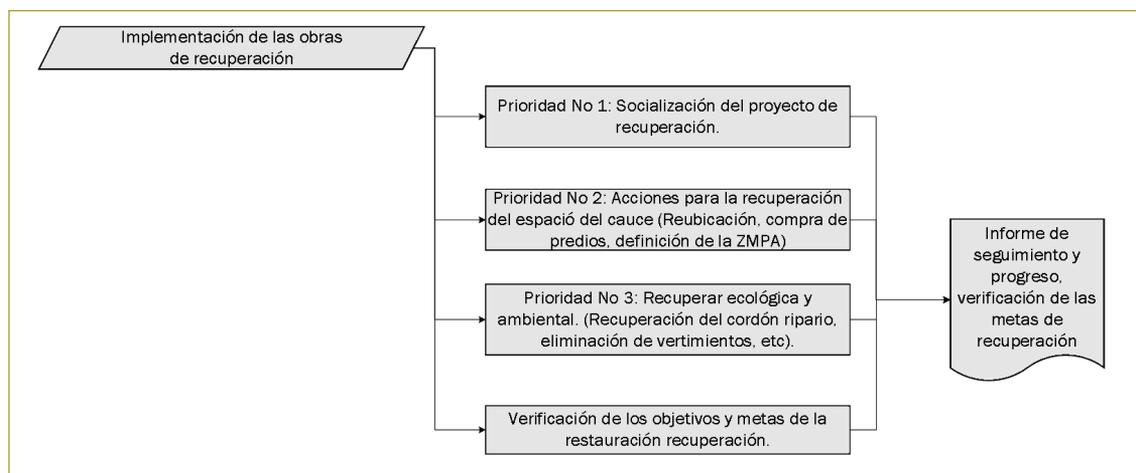


Figura 7. Paso 4: Implementación de las obras para la recuperación de cauces.

Las actuaciones siguientes dentro del proceso de recuperación serán las obras que mitiguen el impacto hidrológico (entre éstas las obras de drenaje urbano no convencional, como los sistemas urbanos de drenaje sostenible [SUDS], que eliminan los picos de lluvia y permiten la entrega de las aguas pluviales urbanas sin erosionar la zona de ronda y entregar las aguas lluvias por infiltración al cauce).y las obras que mitiguen la erosión en la zona de ronda, seguidas por obras de protección de la banca para la estabilización geomorfológica del cauce. Estas obras están encaminadas a mitigar los efectos de las inundaciones en el cauce.

Posteriormente, el proceso deberá centrarse en la recuperación ecológica y ambiental, aunque es de anotar que las medidas adoptadas en pasos anteriores propenden a la recuperación ecológica. En esta instancia, se efectuarán las labores tendientes a la recuperación del cordón ripario y los hábitats que conforman la zona del cauce.

Una vez establecidas las etapas primarias de la recuperación, es posible plantear obras que integren el espacio natural con la comunidad y elaborar diseños paisajísticos y florísticos para constituir un ámbito urbano integrado con la condición natural del cauce.

Paso 5: Monitoreo de las obras de recuperación. Los programas de evaluación y seguimiento de los procesos de recuperación constituyen una parte importante del proceso.

Un programa de seguimiento debe cumplir las siguientes funciones:

- Contar con indicadores que permitan evaluar el éxito de las actuaciones sobre el cauce.
- Considerar las interacciones entre la cuenca y el tramo del cauce que se interviene, y los efectos que se podrían producir en los tramos no intervenidos aguas arriba y aguas abajo del sector que se vaya a intervenir.
- Tener en cuenta la variabilidad en el tiempo del comportamiento del sistema. Esto se logra mediante el análisis de la evolución histórica del comportamiento del sistema fluvial y, planteando su funcionamiento futuro, por medio de simulaciones y planes de seguimiento de las actuaciones desarrolladas.

El monitoreo deberá ser constante y contrastado con los indicadores establecidos en el diagnóstico inicial (línea base).

CONCLUSIONES

Los procesos de recuperación pluvial buscan el desarrollo sostenible, integrando el entorno urbano al entorno natural para mitigar las afectaciones de políticas inadecuadas para uso y manejo de los recursos.

En lo referente a los cauces, estos procesos permitirán mejorar el hábitat fluvial y recuperar especies vegetales y animales, reducir el riesgo de inundaciones, mejorar la conectividad longitudinal y transversal del cauce, y recobrar los valores sociales, culturales y paisajísticos del río.

Para la intervención de los cauces, teniendo en cuenta los criterios de recuperación ecológica, es necesario

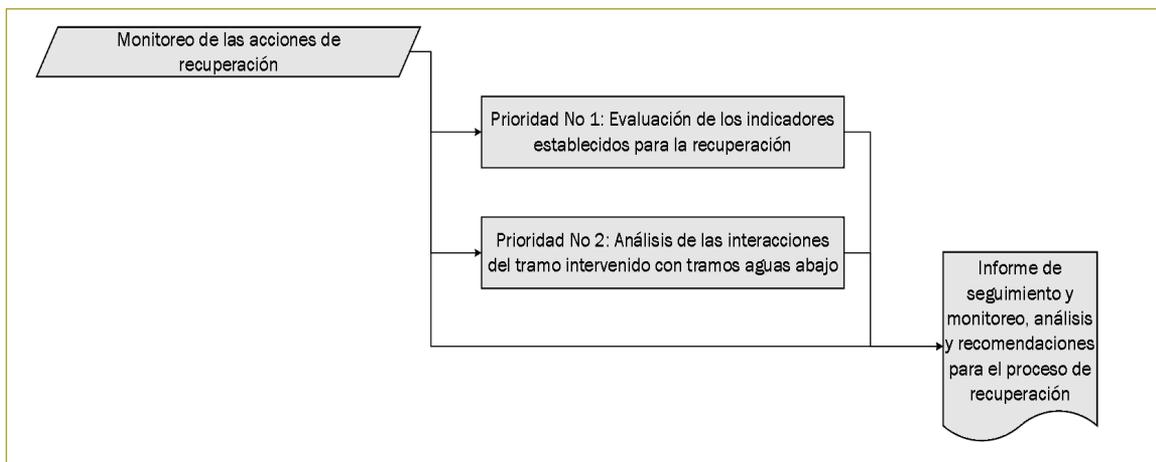


Figura 8. Paso 5: Monitoreo de las obras para recuperación de cauces.

definir el grado de recuperación al cual puede llevarse el cauce intervenido, lo que corresponde a una decisión de la autoridad responsable del manejo del recurso, apoyada por el grupo interdisciplinario de diseño.

Para la implementación de las obras de recuperación es fundamental evaluar la situación previa, pues el proceso de recuperación se definirá una vez que se establezcan los costos de las intervenciones requeridas en gestión social, compra de predios, obras de infraestructura, obras de estabilización y recuperación de zonas inestables, obras de recuperación del cordón ripario y la recuperación del hábitat.

Con la propuesta metodológica presentada se pretende ofrecer un procedimiento ordenado para afrontar el análisis y solución que representa la recuperación de cauces en zonas de montaña. Cabe señalar que esta metodología puede aplicarse en cauces urbanos en zonas bajas, teniendo en cuenta que los lineamientos en las evaluaciones hidráulicas e hidrológicas serán diferentes; así mismo, deberán considerarse las variaciones morfo-

lógicas del cauce y las variaciones en la biota presente en el sector de la cuenca que se evalúe.

REFERENCIAS

- Artículo (2013) [en línea]. Disponible en [http://www.minambiente.gov.co/index.php /component/content/article/536-plantilla-gestion-integral-del-recurso-hidrico-23](http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/536-plantilla-gestion-integral-del-recurso-hidrico-23) Colombia.
- Artículo (2015) [en línea]. Disponible en US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center: Coastal and Hydraulics Laboratory. Vicksburg, MS.
- Doll, B. (1999). *Stream restoration* (1st ed.). Chapel Hill, N.C.: North Carolina Stream Restoration Institute.
- Doyle, M.W., Boyd, K.F. & Skidmore, P.B. (1999). *River Restoration Channel Design: Back to the Basics of Dominant Discharge*. Second International Conference on Natural Channel Systems. Niagara Falls, Canada.
- Gregory, K.J. (2006). The Human Role in Changing River Channels [en línea]. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/215524372_The_Human_Role_in_Changing_River_Channels.
- National Engineering Handbook, part 654 (2007) [en línea]. Disponible en <https://www.nrcs.usda.gov> EE.UU.
- Wohl, E.E. & Merritt, D. (2005). Prediction of mountain stream morphology. *Water Resources Research*.

Una aproximación desde la academia a la evaluación del estado de la superficie de vías en la red terciaria

An approximation from academy to the evaluation of road surface state in tertiary network roads

LEIDY PAOLA BENÍTEZ ROBAYO¹ - SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ²

1. Estudiante de Ingeniería Civil, líder del Semillero de Investigación en Pavimentos (semestre 2018-1) de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Profesora titular, directora del Centro de Estudios Geotécnicos y tutora del Semillero de Investigación en Pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

leidy.benitez@mail.escuelaing.edu.co - sandra.campagnoli@escuelaing.edu.co

Recibido: 10/02/2018 Aceptado: 15/03/2018

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

Resumen

Durante las negociaciones de La Habana y en la fase inicial del pos-conflicto, se ha reconocido que una infraestructura vial que permita la transformación del campo y acerque el Estado a las comunidades rurales para proveerlas de servicios sociales fundamentales, como salud, vivienda y educación, y que promueva actividades económicas lícitas y el desarrollo de proyectos productivos, es una de las herramientas esenciales para la construcción de una paz estable y duradera. En este ámbito, las facultades de ingeniería civil tienen un papel preponderante, no solo para pronunciarse sobre aspectos técnicos relacionados con el mejoramiento, la conservación o la construcción de vías en la red terciaria, sino también para que sus estudiantes, desde su proceso de formación, conjugando lo académico con lo práctico, se conviertan en agentes activos en el posconflicto y generadores de cambio.

Con esta perspectiva, el Semillero de Investigación en Pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito hizo el trabajo que se presenta en este artículo, en el que, aplicando el método Viziret evaluó el estado de las superficies de vías, con el fin de proponer soluciones para la intervención, en tramos de la red vial terciaria de los departamentos de Santander y Boyacá que pasan por los municipios de Jesús María, La Belleza, Florián y Saboyá.

En términos generales, se concluye que el estado de las vías transitadas es el resultado de condiciones ambientales y topográficas que no hacen viable la solución de afirmado como superficie de rodadura y que, aun si se cumpliera con las especificaciones de materiales y se llevarán a cabo actividades de mantenimiento en las vías, este tipo de solución continúa siendo insostenible para los niveles de precipitación y gradientes topográficos que se presentan en la zona.

Palabras claves: red terciaria, afirmados, método Viziret, bajos volúmenes de tránsito.

Abstract

During the Colombian peace process in Havana and the initial phase of the post-conflict, it has been recognized that a road infrastructure that allows the transformation of the countryside and brings the government closer to rural communities to provide them with basic social services such as health, housing, and education, that also promotes licit economic activities and the development of productive projects, is one of the essential tools for building a stable and lasting peace. In this area, civil engineering faculties have a preponderant role, not only in technical aspects related to the improvement, conservation or construction in the tertiary road network, but also so that their students, from their training process, combining academia and practice, become active agents in the post-conflict and generators of change. With this perspective, the Pavement Research Seedbed from Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito performed the activity presented in this article, in which applying the Viziret method, made the evaluation of the surface conditions in part of the tertiary road network, from which solutions are proposed for their intervention, in the departments of Santander and Boyacá, that crosses through the municipalities of Jesús María, La Belleza, Florián, and Saboyá. In general, it is concluded that the condition of the evaluated routes is the result of environmental and topographical conditions that do not make the gravel road solution viable as a surface road and that, even if material specifications were met and activities of maintenance on the road is made, this type of solution remains unsustainable for the precipitation levels and topographic gradients that occur in the area.

Keywords: Tertiary Road network, Gravel road, Viziret method, Low-Volume Road.

INTRODUCCIÓN

Con los acuerdos de paz, el gobierno nacional ha vuelto su mirada a la red vial terciaria, cuya administración y gestión se encuentran principalmente a cargo de los municipios, reconociendo la precariedad histórica de esta infraestructura como una condición estructural que ha alimentado los problemas sociales que han desembocado en el conflicto armado más viejo del continente. Es así como en el punto 1 de los acuerdos “Hacia un nuevo campo colombiano: reforma rural integral”, particularmente en el ítem de “Infraestructura y adecuación de tierras”, en lo que se refiere a infraestructura vial, el gobierno se compromete a crear e implementar un plan nacional de vías terciarias, en el que, en términos generales, se aplicarán criterios como la participación activa de las comunidades, la asistencia técnica para garantizar el mantenimiento y la sostenibilidad de las obras, el estímulo a la economía local, la promoción y aplicación de diversas soluciones tecnológicas y la sostenibilidad de las condiciones socioambientales.

Así mismo, en el punto 4 de los acuerdos, “Solución al problema de las drogas ilícitas”, se reconoce el papel fundamental de las obras de infraestructura social, entre ellas las vías terciarias, para responder a las necesidades de la comunidad y atender con una planeación integral la sustitución de cultivos ilícitos (1). A este respecto, en el Conpes 3857, en el que se dan los lineamientos de política para la gestión de la red terciaria, en la asignación de puntajes para la priorización de la intervención de estas vías, cuando promuevan la sustitución de cultivos, se le otorgan 15 puntos de los 100 posibles (2).

Es entonces esencial reconocer el lugar de la academia en la coyuntura social y política que atraviesa el país, sobre todo por la pertinencia de acercar los saberes considerados técnicos a las realidades rurales y zonas apartadas de Colombia. El reto en el desarrollo de la red terciaria es inmenso, pues implica un trabajo activo y comprometido con el gobierno y con las comunidades en la transmisión de conocimientos construidos desde la disciplina de la ingeniería civil, para así atender los desafíos materiales que promuevan y aporten a la construcción de una paz que sea verdaderamente estable y duradera.

Además de la investigación e innovación, necesarias para la búsqueda de soluciones tecnológicas integrales y sostenibles para la atención de la red terciaria, de tal forma que éstas sean compatibles con las condiciones

propias de los ambientes y materiales y se aproveche el recurso humano local, la academia está acercando a sus estudiantes a las realidades del país, propiciando espacios para que sean agentes activos en el posconflicto y generadores de cambio.

Es así como en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, particularmente en el Semillero de Investigación en Pavimentos, dentro de los temas de trabajo se vienen estudiando las vías terciarias, conocidas técnicamente como vías de bajos volúmenes de tránsito (BVT), sobre todo las vías en afirmado. Por eso en este artículo se expone la experiencia llevada a cabo en el primer semestre de 2018 en la que, utilizando el método Viziret, se evaluó la condición de varias vías ubicadas en los departamentos de Santander y Boyacá que comunican los municipios de Jesús María, La Belleza, Florián y Saboyá, y se proponen soluciones de intervención de acuerdo con los resultados de esta evaluación.

RED VIAL TERCIARIA EN COLOMBIA

El país cuenta con una red vial cuya longitud asciende a 204.855 km, de los cuales cerca del 70 % (142.284 km) corresponden a la red terciaria, principalmente a cargo de los municipios (figura 1).

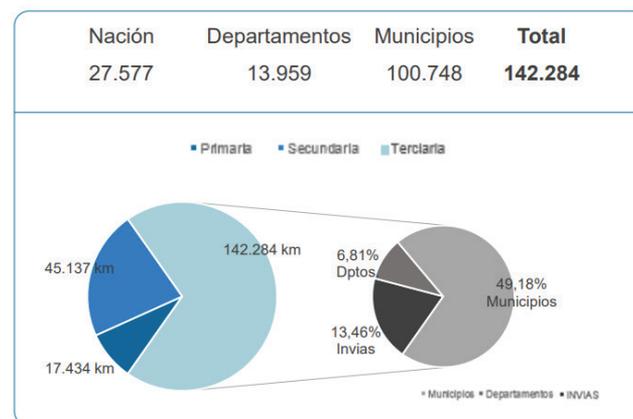


Figura 1. Distribución de la red terciaria.

Fuente: Transporte en cifras estadísticas, 2014 (Mintransporte).

De acuerdo con los inventarios del Ministerio del Transporte, la mayor longitud de las superficies de rodadura de las vías de la red terciaria se encuentra en afirmado, en un estado que fluctúa principalmente entre regular y malo (figura 2), (3).

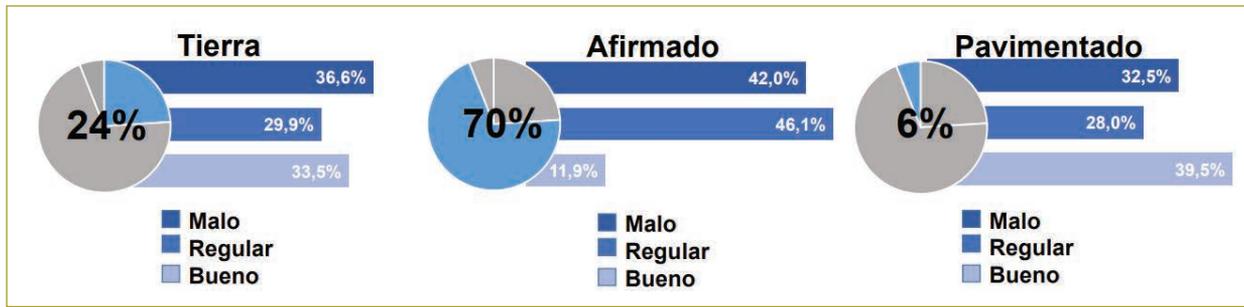


Figura 2. Estado de la red terciaria.

Fuente: Transporte en cifras estadísticas, 2014 (Mintransporte).

Los departamentos que acogen la mayor longitud de la red terciaria son, en su orden, Boyacá, Cundinamarca y Antioquia, aun cuando en términos de densidad vial Quindío también supera los 20 km/100 km². La distribución de la red en el territorio nacional es desbalanceada, ya que cerca del 68 % del país tiene menos de 12,8 km/100 km² y grandes extensiones carecen de un mínimo de infraestructura de transporte (4).

EL AFIRMADO COMO SUPERFICIE DE RODADURA

El afirmado, también denominado grava (*gravel roads*) o ripio en varios países de Latinoamérica, constituye la solución tecnológica más empleada cuando se trata de atender la construcción de vías de BVT, que son en esencia la mayoría de las vías que conforman la red terciaria.

Gobiernos, agencias viales y entidades financieras internacionales, como el Banco Mundial y el Banco de Desarrollo de América Latina (anterior Corporación Andina de Fomento, CAF), han propiciado estudios para investigar la sostenibilidad de este tipo de superficie de rodadura, coincidiendo en que, aun cuando se trate de vías con tránsitos inferiores a los 200 vehículos por día (vpd) de los cuales menos de 50 superan las 3,5 toneladas, los afirmados pueden resultar inviables, dependiendo sobre todo de las distancias de acarreo de materiales adecuados que efectivamente cumplan con las especificaciones de calidad (en el caso colombiano, contempladas en los artículos 300 y 311 de las especificaciones generales de construcción de carreteras del Ministerio de Transporte - Instituto Nacional de Vías), (5), así como de las condiciones ambientales y de gradientes topográficos imperantes en la zona donde se emplazará el camino, y un aspecto no menos importante, de las capacidades de mantenimiento de la vía,

aspecto este último que normalmente no se considera en la estructuración y gestión de muchos proyectos de vías terciarias.

Guías y recomendaciones para la evaluación de ingeniería sobre la conveniencia de la construcción de un afirmado se pueden consultar en diferentes fuentes, pero vale la pena recomendar las experiencias logradas por la SADC¹ en 2003, que se resumen en el documento *Low-Volume Sealed Roads Guideline* (6), o por el Seacap² con el apoyo de la gTKP³, que se pueden consultar en la *Research on Sustainable Paving/ Surfacing for Low Volume Rural Roads in Vietnam*, o en *Key Management Issues for Low Volume Rural Roads in Developing Countries* de 2008 (7), (8), o por la autoridad de carreteras de Etiopía en 2011, que se encuentran contenidas en el *Design manual of low volume roads* (9).

En términos generales, se puede asegurar que están claramente establecidas las condiciones para lograr que una vía en afirmado sea sostenible. Estas condiciones hacen referencia a la calidad de los materiales en cuanto a distribución de tamaños, dureza, durabilidad, limpieza y resistencia; a la distancia de acarreo de éstos desde la fuente hasta el sitio del proyecto, que no debe superar los 50 km; a los niveles de pluviosidad, los cuales deben ser inferiores a los 1000 mm/año, siempre y cuando la pendiente longitudinal de la carretera no supere el 6 %, o a 2000 mm/año si esta última es menor que el 4 %; a niveles de tránsito por debajo de los 200 vpd, si se cumple con todas las condiciones anteriores, y por supuesto, a los requisitos de mantenimiento, como los perfilados frecuentes y las recargas de grava.

1. Southern African Development Community.
2. South East Asia Community Access Programme.
3. Global Transport Knowledge Partnership.

MÉTODO DE EVALUACIÓN DE LAS SUPERFICIES EN AFIRMADO

El estudio preliminar de las vías se realizó utilizando herramientas digitales como Google Earth, e identificando información pertinente en diferentes entidades, entre ellas el Ideam, para conocer los ambientes climáticos e hidrológicos; el Servicio Geológico Colombiano, para indagar sobre las condiciones geológicas y geotécnicas; el Instituto Nacional de Vías y el Ministerio de Transporte, donde se buscó si las vías en estudio contaban con inventario, y en general, en las páginas web de los municipios para identificar los contextos demográficos y económicos de las zonas por donde discurren las vías.

La condición de los “afirmados” de las vías se calificó, durante la visita de campo, aplicando el método Viziret que se describe a continuación.

MÉTODO VIZIRET

El método Viziret, propuesto por el Laboratorio Central de Puentes y Calzadas (LCPC), de Francia, se sustenta en estudios desarrollados en países tropicales de África y busca establecer la condición de una vía en afirmado mediante la inspección visual de su superficie (10).

La condición se determina definiendo un índice de viabilidad, ligado a cinco tareas de mantenimiento: a) mantenimiento básico que involucra solamente reparaciones puntuales; b) perfilado ligero, nivelando la superficie de forma mecanizada; c) perfilado pesado, para recuperar la sección transversal y la rasante de la calzada, así como reactivar cunetas y desagües; d) recarga de grava, para restablecer el espesor inicial del afirmado, y finalmente, e) reconstrucción, haciendo remplazo total o parcial del afirmado existente.

Los deterioros del afirmado se clasifican en dos grupos: de tipo estructural, y relacionados con el manejo del agua y otras condiciones no estructurales (figura 3).

Para la cuantificación de los deterioros estructurales, el método define niveles de gravedad, donde el nivel 0 representa la ausencia de deterioros y el nivel 3 una degradación muy importante, en tramos de vía de 100 m de longitud. El nivel asignado a cada tramo corresponde al más alto que se encuentre en los diversos tipos de deterioro presentes. Finalmente, el método propone

una relación entre los niveles de gravedad y el tipo de mantenimiento que se debe hacer (tabla 1).



Figura 3. Clasificación de los deterioros mediante el método Viziret.

Tabla 1
Relación entre el nivel de gravedad de un deterioro y la naturaleza de los trabajos

Nivel 0	Ausencia de deterioros	Monitoreo y mantenimiento básico
Nivel 1	Degradación leve y poco sensible a los usuarios.	Perfilado ligero con bacheo o sin él.
Nivel 2	Degradación constante y sensible a los usuarios.	Perfilado pesado con bacheo o sin él.
Nivel 3	Degradación muy importante.	Recarga de grava o reconstrucción.

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA Y DE LAS VÍAS

Las vías seleccionadas pasan por los municipios de Jesús María, La Belleza, Florián y Saboyá, ubicados en el sur del departamento de Santander y en el norte del departamento de Boyacá. La longitud total aproximada del recorrido realizado fue de 108 km. El terreno por donde discurren las vías bajo evaluación es en general montañoso, con pendientes promedio en el trayecto considerado del 6 %, llegando a ser del 24 % hacia el final de éste, en inmediaciones del municipio de Saboyá. La precipitación en la zona es elevada y varía entre los 2000 y 2500 mm/año, en tanto que la temperatura promedio se encuentra entre los 15 y 25 °C.

En términos geológicos, en la zona se atraviesan las formaciones Guadalupe, Paja y Ritoque, y áreas donde

predominan arcillolitas y areniscas del Cretáceo y, en menor cantidad, calizas y lutitas. De igual manera, se cruza por varias fallas geológicas, entre ellas los anticlinales de Pradera y de Jesús María.

En cuanto al diseño geométrico, debido principalmente a las condiciones topográficas del sector, en varios tramos de las vías se cuenta con poca distancia de visibilidad y curvas con cortas entretangencias.

La economía de la región se basa específicamente en la ganadería y, en menor escala, en la agricultura. Las poblaciones de los municipios considerados no superan los 12.500 habitantes y se estima, en promedio, un tránsito entre 100 y 120 vpd, en los tramos más solicitados.

APLICACIÓN DE LA EVALUACIÓN

La inspección visual de las vías se llevó a cabo haciendo especial énfasis en tres tramos: dos localizados entre los municipios de Jesús María y La Belleza, y otro ubicado entre los municipios de Florián y Saboyá. Los tramos se dividieron en cuatro subtramos, cada uno de 125 m en los tramos 1 y 3, y de 100 m en el tramo 2. La cuantificación de los deterioros estructurales, al igual que de los deterioros producidos por insuficiencias de drenaje, se hizo como ya se indicó, siguiendo las recomendaciones del método Viziret.

Evaluación de la condición de las vías en el tramo 1

Ubicado aproximadamente a 2 km desde la cabecera municipal de Jesús María, en éste se encuentran deformaciones, baches y surcos longitudinales en un nivel de



Figura 4. Condición de la vía en el tramo 1.

gravidad 2, razón por la cual se le asignó un índice de viabilidad de 2. De acuerdo con el método Viziret, una posible solución a las afectaciones del tramo sería realizar un perfilado pesado con bacheo o sin él (figura 4).

En cuanto a los deterioros por influencia del drenaje y otros, se encontraron pocos surcos transversales, la presencia de cabezas duras predominaba en gran parte del tramo y la formación de lodazales no se pudo evaluar debido a la condición seca del material el día de la inspección visual. El estado de las cunetas no es el ideal para garantizar un adecuado drenaje, el ancho de éstas varía a lo largo del tramo, y normalmente se encuentran llenas de vegetación y rocas que obstruyen el curso del agua (figuras 5 y 6).



Figura 5. Predominancia de cabezas duras en el tramo 1.



Figura 6. Condición de las cunetas en el tramo 1.

Evaluación de la condición de las vías en el tramo 2

El tramo se encuentra localizado aproximadamente a 6,2 km de la cabecera municipal de Jesús María. El material existente en la vía yace sobre una subrasante arcillosa de

alta compresibilidad, de acuerdo con sus características de plasticidad (figura 7).



Figura 7. Suelo de subrasante del tramo 2.

En los tres primeros subtramos se apreciaron deformaciones, baches y surcos longitudinales, todos ellos con nivel de gravedad 2, mientras que en el subtramo 4 estos mismos deterioros tienen un nivel de gravedad 3, por lo que se le asignó al tramo un índice de viabilidad de 3. De acuerdo con este nivel, las alternativas de mantenimiento recomendables son la recarga de grava o, incluso, la reconstrucción (figuras 8 y 9).



Figura 8. Ondulaciones, baches y surcos longitudinales en el tramo 2.



Figura 9. Surcos longitudinales en el tramo 2.

Algunos surcos longitudinales que evidencian la falta de un adecuado drenaje, al igual que cabezas duras y afloramientos de roca en varias partes del tramo, son muestras de la pérdida de material de “afirmado”, especialmente en las zonas de mayor pendiente.

Al igual que en el tramo 1, las cunetas se encuentran en mal estado, tienen un alto grado de erosión, presentan obstrucciones o están cubiertas de vegetación, e incluso llegan a desaparecer en la mayoría del tramo (figuras 10 a 12).



Figura 10. Condición de las cunetas y surcos longitudinales en el tramo 2.



Figura 11. Cabezas duras en el tramo 2.



Figura 12. Condición de las cunetas en el tramo 2.



Figura 13. Deterioros presentes en el tramo 3.

Evaluación de la condición de las vías en el tramo 3

En este tramo, situado a 23 km de la cabecera municipal del municipio de Florián, la inspección visual se realizó en subtramos de 125 m cada uno. No presenta deformaciones importantes, aun cuando se identificaron algunos baches con dimensiones correspondientes a un nivel de gravedad 1 (figura 13). Tampoco se evidencian surcos longitudinales u otros deterioros debidos al drenaje, razón por la cual se le asignó un nivel de deterioro de 0.

En algunos sectores se pueden observar espesores de la capa de grava inferiores a 7 cm, como resultado de la pérdida de material. Sin embargo, al clasificar la condición del tramo en un nivel 1 de deterioro, que corresponde a una degradación leve y poco sensible a los usuarios, la recomendación de mantenimiento es un perfilado ligero con bacheo o sin él.

Los deterioros en este tramo por influencias del drenaje se confirman por la presencia de cabezas duras y un alto grado de erosión y obturación de las cunetas (figuras 14 y 15).



Figura 15. Imágenes de cunetas erosionadas y obstruidas en el tramo 3.

En términos generales, el tramo 3 presenta una condición aceptable para el tránsito de vehículos, dado que no se observaron surcos; se puede decir que el sistema de drenaje funciona, aun cuando en ciertas partes se encuentra obstruido por vegetación y sedimentos acumulados.

OBSERVACIONES ADICIONALES

Al comparar la información recolectada en la inspección de campo con la observada en las imágenes de 2013, durante los recorridos con la herramienta Google Earth, se encontró que uno de los tramos seleccionados como críticos, sigue en la misma condición. En este punto de la vía que conduce de Jesús María a La Belleza, un cuerpo de agua la atraviesa por completo (figuras 16 y 17).



Figura 14. Cabezas duras en el tramo 3.

Imágenes del 2013



Figura 16. Punto crítico en la vía en el año 2013 (imágenes de Google Earth).

Imágenes del 2018



Figura 17. Imágenes de punto crítico en la vía en el año 2018.

Las condiciones de las vías unos kilómetros adelante del tramo 3 son completamente distintas. A pesar de no realizar un recorrido a pie, fue posible apreciar el avanzado estado de deterioro en el que se encuentran. En el momento de la observación se presentaron fuertes lluvias, las cuales permitieron apreciar las malas condiciones de drenaje por la presencia frecuente de surcos longitudinales y transversales, al igual que la formación de lodazales (figura 18).

CONCLUSIONES

El estado de deterioro de las vías evaluadas en esta experiencia pone de manifiesto varios aspectos técnicos, sobre los cuales se concluye:

- Aun cuando se dice que estas vías se encuentran en “afirmado”, la calidad de los materiales encontrados



Figura 18. Imágenes de surcos longitudinales y lodazales durante lluvias intensas.

no corresponde a esta solución de superficie, apartándose significativamente de las exigencias dadas en las especificaciones correspondientes.

- Así los materiales cumplieran con los requisitos de calidad, en las vías evaluadas la solución de “afirmado” como alternativa de superficie resulta inviable, dadas las condiciones climáticas (pluviosidad superior a los 2000 mm/año) y de gradientes del terreno (pendientes que llegan a ser de más del 4 %).
- En general, los trazados geométricos y los drenajes son deficientes en varios de los tramos de las vías evaluadas.
- Todas las consideraciones anteriores, sumadas a la ausencia o al escaso mantenimiento de las vías, han dado lugar a su precario desempeño y hacen poco sostenible el “afirmado” como solución de superficie.
- El método de evaluación de la condición del “afirmado” aplicado en esta experiencia resulta de fácil implementación por parte de las autoridades viales municipales y permite complementar la información de los inventarios de las redes a su cargo, facilitando la toma de decisiones para su priorización e intervención, así como justificar las inversiones en ellas.

Se quieren destacar los beneficios de este ejercicio que, si bien es académico, acercó en la práctica a los participantes en el Semillero de Investigación en Pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito a una de las realidades en el contexto de las vías de la red terciaria más apremiantes por atender. Un ejercicio que permitió comprender la responsabilidad social de los estudiantes y, en general, de los académicos,

en la construcción de alternativas sostenibles, tangibles y técnicas para superar los desafíos materiales de las comunidades, y brindar oportunidades que deriven en la construcción de una paz que sea verdaderamente estable y duradera.

Por último, en el Semillero de Investigación se continuará trabajando en los temas relacionados con la red terciaria, el afirmado como superficie y, en general, en el estudio de soluciones de pavimentación para las vías de bajos volúmenes de tránsito. Para esto, es necesario contar con el apoyo decidido de las agencias viales nacionales, departamentales y municipales que las tienen a cargo, de modo que se pueda lograr la implementación de innovaciones tecnológicas y de metodologías de evaluación y de seguimiento del desempeño de la infraestructura vial, buscando que sean caminos sostenibles. En las facultades de ingeniería civil y de vías, con el apoyo de sus estudiantes, estas entidades pueden encontrar colaboración en la asistencia técnica básica que requieren muchos de los municipios del país para desarrollar la infraestructura vial que se encuentra bajo su responsabilidad.

Grupo de trabajo

- **Estructuración del ejercicio y orientación de la gira técnica.** Profesores ingenieros José Vicente Amórtegui Gil, Sandra Ximena Campagnoli Martínez. Estudiantes líderes del semillero: Leidy Paola Benítez R., Cristian David Alzate, Ivana Bayona Alsina, Laura Camila Aguilar Mesa, Danna Vanessa Rojas Ávila, Andrea Catalina Obando Salamanca.
- **Desarrollo en campo.** Profesores ingenieros José Vicente Amórtegui Gil, Sandra Ximena Campagnoli Martínez, María Fernanda Ramírez B., Dairo Puentes P.
- **Estudios de oficina y campo.** Leidy Paola Benítez R., Cristian David Alzate, Laura Camila Aguilar Mesa, Carlos Fernando Barceló Avendaño, Gineth Daniela Barrera Fandiño, Ivana Bayona Alsina, Nicolás Andrés Calentura Granados, Angie Tatiana Daza Acevedo, Paula Alejandra Forero González, Michael Eduardo Franco Figueroa, Esteban Guacaneme Verdugo, Érika Natalia Laverde Holguín, Germán Camilo Leguizamó Guzmán, Édgar Jhoan López Riveros, Valentina Murcia Guzmán, Paula Andrea Nonzoque Vertel, María Camila Numpaque Fonseca, Andrea Catalina Obando Salamanca, Oswaldo Peña Romero, Cristhian Camilo Ramírez Medina, Sebastián Felipe Rodríguez

Machuca, Danna Vanessa Rojas Ávila, Juan Felipe Sáenz Becerra, Juan Pablo Sáenz Rojas, Holman Stivens Salinas Reyes, Miller Guiovan Urrego Calderón, Shayra Milena Sierra Sierra, José Santiago Castañeda Olaya, Hugo Fernando González Cuadros, Carlos Andrés Serrato Avendaño, Jorge Luis Mayorga Sánchez y Laura Fernanda Forero Amézquita.



Agradecimientos

El grupo de trabajo agradece a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por el apoyo académico y económico brindado, indispensable para que esta iniciativa llegara a feliz término.

REFERENCIAS

1. Gobierno nacional de Colombia - Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia (2016). Acuerdo final para la terminación del conflicto y la construcción de una paz estable y duradera. http://www.altocomisionadoparalapaz.gov.co/procesos-y-conversaciones/Documentos/Compart_Acuerdo_Final.
2. Departamento Nacional de Planeación (DNP) (2016). Lineamientos de política para la gestión de la red terciaria. Conpes 3857.
3. Departamento Nacional de Planeación (DNP) (2016). Política para la gestión de la red terciaria: presupuesto informado por resultados. https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Presentaciones/RED_TERCIARIA_CCI-DNP.pdf.
4. Narváez, L. (2017). Vías terciarias: motor del desarrollo económico rural. *Revista Ingeniería 45*, Universidad de los Andes.
5. Instituto Nacional de Vías, Ministerio de Transporte, República de Colombia (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras.
6. Southern African Development Community (SADC) (2013, July). Guideline on Low-Volume Sealed Roads.
7. Petts, R., Cook, J. & Salter, D. (2008). Research on Sustainable Paving/Surfacing for Low Volume Rural Roads in Vietnam. <https://www.gov.uk/dfid-research-outputs/seacap-1-and-4-research-on-sustainable-paving-surfacing-for-low-volume-rural-roads-in-vietnam>.
8. Petts, R., Cook, J. & Salter, D. (2008). Key Management Issues for Low Volume Rural Roads in Developing Countries. *Incotals South Asia Moves Forw*, 1-16.
9. Ethiopian Roads Authority (2011). *Design Manual for Low Volume Roads*. Vol. Part D.
10. República de Colombia - Ministerio de Transporte - Instituto Nacional de Vías (2016). *Manual de mantenimiento de carreteras*, 1.

Diseño de tratamiento de un efluente proveniente del beneficio de la industria avícola

Treatment design of an effluent from the poultry benefit industry

RODRIGO CÁCERES ESCORCIA¹ - JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS²

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

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

rcaceres@iaguas.com - jairo.romero@escuelaing.edu.co

Recibido: 12/02/2018 Aceptado: 21/03/2018

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

Resumen

En el presente artículo se propone un sistema de tratamiento y se expone su diseño conceptual para la industria de beneficio de aves de corral, que les permita cumplir con la Resolución 631 de 2015, así como disminuir el caudal de vertimiento, implementando prácticas de recirculación, reúso y reducción de consumo de agua utilizada en el proceso productivo. Lo anterior se logra mediante la medición de consumos de agua de toda la planta, identificando y evaluando los puntos de mayor consumo y su potencial de reúso y recirculación sin reacondicionamiento, respetando las leyes de higiene para la industria de alimentos.

Palabras claves: avícola, planta de sacrificio de aves, PTAR, DAF, reúso de agua.

Abstract

The present work aims to propose a treatment system and to expose its conceptual design for the poultry benefit industry, which allows them to comply with legislation 631 of 2015, as well as to reduce the flow of dumping, implementing practices of recirculation, reuse and reduction of water consumption used in the production process. This is achieved by measuring the water consumption of the entire plant, identifying and evaluating the points of greatest consumption and its potential for reuse and recirculation without reconditioning, respecting hygiene laws for the food industry.

Keywords: poultry, bird slaughtering plant, WWTP, DAF, water reuse.

INTRODUCCIÓN

La industria avícola colombiana se ha consolidado en los últimos años como uno de los subsectores más importantes de la economía nacional. El producto interno bruto (PIB) avícola representa el 0,23 % del PIB nacional y aproximadamente el 12 % del PIB agropecuario.

El sector ha venido registrando un importante crecimiento dentro de la economía nacional, hasta el punto de que en el 2016 la producción de pollo presentó un crecimiento del 4,8 % y alcanzó los 1,4 millones de toneladas. El consumo per cápita de pollo es de 32 kg/hab./año. Ha tenido un continuo crecimiento, pasando de aportar el 7,0 % de la producción total de carnes de res, cerdo y pollo en 1961 al 50,4 % en 2015, siendo hoy una de las principales fuentes de proteínas de los colombianos. Las regiones con más plantas de beneficio son región centro, Santander, Valle y Antioquia.

Teniendo en cuenta el fuerte crecimiento del consumo de carne de pollo, cada vez se incrementa más la capacidad de producción de las plantas de beneficio y, por lo tanto, aumentan la demanda de agua y las descargas de aguas residuales a las fuentes hídricas; de ahí la importancia de diseñar sistemas de tratamiento adecuados y establecer políticas de uso eficiente del agua dentro del mismo proceso productivo.

El agua residual de esta industria se caracteriza por contener altas cargas de sólidos suspendidos, grasas y aceites, nitrógeno, fósforo, DBO_5 y DQO, las cuales son grandes contaminantes, motivo por el cual es vital el diseño de sistemas de tratamientos de aguas que permitan cumplir con la legislación ambiental vigente e implementar sistemas de reúso y recirculación de agua dentro del proceso de sacrificio.

OBJETIVOS

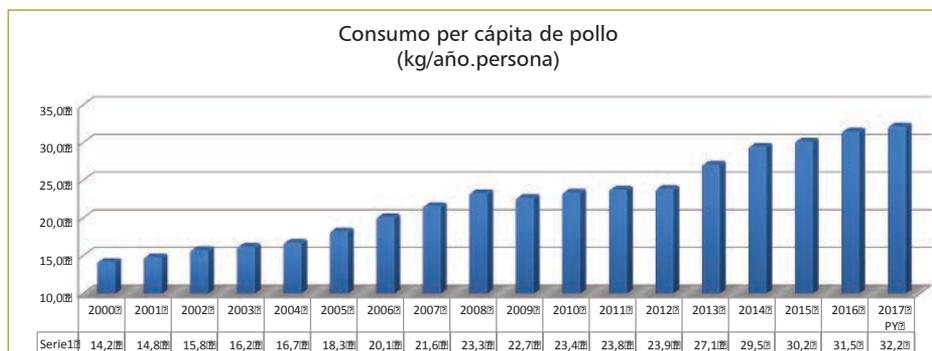
- Proponer un diseño conceptual para un sistema de tratamiento enfocado en cumplir con la Resolución 0631 de 2015, para el vertimiento del beneficio de aves de corral.
- Disminuir el caudal vertido después del proceso de beneficio
- Buscar la optimización de cada etapa del proceso productivo.

RESULTADOS

Antes de empezar a evaluar un diseño de tratamiento para los efluentes de una planta de sacrificio de pollo, es importante conocer su proceso de faenamiento y sus indicadores de consumos de agua, e identificar las posibles líneas de reúso, con el fin de enviar la menor cantidad de agua residual hacia la PTAR, contribuyendo a optimizar costos en los tratamientos, reducir los consumos per cápita de agua por pollo faenado y disminuir de esta manera el impacto ambiental por las descargas de aguas, que aunque tratadas todavía contienen cargas de materias orgánicas que contaminan las fuentes de agua. Para hacer el diseño debe comenzarse por evaluar la causa y no solamente la consecuencia.

ETAPAS DEL PROCESO PRODUCTIVO

Las plantas de beneficio cumplen la función de recibir el ave en pie y entregar carne en canal o despresada. Las aves que se ahogan durante el transporte se desnaturalizan mediante una picadora y se envían a la planta de harinas de carne, junto con la víscera blanca del pollo. Los pollos vivos llegan a la planta en camiones de carrocería tipo estacas, con capacidad para 2700 aves cada uno.



El beneficio de aves se realiza en diez grandes procesos:

1. Recepción de aves vivas
2. Colgado, matanza y desangrado
3. Escaldado y pelado
4. Evisceración
5. Preenfriamiento (prechiller)
6. Enfriamiento de canales (chiller)
7. Despese
8. Selección
9. Almacenamiento
10. Despacho

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DE CADA PROCESO

Toda planta deberá orientarse al uso eficiente del agua, trabajando en tres aspectos:

- Recirculación
- Reúso
- Reducción del consumo

Los puntos asociados con el mayor consumo de agua son:

- Preenfriamiento de menudencias
- Lavado de canales antes del prechiller
- Transporte de menudencia, cuellos y pies

Después de minimizar la utilización de agua, la acción más importante es la evaluación de recirculación y reúso del agua residual sin reacondicionamiento o tratamiento (reúso directo).

El reúso directo puede hacerse en proceso sin contacto directo con el producto, en usos no potables tales como torre de enfriamiento, lavado de baños o riego alrededor de la planta; de esta manera, puede haber un ahorro de agua potable. De acuerdo con el balance de agua realizado, la posibilidad de recirculación o reúso del agua residual, directa o indirectamente, debe evaluarse física, química y microbiológicamente.

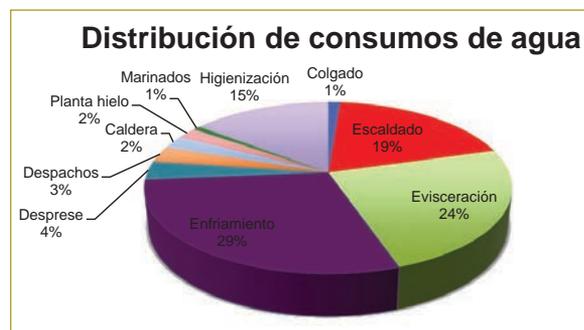
Consumos de aguas utilizadas

Los consumos porcentuales de agua en una planta avícola se muestran en la siguiente tabla (tabla 1).

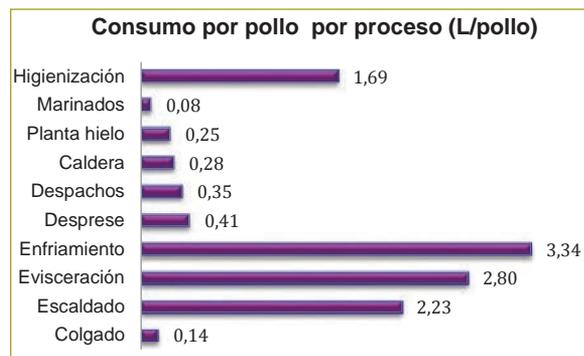
Tabla 1

Indicador	Valor (%)
Proceso de sacrificio	83
Proceso de Higienización	14,6
Caldera	2,4

Las etapas del proceso de pollos que consumen mayores volúmenes de agua son evisceración (24 %), enfriamiento (29 %), higienización (15 %) y escaldado (19 %), debido al enjuague y limpieza constantes de los equipos e instalaciones. El propósito de este enjuague es prevenir la acumulación de residuos en el piso y equipos. La remoción de la víscera, realizada por evisceración, muestra un gran consumo de agua y generación de aguas residuales con altas concentraciones de materia orgánica, grasas y aceites, nitrógeno y fósforo, que se derivan de las grasas y la sangre para unir el efluente a través del contacto con la carne interior, el sobrante y la piel.



A renglón seguido se muestra el consumo de agua por cada etapa del proceso, expresado en litros por pollo.



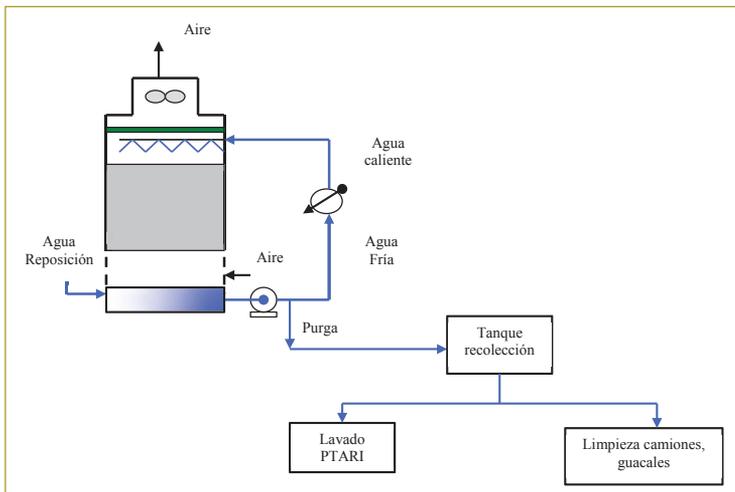
Dependiendo del tamaño de la planta y el nivel de automatización, tanto para el proceso de los pollos como para la higienización que se tenga, el consumo de

agua debe ser de 8 L/pollo, en promedio, de acuerdo con el programa de mejores prácticas en tecnología ambiental en el Reino Unido.

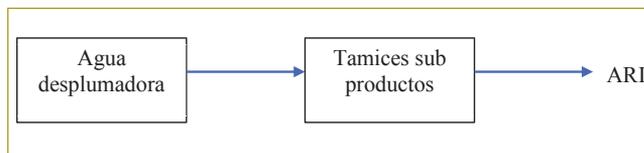
El agua producto de los procesos de lavado puede reutilizarse en otros que requieran una calidad menor de este líquido, como sucede en el enfriamiento, el transporte de materiales o en procesos de lavado.

Procesos de reúso de agua

1. Agua de condensadores evaporativos, que se destina para el lavado de camiones, guacales y limpieza de la PTAR.

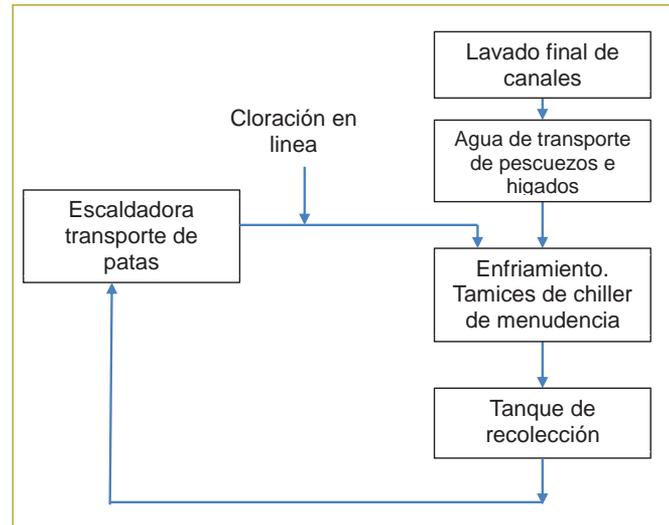


2. Agua desplumadora, para transporte de pluma a planta de subproductos.



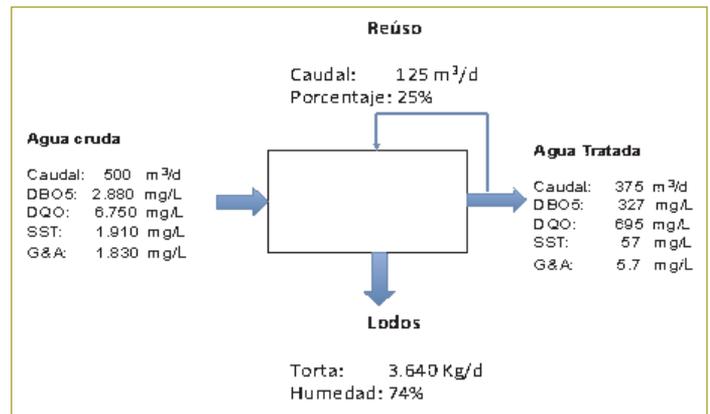
- Agua desplumadora, para refrigeración de dedos.
- Agua de evisceración, para escaldado de patas, pelado y transporte.
- Lavado final de canales (pollo), para transporte de pescuezo e hígados.

Circuito de reúso de agua de lavado final de canales



BALANCE GLOBAL DE AGUA

En el balance de agua se muestran claramente los consumos de agua, la carga contaminante y la producción de lodo, el cual es un subproducto para la fabricación de harina de carne animal, los porcentajes de reúso y la calidad final del agua. Este es un ejemplo típico de una planta de sacrificio de pollos.



CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL

De los componentes usualmente encontrados en estos efluentes, la sangre es considerada como la más problemática por su capacidad para inhibir la formación de flocs durante el proceso fisicoquímico en el tratamiento del agua residual y por su alto aporte de materia orgánica, expresada como DBO₅. El procesamiento de pollos genera alrededor de 0,5 L de sangre y 21 g de grasa por ave. También contiene elevadas concentraciones

de nitrógeno y fósforo derivado de la grasa, sangre, residuos de carne y piel (tabla 2).

Tabla 2

Parámetro	Unidades	Cruda	Tratada	Remoción (%)
pH	Unidades	7,1	6,37	N.A.
Aceites y grasas	mg/L	1830	5,7	99,6
DBO ₅	mg/L-O ₂	2880	327	88,6
DQO	mg/L-O ₂	6750	695	89,7
SAAM	mg/L	0,8	0,58	27,5
SST	mg/L	1910	57	97,0
Cloruros	mg/L		779	250
Sulfatos	mg/L		123	250
Nitratos	mg/L		0,3	Análisis y reporte
Nitritos	mg/L		0,024	Análisis y reporte
Fósforo	mg/L		1,7	Análisis y reporte

Los porcentajes de remoción son altos en los procesos primarios de tratamiento, pero parámetros como DQO y DBO₅ no cumplirían la Resolución 631 de 2015, que exige 650 y 300 mg/L, respectivamente; para lograrlo, es necesario complementar los sistemas de tratamientos actuales con sistemas biológicos, de los cuales existen muchas tecnologías.

SISTEMA DE TRATAMIENTO PROPUESTO PARA AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL

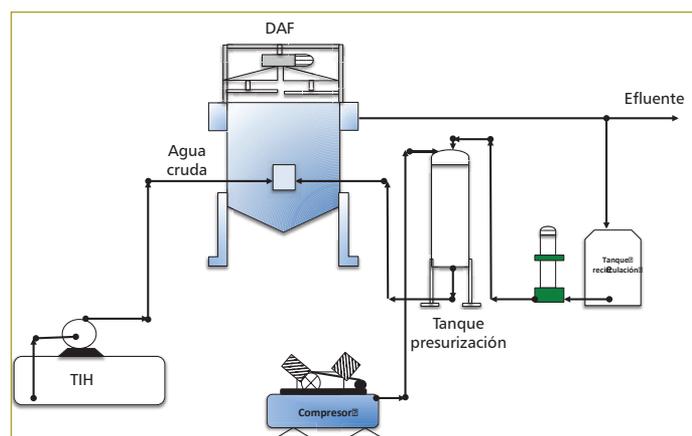
Las plantas de beneficio cuentan con sistemas de tratamiento de aguas residuales conformados por pre-tratamiento (tamices, trampas de grasas y tanque de igualación) y tratamiento primario (fisicoquímico). En los sistemas primarios muchas empresas cometen el error de instalar equipos sedimentadores, cuando por la misma naturaleza del lodo, por su alto contenido de grasa, es más fácil flotar que sedimentar. Son sistemas que generan arrastre de flocs e incumplimiento con la normatividad ambiental. Por nuestra experiencia hemos encontrado que los sistemas de flotación por aire disuelto (FAD) ofrece mejores resultados tales como, producción de lodo mas espeso, disminución de malos olores por la inyección de aire, aguas mejores clarificadas, remociones de sólidos suspendidos y grasas superiores al 90 %. También alcanzan remociones de

DQO entre el 60 y 85 %. Es muy importante seleccionar el coagulante adecuado para tratar este tipo de aguas. Productos como cloruro férrico (FeCl₃) son los que mejores resultados han logrado, acompañados de un buen polímero floculante aniónico, como se puede apreciar en las fotos siguientes.



Un sistema DAF está compuesto por:

- Tanque de flotación
- Tanque de presurización
- Compresor
- Bomba de recirculación



Las claves de un buen funcionamiento del sistema DAF son:

- Lograr una excelente coagulación y floculación, mediante la adición adecuada de cloruro férrico y polímero aniónico de alto peso molecular (FeCl₃: 300 mg/L y polímero: 2 mg/L).
- La formación de microburbujas en el tanque de presurización.

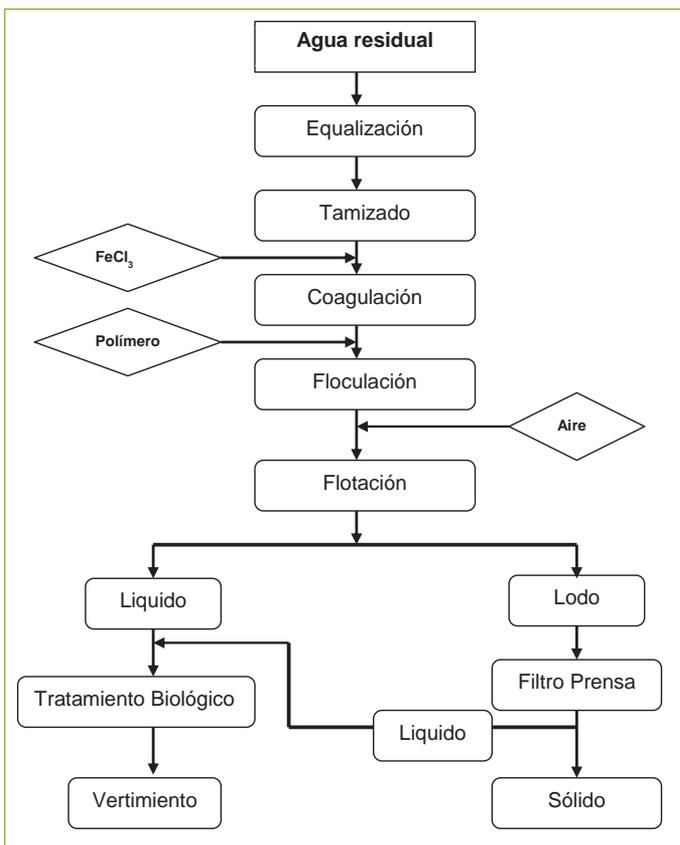
Para tener una mezcla exitosa del agua con el aire, se deben cumplir las siguientes claves:

- Mantener presión en el tanque de presurización entre 70 - 80 PSI.
- Recircular entre el 30 - 50 % del agua residual tratada.
- Mantener la interfase aire/agua en la mitad del vidrio nivel.
- Observar la formación de microburbujas como aparece en la botella.



Cuando la flotación de sólidos es bien ejecutada, el lodo sobre la superficie se separa del agua a través de un barredor. Este lodo es recolectado en un tanque para su acondicionamiento,

adicionándole poliácridamida catiónica, y luego se bombea a un equipo de deshidratación como es el filtro prensa. El lodo deshidratado es almacenado y utilizado como subproducto para la fabricación de alimento para animales, especialmente en el segmento de mascotas.



A pesar de alcanzar una excelente remoción de grasas y sólidos suspendidos, la DQO y DBO₅ aún estarían incumpliendo la normativa ambiental, por lo que se hace necesario complementar la PTAR con un sistema secundario biológico de lodos activados

Si se desea realizar un proyecto de reúso, se recomienda implementar un tratamiento terciario para el efluente del tratamiento secundario, utilizando procesos de ultrafiltración.

CONCLUSIONES

- Se identificaron las áreas de mayor consumo de agua: evisceración (24 %), escaldado (19 %), enfriamiento (29 %) e higienización (15 %) hacen el 87 % del consumo de agua de toda la planta.
- Actualmente, muchas compañías está reutilizando el 24 % de agua, pero pueden llegar al 35 % de reducción de agua por reúso; alcanzando el 35 % de reducción de consumo de agua potable en el proceso de beneficio, podrían llegar a tener un consumo per cápita de 8 L/ave.
- No es la cantidad de agua que se utilice, sino la presión apropiada la que garantiza que los pollos se mantengan limpios durante el faenamiento. El uso de boquillas atomizadoras es muy apropiado, su consumo es muy bajo (alrededor de 0,25 L/ave) y su efectividad es muy alta.
- Es vital recoger todo el material sólido (materia fecal, plumas, sangre coagulada, etc.), antes de lavar y no convertir el chorro de agua en escoba.
- Sistemas de flotación por aire disuelto (FAD) son mucho más eficientes que los clarificadores por sedimentación como tratamiento primario en aguas residuales provenientes del sacrificio de pollos.
- No es suficiente con tener sistemas primarios como FAD para tratar el agua residual, por lo que se requiere implementar sistemas secundarios biológicos para cumplir con la nueva normativa ambiental, la Resolución 631 de 2015.
- Sistemas biológicos como el MBR, que tiene un sistema de ultrafiltración incorporado, permiten lograr altísima calidad de agua que facilita el reúso del agua en procesos como caldera, enfriamiento y lavado de zonas sucias.

REFERENCIAS

- Avula, R., Nelson, H.M. & Singh, R.K. (2009). Review recycling of poultry process wastewater by ultrafiltration. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 10-18.
- Barbut, S.. *The science of poultry and meat processing*. Chapter 18. Waste treatment and by products. Guelph: University of Guelph.
- Cruz, J. (s.f.) Etapas del proceso de faenamiento de pollos.
- De Sena, R.F., Tambosi, J.L., Genena, A.K., Moreira, R. de F.P.M., Schröder, H.Fr. & José, H.J. (2009). Treatment of meat industry wastewater using dissolved air flotation and advanced oxidation processes monitored by GC-MS and LC-MS. *Chemical Engineering Journal*, 151-157.
- El sitio avícola (2014). Uso eficiente del agua en plantas de faenamiento.
- Environmental Technology Best Practice Programme (2000). Reducing Water and Effluent Costs in Poultry Meat Processing. Guide GG233.
- Fenavi (2016). *Guía ambiental para el subsector avícola*. Colombia.
- Hespanol Helena (2005). *Manual de conservación y reúso de agua en la industria*.
- Matsumura, E., Mierzwa, J.C. (2008). Review- Water conservation and reuse in poultry processing plant- A case study. *Resources, conservation and recycling* 38-355-345.
- Ministerio de Agricultura (2016). *Indicadores del sector avícola*. Colombia.
- Moreira, R., Andersen, S. & Genena, A. (s.f.) Water and wastewater management and biomass to energy conversion in a meat processing plant in Brazil. A case study.

Conceptos básicos y principales metodologías del diseño estructural para condiciones de incendio según normas internacionales, aplicadas al Reglamento Colombiano de Construcciones Sismorresistentes (NSR-10)

State of the Art in Colombia of the Structural Design for Fire Conditions Under the Colombian regulations for Earthquake Resistant Constructions (NSR10).
Background and Precedents

FABIÁN TORRES ZAFRA¹ - NANCY TORRES CASTELLANOS²

1. Ingeniero civil de la Universidad Católica de Colombia y especialista en Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Magíster en Estructuras y doctora en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales. Profesora asociada de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

fabian.torres@conestac.com - nancy.torres@escuelaing.edu.co

Recibido: 20/02/2018 Aceptado: 27/03/2018

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

<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

Entre los principales cambios que trajo la aplicación del reglamento NSR-10, se encuentra el incremento en la seguridad estructural que se les debe proporcionar a las edificaciones, la cual debería preverse desde el mismo inicio de los diseños tanto arquitectónicos como estructurales, para luego aplicarla en la construcción de éstas. Los cambios más notables que trajo la aplicación del reglamento NSR-10 se plasmaron en los títulos F (estructuras metálicas) y J (requisitos de protección contra incendios en edificaciones), en lo referente al diseño estructural para condiciones de fuego, tema integrado en especial para estructuras de acero (dada su vulnerabilidad ante esta acción). En la práctica del diseño estructural en Colombia, este diseño es novedoso, pues su finalidad radica básicamente en que la estructura no puede ser causante de pérdidas de vidas humanas al colapsar ante la acción del fuego.

En el presente artículo se pretende compilar los principales conceptos y premisas del diseño estructural para condiciones de incendio en Colombia (plasmados en la NSR-10), con base en las normas internacionales, y definiendo las metodologías de análisis del diseño estructural más usadas actualmente.

Palabras claves: seguridad estructural, requisitos de protección contra incendios, acción del fuego.

Abstract

In view of the great importance that the construction of civil works has taken for the Colombian economy, becoming as one of its main engines of development and then of the great events and tragedies by earthquake disasters at the global level, Colombian regulations governing the structural design were modified and updated from the Colombian Standards of Design and Construction of Earthquake Resistance - NSR98 (in force since the year of 1998 until 2010), to Colombian regulations of Earthquake Resistant Constructions NSR-10, effective since July 2010. This update and change of norms, applied as a law of the Republic, has brought important content and practical changes in the design and construction of civil works in the national territory, especially in buildings.

Among the main changes brought about by the implementation of the new regulation (NSR10) was the increase in the structural safety that should provide the buildings and which should be planned from the very beginning of both architectural and structural designs to be then applied in the construction of the same. The most notable changes brought by the implementation of the new regulation NSR10, were reflected in the titles F (metal structures) and J (fire protection requirements in buildings), in relation to the structural design for fire conditions, issue addressed especially for steel structures (given their vulnerability to this action). In the practice of structural design in Colombia, this design is novel, because its purpose basically lies on the fact that structures cannot cause human lives to be lost by collapsing as a result of fires.

Keywords: structural safety, fire protection requirements, action of fire.

GENERALIDADES DEL DISEÑO ESTRUCTURAL PARA CONDICIONES DE FUEGO

En la actualidad, para cualquier tipo de construcción en Colombia, cuyo uso principal esté basado en la concentración o reunión de personas a las que hay que preservarles la vida como fin primordial de la estructura (sea ésta un edificio de vivienda, de comercio o de uso recreativo), se deben cumplir las condiciones de seguridad estructural, incluida la resistencia a elevadas temperaturas producidas por el fuego en caso de incendio. Para satisfacer este objetivo se han de cumplir los valores de resistencia estructural ante las altas temperaturas (presentadas en caso de un incendio), e indicados en el Reglamento de Construcciones Sismorresistentes NSR-10.

El diseñador deberá brindar soluciones generadas por cálculos analíticos o criterios prescriptivos, partiendo de la base de contar con los conocimientos básicos sobre el comportamiento de la estructura ante el aumento de la temperatura al producirse un incendio, el cual afectará a la edificación tanto en los materiales que la componen como en la respuesta estructural ante la presencia de estos deltas máximos de temperatura.

CONCEPTOS BÁSICOS

La necesidad de protección de la vida y los bienes frente a los riesgos derivados del fuego hace que los ingenieros con conocimientos en protección contra el fuego tengan cada vez más demanda en diversos sectores, en especial en la construcción tanto de edificios como de obras de infraestructuras; sin embargo, a escala internacional el campo de acción se extiende también al transporte de pasajeros y de mercancías, la industria, el almacenamiento, la selección, ensayo y homologación de materiales y productos, la evaluación de la seguridad, de riesgos o daños, de sistemas de protección contra incendios tanto pasivos como activos, así como la elaboración de planes de evacuación, autoprotección y emergencia.

El ingeniero proyectista en Colombia es responsable de analizar, diseñar y poner en práctica la seguridad (basado en la estabilidad estructural) en un edificio, una industria o cualquier lugar donde haya riesgo para la vida humana en caso de un incendio. La seguridad en caso de incendios requiere conocer los sistemas que van apareciendo en el mercado (cada vez más avanzados tecnológicamente), así como toda la normativa aplicable en cada situación.

Entre los conceptos básicos del análisis estructural para condiciones de fuego plasmados en las normas internacionales y recopilados en la legislación colombiana, se destacan los siguientes:

- **Dinámica de incendios.** Es el estudio de los factores que influyen en el desarrollo y comportamiento de un incendio.
- **Protección contra incendios.** Conjunto de medidas que se disponen en las edificaciones para protegerlas contra la acción del fuego y con las que, generalmente, se trata de conseguir tres fines: salvar vidas humanas (premisa en la NSR10), minimizar las pérdidas económicas producidas por el fuego y conseguir que las actividades de la edificación puedan reanudarse en el plazo más corto posible.

MEDIDAS DE PROTECCIÓN

La protección de las estructuras ante la acción de altas temperaturas generadas por fuego se puede definir en dos tipos:

- **Tipo 1: Protección activa.** Es todo tipo de protección contra el fuego que consista en la instalación de mecanismos automáticos de detección y extinción de fuego, tales como detectores de humo con alarmas sonoras, sistemas de extinción con productos químicos, rociadores automáticos de agua o espuma, entre otros. De igual forma, las protecciones activas fundamentalmente se manifiestan en las instalaciones para extinción de incendios. Se dividen en varios tipos, básicamente detección, alerta y señalización, extinción o presurización de escaleras (ref. 2).
- **Tipo 2: Protección pasiva.** Es todo aquel conjunto de materiales o sistemas constructivos que al ser diseñados evitan la aparición de un incendio y su propagación, protegen a los elementos constitutivos de las edificaciones ante la acción del fuego y favorecen la extinción de este (ref. 2).

La protección pasiva también incluye todas las medidas que afectan al diseño o la construcción estructural de una edificación, en primer lugar, facilitando la evacuación de los usuarios presentes en caso de incendio mediante vías de suficiente amplitud, cuya estabilidad

estructural se encuentre garantizada, y en segundo término, retardando y confinando la acción del fuego para que no se extienda muy deprisa o se detenga antes de invadir otras zonas.

METODOLOGÍAS DE DISEÑO

Las metodologías de diseño estructural para condiciones de altas temperaturas originadas por el fuego (en caso de incendio) son conceptualmente similares al diseño estructural para condiciones de temperatura ambiente, aunque pueden presentar (según el tipo de metodología que se va a usar) un grado de mayor dificultad debido a diversos factores adicionales que hay que considerar, entre ellos las fuerzas internas inducidas por dilatación térmica, y la reducción de capacidad estructural debido a las temperaturas elevadas y las grandes deflexiones (ref. 3).

Diseño prescriptivo

La premisa de diseño se basa en definir un nivel aceptable de protección contra un fuego de diseño, cuantificado en términos de riesgos. Es un método de diseño básico que se fundamenta en la demostración de los criterios básicos generales de la normativa plasmada en el título J de las NSR-10 (ref. 4).

Diseño por prestaciones o desempeño

Un diseño estructural completo para condiciones de incendio, basado en prestaciones o desempeño, es un término que se refiere a una respuesta estructural óptima, dada por un elemento o conjunto de elementos de una edificación ante la acción de cargas o esfuerzos actuantes en ella (ref. 4).

Para el diseño basado en prestaciones o desempeño se necesita un nivel superior de habilidad en ingeniería por parte del equipo de diseño, comparado con el diseño prescriptivo tradicional. Se requiere un esfuerzo de ingeniería superior, que si bien puede afectar el costo del diseño, se acaba traduciendo en importantes ahorros al conseguir los niveles de seguridad solicitados, con base en las soluciones más económicas.

CONOCIMIENTOS BÁSICOS PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL EN CONDICIONES DE FUEGO

Desde el punto de vista normativo, la mayoría de los casos de análisis estructural suelen estar contemplados en los códigos internacionales, sean americanos o europeos (base de las NSR-10); por ello, para realizar tales estudios se deben seguir las directrices y metodologías indicadas en éstos, por lo que debe entenderse como un análisis dentro del marco normativo y cuyas principales bases conceptuales están definidas por los siguientes parámetros.

Severidad del incendio y resistencia al fuego

La mayoría de las edificaciones están conformadas por elementos constructivos, tales como muros de cerramientos, muros interiores y cubiertas, que son soportados por elementos o sistemas estructurales, ya sean aportados o por muros de carga. Para evitar el colapso de la edificación, los elementos estructurales deben tener una capacidad portante suficiente durante todo el desarrollo del incendio. En otras palabras, el fallo estructural ocurrirá si la carga aplicada excede la capacidad portante del conjunto en algún momento durante el incendio (ref. 3).

En estructuras sencillas, el colapso de un elemento conduce al colapso de toda la estructura. En estructuras más complejas es posible que éstas sobrevivan a un incendio, aun cuando uno o varios elementos hayan perdido su capacidad portante. Esto es algo que a temperatura ambiente no ocurre y se debe a las fuerzas interiores que aparecen como consecuencia de las interacciones de unos elementos con otros, inducidas por la dilatación térmica.

La directriz en el diseño de estructuras en situación de incendio consiste en verificar que la resistencia de la estructura (o parte de ella) sea superior a la severidad del incendio a la que dicha estructura está expuesta. Esta verificación requiere que se cumpla la siguiente ecuación de diseño:

$$\text{Resistencia al fuego} \geq \text{severidad del incendio}$$

La resistencia al fuego de la estructura es una medida de su capacidad para resistir el colapso, mientras que la severidad del incendio es una medida de su potencial destructivo que podría llegar a producir el colapso de la estructura.

El factor tiempo

El tiempo transcurrido hasta la falla o colapso de uno o varios elementos estructurales de una edificación representan el grado de resistencia al fuego de dichos elementos (*fire resistant rating*). Los grados de resistencia al fuego de los materiales constitutivos de los elementos estructurales están basados en ensayos a escala real, para los cuales se utiliza una exposición a un fuego de tipo estándar.

La duración de un incendio es lo que normalmente se especifica en las normativas de resistencia estructural para condiciones de fuego (títulos F y J de las NSR-10), como una medida del grado de severidad del incendio en cuestión. Cuando es dado por normas, está referido a un incendio tipo estándar o parametrizado (curva ISO834, en el caso colombiano).

Resistencia estructural ante el fuego

La resistencia al fuego (o grado de resistencia al fuego) normalmente se cuantifica como el tiempo en el que un elemento cumple un criterio definido durante la exposición a un ensayo estándar de resistencia al fuego (nominal). La resistencia al fuego de un elemento estructural también se puede cuantificar según la temperatura crítica o la capacidad portante máxima que puede llegar a soportar dicho elemento durante un incendio.

El grado de resistencia al fuego de un elemento (*rating*) es la resistencia al fuego asignada a ese elemento estructural, para comparar con la severidad del incendio especificada en las normas o códigos de diseño y comprobar su adecuación. El grado depende de muchos factores, siendo los principales la severidad del incendio, el material constitutivo, sus propiedades geométricas, los grados de libertad y las cargas aplicadas durante el incendio (ref. 3).

Ensayos de resistencia al fuego

Los ensayos de resistencia al fuego de los elementos estructurales no pretenden simular incendios reales. El propósito es proporcionar un método común que permita comparar la capacidad portante entre diferentes tipos de estructuras.

Los ensayos a escala real (que también pueden ser a pequeña escala) se llevan a cabo para elementos o par-

tes de una estructura (subestructura) representativa de las edificaciones, con el objeto de determinar su grado de resistencia al fuego, de tal modo que al instalar una estructura similar en un edificio real se les pueda asignar el mismo grado de resistencia al fuego.

Esto supone una simplificación muy importante y se aleja mucho de la realidad, ya que existen muchas diferencias entre el escenario de incendio del ensayo y el escenario de un incendio real. Normalmente, hay diferencias de tamaño entre las estructuras que hay que comparar, cargas aplicadas, condiciones de contorno (grados de libertad) y tipos de fuego al que están expuestas.

En este tipo de ensayos se presenta un problema con respecto a las cargas aplicadas, debido a que todo elemento al que se le exige cumplir con un criterio de estabilidad frente al fuego se debe ensayar con la acción de la carga aplicada. Los elementos ensayados sin carga conducen a resultados no seguros, ya que no permiten valorar el efecto de las deformaciones por la acción del incendio. De hecho, el nivel de carga sobre un elemento estructural durante un incendio real puede tener un efecto clave en su rendimiento o capacidad portante (ref. 3).

Criterio de colapso

Para alcanzar las condiciones de estabilidad, un elemento estructural debe mantener su capacidad portante por la acción de las cargas aplicadas durante el tiempo del ensayo o del incendio, sin producirse el colapso.

El estándar para muchos ensayos es tener una limitación de la deformación o una limitación en la velocidad a la que se produce la deformación, de tal forma que se detenga el ensayo antes de que se produzca el colapso de la estructura y pueda dañar el horno de pruebas. Un criterio de fallo común es limitar la deformación a 1/20 de la luz/envergadura o también limitar la velocidad de deformación a 1/30 de la luz/envergadura.

Por lo que se ha descrito, en los procedimientos de cálculo estructural en situación de incendio establecidos especialmente en el Eurocódigo y, por lo tanto, en las NSR10, se contemplan diversas opciones de análisis, que permiten utilizar modelos de cálculo estructural de tipo simplificado o modelos de cálculo de tipo avanzado, a partir de acciones térmicas generadas por fuegos nominales o por acciones térmicas calculadas a

partir de los parámetros físicos y químicos generados por fuegos reales.

COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES ESTRUCTURALES A TEMPERATURAS ELEVADAS EN SITUACIÓN DE INCENDIO

Para una correcta aplicación de los criterios del diseño estructural para condiciones de fuego, es indispensable conocer el comportamiento de los materiales utilizados en la construcción ante la incidencia de las altas temperaturas sobre ellos, sean éstos de piedra, madera, acero, concreto o cerámicos, entre otros.

Cuando los materiales se encuentran en su estado puro, es decir, no disponen de ningún tipo de protección o revestimiento, sufren de un modo más incisivo la acción del fuego; por ejemplo, el acero es, por lo general un elemento que, sometido a las temperaturas de un incendio, constituye por sí mismo un riesgo considerable; el calor se expande rápidamente en él, y cuando el material sustenta cargas, presenta con facilidad colapsos en su estructura.

Con el incremento de temperaturas también se desarrollan otros comportamientos adversos, como la expansión excesiva y la plastodeformación progresiva acelerada. Sin embargo, los parámetros de diseño importantes a temperaturas normales son equivalentes a los parámetros que deben tomarse en cuenta para elevadas temperaturas. A continuación se presentarán las afectaciones más importantes a que pueden verse sometidos los elementos estructurales, dependiendo del material.

El acero estructural

Este material estructural se implementó desde el siglo XIX, especialmente en la construcción de puentes, edificios, y hoy en día debido a su gran versatilidad en todo tipo de construcciones y edificaciones. El acero es un buen conductor del calor, una de las formas clásicas de la transmisión del calor (conducción), debido a que el hierro (elemento mayoritario en la composición del acero), como metal que es, posee electrones libres, lo que puede propagar el calor fácilmente a través de elementos contruidos con este material (vigas, columnas o paneles), originando nuevos focos térmicos que expanden el área de calor a una nueva combustión (ref. 1).

El acero estructural pierde dos tercios de su resistencia inicial, en proporción al aumento y dirección de la carga a la cual se somete, comenzando por pandear y ceder, con el consiguiente arrastre del resto de los elementos portantes de la construcción. Cuando una viga de acero cede, y ésta forma parte de un armazón estructural, se producirá simplemente un desplome local; dentro de la importancia de oponerse o resistir al incendio en conjunto, se comprende la necesidad de dotar a estos elementos estructurales de una protección acorde con su naturaleza o condiciones.

Concreto reforzado

Por su parte, el concreto reforzado, implementado desde finales del siglo XIX, es uno de los desarrollos más importantes del hombre. El concreto con respecto al fuego tiene por lo general una buena resistencia, la cual se define por el periodo de tiempo en que mantiene su comportamiento ante las temperaturas que se observan en el espectro de un incendio. En relación con la tracción y la flexión, las resistencias del concreto ante el fuego son las más afectadas. En cambio, esta acción es mucho menor en la resistencia a la compresión, estableciendo en términos generales una reducción en la resistencia a compresión de un 80 % a unos 800 °C. Ante un incendio, incluso aquellos materiales considerados tradicionalmente como incombustibles (concreto) no son lo bastante seguros contra el fuego. Si se considera que en un incendio se alcanzan fácilmente 600 °C a los 10 minutos de su inicio, y los 1200 °C a los 20 minutos, se comprende que incluso el concreto no es absolutamente seguro. A los 1000 °C la grava se disgrega y el cemento se deshidrata. Si se mantiene una temperatura de entre 1000 y 1200 °C durante un tiempo aproximado de tres horas, los efectos del fuego sobre el concreto serán, con toda seguridad, nefastos. Los elementos de concreto se disgregan a una velocidad de unos 4 cm por hora y las armaduras a estas temperaturas, dejan de cumplir su función.

El concreto ante la presencia de altas temperaturas, aunque lentamente, puede desintegrarse hasta su total destrucción, incluyendo la corrosión de su armadura (ref. 5).

La madera

Este material, por su fácil adquisición, se ha utilizado mucho a lo largo de la historia de la humanidad, con finalidades ya sean estructurales o arquitectónicas. Ante un incendio, la madera, como elemento estructural, posee la peculiaridad de absorber gases y vapores sin experimentar daños aparentes, si bien transcurrido un tiempo la madera puede desprender progresivamente los ácidos absorbidos, clorhídrico y cianhídrico, entre otros.

La madera, al estar construida básicamente por celulosa, constituye un elemento muy combustible y en ciertas condiciones, al carbonizarse, puede proporcionar integridad razonable en un incendio. Las dimensiones físicas y el contenido de humedad son factores elementales para reconocer la influencia en la resistencia al fuego (ref. 6).

Materiales de bajo poder comburente

Hay muchos más materiales usados en la construcción de edificaciones diferentes del acero, concreto y madera, que representan un volumen alto o una buena superficie. Las particiones no portantes de carga, acabados, materiales de aislamiento y servicios son parte importante para considerar en el análisis de edificios para el caso de incendio, donde hay materiales que pueden ser térmicamente inertes, o incombustibles, tales como el vidrio, el yeso, el concreto liviano, el asbesto y la mampostería (ref. 6).

Vidrio

Se utiliza elementalmente como cristal de puertas y ventanas, como aislamiento en la fibra de vidrio y como refuerzo para productos de construcción. Como protector ante altas temperaturas, la fibra de vidrio es un aislante excelente de calor dado que no se quema rápidamente ni es un buen transmisor de éste; sin embargo, aunque se encuentra cubierto con un aglomerante resinoso, combustible y con la capacidad de propagación de llamas, es un proceso de propagación lento y por lo tanto se le considera como material protector y retardante en caso de un incendio (ref. 6).

Yeso

Los productos que contienen este elemento son muy buenos materiales para la protección contra incendios (el mortero y los paneles de yeso, por ejemplo). Químicamente, el yeso tiene una proporción alta de agua mezclada, por lo que se requiere una elevada energía para evaporar el agua. Por lo anterior, se considera uno de los materiales retardantes de bajo costo de gran efectividad.

Concreto liviano

Este material, elaborado con agregados incombustibles, resiste altas temperaturas sin degradarse. Los concretos livianos más comunes son la vermiculita y la perlita (ref. 6).

Asbesto

Corresponde a una fibra mineral que era protagonista de la mayor parte de las construcciones. Antes se empleaba como aglutinante y formaba un muy buen agente ignífugo pero actualmente, por motivos de salubridad, está prohibido su uso.

Mampostería

Los productos que la componen, como el ladrillo, la baldosa y el concreto, muestran un buen comportamiento frente a un incendio. Los bloques huecos tienen una facilidad de rotura cuando son sometidos a altas temperaturas, manteniendo sin embargo su integridad. En cambio, el ladrillo tolete o refractario puede soportar altas temperaturas y no sufrir daños graves.

SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA EL FUEGO DE ESTRUCTURAS DE ACERO

Diferentes sistemas de protección contra el fuego comúnmente utilizados en estructuras de acero son barreras antitérmicas de tipo pasivo, ya sean aplicadas por aspersión o instaladas sobre los elementos que hay que proteger (ref. 7).

Sistemas de aplicación por aspersión de materiales resistentes al fuego

Estos sistemas, llamados SFRM (*Sprayed Fire Resistive Materials*, por su sigla en inglés), se pueden clasificar en dos grupos básicos: a base de fibra o cementantes (ref. 8). A pesar de lo que sugieren estas categorías, un cemento Pórtland a base de yeso o cemento proporciona cohesión a ambos tipos de SFRM. Entre los principales sistemas de protección por aspersión se encuentran los siguientes:

SFRM fibrosa

Este sistema con fibras, creado por la fusión de roca o escoria de hierro y los materiales en hilado de la lana, produce una masa filamentosa ligera con propiedades incombustibles. La aplicación de materiales fibrosos SFRM consta de una mezcla de agentes adhesivos y fibras en seco, con agua en la boquilla de la manguera, que luego se rocía echando el material mezclado para cubrir el elemento que se va a proteger. La ASTM-C1014 normaliza este tipo de protección.

SFRM cementantes

Por lo general, contienen minerales de yeso que brindan protección contra incendios para elementos estructurales a través de la liberación de yeso, combinando químicamente el agua en forma de vapor. También se proporciona una protección adicional mediante la inclusión de vermiculita o perlita como agregados, que se expanden y aíslan térmicamente en condiciones de calentamiento extremo. Los SFRM cementantes se preparan mezclándolos en una tolva y se aplican bajo presión en una boquilla de pulverización.

Cartones minerales

Es un conjunto compuesto por placas mediante el hilado de fibras minerales y lanas comprimidas con roca volcánica y resinas. Estas placas forman barreras resistentes al fuego, constituyendo un sello hermético alrededor de los elementos estructurales. Los tableros de fibra mineral tienen la ventaja de que pueden ponerse en condiciones climáticas exteriores y no se ven afectados significativamente por las condiciones de la superficie del acero que están protegiendo. Esto per-

mite que el cartón pueda colocarse en lugares donde es difícil el acceso, o para reequipar las condiciones de protección contra el fuego de un elemento estructural. La ASTM-C612 especifica los requerimientos, los límites de temperatura, densidad y condiciones térmicas relevantes, dadas las características físicas de los tipos de placas estándar.

Recubrimientos intumescentes

Son películas químicas finas que incluyen una mezcla de aglutinantes, resinas, cerámica refractaria y rellenos. Estas películas se expanden a elevadas temperaturas y forman una duradera y adherente capa de espuma celular resistente al fuego. La capa de espuma actúa como un disipador de calor apreciable durante la intumescencia, y luego, como un aislante razonable, le proporciona a la película calidades estéticas deseadas, a la vez que brinda protección contra la humedad, la abrasión y los productos químicos. Los revestimientos se ponen de manera similar a la pintura, y pueden aplicarse con rodillos, pinceles o equipo de pulverización. Algunas aplicaciones requieren el uso de una malla de refuerzo de fibra de vidrio entre capas de recubrimientos intumescentes. El espesor del revestimiento puede ser variable y tener clasificaciones de resistencia al fuego de hasta tres horas.

Sistemas tipo barrera de materiales resistentes al fuego

En la guía de diseño de este tipo de protección, publicada por el Instituto Americano de la Construcción en Acero (AISC, por su sigla en inglés) (ref. 1), se sugiere que se desprece el aporte de la resistencia de estos sistemas a la estabilidad estructural del edificio, siempre y cuando ésta no aumente más de un 15 % al colocar el mecanismo protector; sin embargo, su peso siempre debe cuantificarse al estimar las cargas de servicio permanentes de la estructura. Al considerar la capacidad estructural conjunta del elemento metálico y su mecanismo de protección contra el fuego en el diseño estructural, se debe asegurar la efectividad de la unión entre ambos. Entre los principales sistemas de protección tipo barrera se encuentran:

Protección sólida

Se rodea el elemento estructural con concreto corriente o de baja densidad, presumiendo que el concreto no cumple función estructural, sino que sólo aporta resistencia al fuego al ser aplicado como aislante del acero ante la acción de éste. El espesor del recubrimiento de concreto dependerá de la resistencia al fuego requerida para el elemento estructural. El concreto es moldeado mediante el encofrado (AISC, 2003) (figuras 1 y 2). Esta solución también es posible de aplicar dejando los elementos de acero parcialmente expuestos (por ejemplo, aplicando concreto sólo en el interior de las alas), lo que reduce el uso de encofrado.



Figura 1. Elemento recubierto con protección sólida.

Fuente: AISC, 2003.

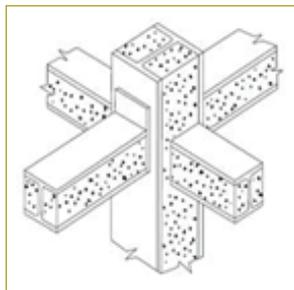


Figura 2. Elemento recubierto parcialmente con protección sólida.

Fuente: AISC, 2003.

Recubrimientos con mampostería

Esta solución, aplicada frecuentemente en las construcciones de fines del siglo XIX en Chicago, se utiliza a menudo en protección de columnas. Consiste en cubrir el elemento estructural con una pared de bloques de mampostería (figura 3). Dentro de la mampostería de protección se han generado nuevas alternativas, como bloques de concreto celular, bloques de concreto corriente, paneles premoldeados de concreto y bloques con fibra de vidrio.

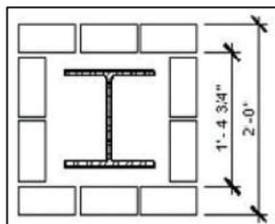


Figura 3. Protección con mampostería.

Fuente: AISC, 2003.

Recubrimiento con láminas

El recubrimiento con paneles en forma de cajón en torno a los elementos de acero es una solución aplicada cada vez con mayor frecuencia (figura 4). Normalmente, se utilizan planchas de yeso-cemento normal o con agregados que mejoran su resistencia al fuego (muchas veces denominadas planchas RF), o variantes de éstas, como los paneles con adición de fibrosilicatos. El recubrimiento puede ser parcial o en todo el contorno. La combinación de sulfato de calcio con el agua en estas placas retrasa el paso del fuego a través de ellas (AISC, 2003). El dimensionamiento del recubrimiento dependerá de las características del panel que se va a utilizar y de la resistencia al fuego requerida para el elemento estructural.

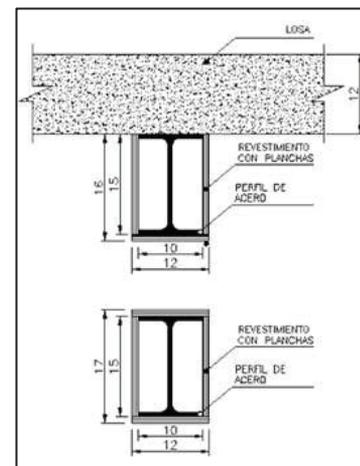


Figura 4. Protección con paneles.

Fuente: AISC, 2003; www.Construmatica.com.

Morteros

Existen diversas soluciones de aplicación de morteros, ya sea tradicionales o con aditivos (como perlita o vermiculita), que se aplican siguiendo el contorno de

los perfiles que hay que proteger y que mejoran sensiblemente su resistencia al fuego.

Debido al riesgo para la salud, en muchos países ya está prohibido el uso del asbesto, que se aplicó ampliamente a mediados del siglo pasado, pero que terminó remplazado por el mortero. En el caso de aplicaciones tradicionales, se deben considerar mallas o elementos de anclaje mecánico que mejoren la adherencia entre el mortero y el acero. También se aplica en forma de *spray* o mortero proyectado. El espesor del recubrimiento dependerá de las características del mortero que se va a utilizar y de la resistencia al fuego requerida para el elemento estructural. Como generalmente es lanzado, su acabado es rugoso (figura 5).



Figura 5. Protección contra fuego con mortero.

Fuente: AISC, 2003; www. Construmatica.com.

Mantas protectoras

Existen mantas de fibra cerámica y de lana de roca (lana mineral) que se pueden aplicar como recubrimiento semejante al tipo cajón o de contorno de perfiles. En aplicaciones de contorno se fijan mecánicamente al elemento de acero mediante tacos soldados y arandelas, a una distancia no superior a 300 mm en todos los sentidos. Aplicaciones tipo cajón son más económicas, pero no deben usarse en perfiles de almas superiores a 150 mm sin el empleo de una malla auxiliar de fijación que evite las deformaciones y apertura de los encuentros o empalmes.

Pinturas o masillas intumescentes

Son pinturas inertes a bajas temperaturas pero que reaccionan a temperaturas superiores a los 200 °C,

generando una película protectora en forma de esponja que aumenta hasta 50 veces su espesor inicial y otorga una importante aislación térmica que mejora la resistencia al fuego del elemento protegido (ref. 8). En algunos países la aplicación de las pinturas intumescentes está limitada a un cierto rango de resistencia al fuego exigible y a una masividad mínima del elemento que hay que proteger (figura 6).



Figura 6. Aplicación sobre una estructura de la pintura intumescente.

Fuente: Scherwin-Williams, "Pinturas intumescentes", 2012.

Relleno de miembros huecos

Con frecuencia se puede aprovechar el espacio interior de los perfiles tubulares para rellenarlos con elementos que actúen como masa térmica, absorbiendo parte de la energía del calor proveniente del incendio. Hay experiencias con concretos, concreto celular e incluso agua (en este último caso, asociado a sistemas de circulación y enfriamiento del agua) (figura 7).

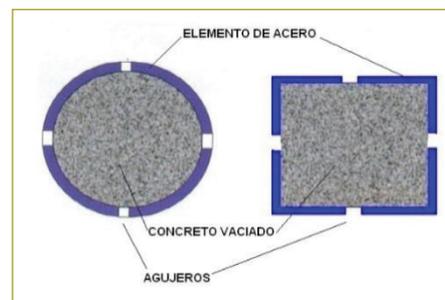


Figura 7. Protección contra incendio con relleno de concreto.

Fuente: AISC, 2003.

Sistemas estructurales para resistencia al fuego

En general, los riesgos de incendio provienen del interior de las edificaciones, por lo que se deben cuidar especialmente las estructuras que están confinadas al

espacio interior. Una solución interesante es llevar la estructura soportante (o parte de ella) al exterior del edificio, limitando o reduciendo los requerimientos de protección pasiva. Unida a esta estrategia se puede agregar el concepto de pantallas.

Pantallas. Las pantallas interiores o perimetrales de un edificio, así como los cielos falsos, ofrecen la oportunidad de aportar protección frente al fuego en la medida en que puedan asegurar la integridad, el aislamiento y la estabilidad del conjunto. Se usan, generalmente, en edificios de baja altitud y con estructura expuesta (figura 8).



Figura 8. Protección con pantallas.

Fuente: <http://www.arquitecturaenacero.org>, 2011.

PROTECCIÓN ESTRUCTURAL CONTRA EL FUEGO EN COLOMBIA

La NSR-10, en el título J (ref. 9), señala los requisitos de protección contra el fuego en edificaciones; sin embargo, en el título F, referente a estructuras metálicas, impone premisas básicas pero obligatorias del diseño de la protección contra el fuego en estructuras metálicas. Los requisitos dados en las NSR-10 para la protección contra el fuego se basan en reducir en la medida de lo posible el riesgo de incendios en edificaciones, evitar la propagación del fuego tanto dentro de las edificaciones como en las estructuras aledañas, facilitar las tareas tanto de evacuación de los ocupantes de las edificaciones en caso de incendio como el proceso de extinción del fuego y, finalmente, minimizar el riesgo de colapso de la estructura durante las labores de evacuación y extinción.

La terminología dada por la ingeniería de fuego generó nuevas expresiones y conceptos, a los cuales el cuerpo de ingenieros y constructores colombianos no estaban acostumbrados, por lo cual se presentaron confusiones, dado que la tecnología de punta del diseño de la resistencia estructural para condiciones de fuego es aún muy incipiente en el país.

En cuanto a los principales requisitos para el análisis de la resistencia contra incendios en las edificaciones según las NSR-10, el diseñador estructural debe clasificar la edificación conforme a diferentes conceptos, tales como grupos de ocupación (tabla 1) y tipo de función que ha de cumplir la edificación.

Tabla 1
Grupos y subgrupos de ocupación

Grupos y subgrupos de ocupación	Clasificación
A	ALMACENAMIENTO
A-1	Riesgo moderado
A-2	Riesgo bajo
C	COMERCIAL
C-1	Servicios
C-2	Bienes
E	ESPECIALES
F	FABRIL E INDUSTRIAL
F-1	Riesgo moderado
F-2	Riesgo bajo
I	INSTITUCIONAL
I-1	Reclusión
I-2	Salud o incapacidad
I-3	Educación
I-4	Seguridad pública
I-5	Servicio público
Grupos y subgrupos de ocupación	Clasificación
L	LUGARES DE REUNIÓN
L-1	Deportivos
L-2	Culturales y teatros
L-3	Sociales y recreativos
L-4	Religiosos
L-5	De transporte
M	MIXTO Y OTROS
P	ALTA PELIGROSIDAD
R	RESIDENCIAL
R-1	Unifamiliar y bifamiliar
R-2	Multifamiliar
R-3	Hoteles
T	TEMPORAL

Fuente: NSR-10, título J.1.1.2.

La normativa colombiana NSR-10, en su título J, se acoge a los modelos prescriptivos y prestacionales, e implementa requisitos generales tales como las configuraciones arquitectónica, estructural, eléctrica

e hidráulica necesarias para determinar la protección adecuada contra incendios en edificaciones, así como las especificaciones mínimas que deben cumplir los materiales utilizados con el propósito de dar protección contra la propagación del fuego en el interior de la edificación y a las estructuras aledañas (tabla 2).

Tabla 2

Clasificación de los materiales según sus características de propagación de llama

Clase	Materiales
1 Índice de propagación de la llama 0 a 25	<ul style="list-style-type: none"> • Pañetes de cemento. • Cartón de fibrocemento. • Fibroasfalto. • Placas planas de fibrocemento. • Placas planas de fibrosilicato. • Ladrillo. • Baldosas de cerámica. • Lana de vidrio sin aglutinantes ni aditivos. • Vidrio. • Algunos azulejos antiacústicos.
2 Índice de propagación de la llama 26 a 75	<ul style="list-style-type: none"> • Hoja de aluminio sobre respaldo apropiado. • Cartón de fibra o yeso con revestimiento de papel. • Madera tratada mediante impregnación. • Algunos pañetes antisonoros. • Algunos azulejos antiacústicos.
3 Índice de propagación de la llama 76 a 225	<ul style="list-style-type: none"> • Madera de espesor nominal de 2,5 cm o más. • Planchas de fibra con revestimiento a prueba de fuego. • Azulejo antiacústicos, combustible, con revestimiento a prueba de fuego. • Cartón endurecido. • Algunos plásticos.
4 Índice de propagación de la llama Más de 225	<ul style="list-style-type: none"> • Papel asfáltico. • Tela. • Viruta. • Superficies cubiertas con aceite o parafina. • Papel. • Plásticos, sin grado que permita asignarlos a otras clases. • Algodón.

Fuente: NSR-10, título J.2.5.2.

Como en otras normativas, la NSR-10 prescribe en sus literales del título J (ref. 9) las características de propagación de llama o fuego de los materiales que se han de utilizar en los acabados interiores; en especial, hace énfasis en no emplear materiales que al ser expuestos al fuego produzcan, por descomposición o combustión, sustancias tóxicas en concentraciones superiores a las

provenientes del papel o de la madera, en las mismas condiciones.

El concepto de resistencia requerida al fuego define las edificaciones en función de los grupos de ocupación divididos en tres categorías, según el riesgo de pérdida de vidas humanas o amenaza de combustión (tabla 3).

Tabla 3

Clasificación requerida del índice de propagación de llama para acabados interiores, de acuerdo con el grupo de ocupación de cada edificación

Grupo de ocupación Medios de salida Normales Corredores	Ubicación del acabado interior				
	Espacios con áreas < 170 m ²	Corredores	Espacios con áreas > 170 m ²	Espacios con áreas > 170 m ²	
ALMACENAMIENTO	(A-1)	1	1	2	3
	(A-2)	1	1	2	3
COMERCIAL	(C-1)	1	1	3	3
	(C-2)	1	1	2	3
ESPECIAL	(E)	1	1	2	2
FABRIL E INDUSTRIAL	(F-1)	1	2	2	2
	(F-2)	1	2	2	3
INSTITUCIONAL	(I-1)	1	1	2	2
	(I-2)	1	1	2	2
	(I-3)	1	1	2	3
	(I-4)	1	2	2	3
	(I-5)	1	2	3	3
LUGARES DE REUNIÓN	(L)	1	1	2	2
MIXTO Y OTROS	(M)	1	1	2	3
ALTA PELIGROSIDAD	(P)	1	1	2	2
RESIDENCIAL	(R-1)	2	2	4	4
	(R-2)	1	1	2	2
	(R-3)	1	1	2	2
TEMPORAL	(T)	1	2	3	3

Fuente: NSR-10, título J.2.5.

De igual manera cada tipo de edificación debe clasificarse en una de las categorías de riesgo (según su grupo de uso) (tabla 4), en función del área construida (tabla 5) o en función del potencial combustible estimado (tabla 6).

La resistencia al fuego especificada por los códigos modelo e implementados en la NSR-10 depende de la carga de fuego y de la altura y finalidad de la construcción. Las reglamentaciones se basan en dos conceptos, en los cuales debe ser posible evacuar a todos los ocu-

pantes de la edificación o que el incendio se extinga autónomamente sin causar ninguna catástrofe, aun si los bomberos no son capaces de hacerlo.

Tabla 4

Clasificación según categoría de riesgo de pérdida de vidas humanas o riesgo de combustión

Categoría	Grupo de edificaciones
I	Edificaciones con mayor riesgo de pérdida de vidas humanas o con alta amenaza de combustión
II	Edificaciones de riesgo intermedio
III	Edificaciones con baja capacidad de combustión

Fuente: NSR-10, título J.3.3.1.

Tabla 5

Clasificación de resistencia contra el fuego de una edificación, según su uso, área construida y número de pisos

Grupos y subgrupos de ocupación	Área total construida, AT m ²	Número de pisos						
		1	2	3	4	5	6	≥ 7
(C-1)	AT > 1500	III	III	II	II	II	I	I
	AT < 1500	III	III	III	II	II	II	I
(C-2)	AT > 500	II	I	I	I	I	I	I
	AT < 500			II	I	I	I	I
(E)	Sin límite	III	III	III	II	II	II	I
(I-2), (I-4)	AT > 1000	III	II	II	I	I	I	I
	500 < AT < 1000	III	III	II	II	I	I	I
	AT < 500	III	III	III	II	II	II	I
(I-3)	AT > 1000	II	II	I	I	I	I	I
	AT < 1000		III	II	II	I	I	I
(L-1), (L-2), (L-3), (L-4)	AT > 1000	II	I	I	I	I	I	I
(L-5), (I-1), (I-5)	500 < AT < 1000	II	II	I	I	I	I	I
	AT < 500	III	III	II	II	I	I	I
(R-1), (R-2)	Unidades > 140 m ²				II	I	I	I
	Unidades ≤ 140 m ²				III	II	II	I
(R-3)	AT > 5000	III	II	I	I	I	I	I
	AT < 5000	III	II	II	II	I	I	I

Fuente: NSR-10, título J.3.3.2.

En cuanto a las excepciones de las estructuras que no requieren cuantificación de la resistencia al fuego dadas en el literal J.3.3.3, se definen para edificaciones aisladas

de un solo piso en general y limitadas a dos (excepto cuando almacenan materiales altamente inflamables), según su uso, área o ventilación, siempre y cuando se cumpla la finalidad de preservar la vida humana, logrando que los ocupantes pueden salir del edificio fácil y rápidamente. De acuerdo con las NSR-10, las edificaciones de dos o tres pisos requieren una resistencia al fuego baja si son residenciales, pero si la edificación corresponde a un hospital o a un hotel, la resistencia al fuego debe considerarse como criterio de diseño.

Tabla 6

Clasificación de resistencia contra el fuego de una edificación, según su uso, densidad de carga de combustible y número de pisos

Grupos de ocupación de las edificaciones	Potencial combustible Cc (MJ/m ²)	Requieren protección				
		Número de pisos				
		1	2	3	4	≥ 5
(A-1), (A-2)	CC > 8000	II	II	I	I	I
	4000 < CC < 8000	III	II	II	I	I
	CC < 4000	III	III	III	II	I
(F-1), (F-2)	CC > 8000	I	I	I	I	I
	4000 < CC < 8000	II	II	I	I	I
	2000 < CC < 4000	III	II	II	I	I
(P)	CC > 8000	III	III	II	II	I
	4000 < CC < 8000	II	I	I	I	I
	CC < 4000	III	II	II	I	I

Fuente: NSR-10, título J.3.3.2.

CONCLUSIONES

La implementación de la NSR-10 en Colombia trajo complicaciones para la realización de proyectos en acero con respecto a la evaluación del diseño para condiciones de incendio, dado que para estos análisis se debe tener un conocimiento del comportamiento estructural de las edificaciones ante la acción del fuego, al igual que un conocimiento de los procedimientos matemáticos y físicos, base de este tipo de diseño.

Debido a que el ingeniero estructural formado en Colombia no posee los conocimientos requeridos para este tipo de diseño (en ningún pénsum de las universidades colombianas se ha contemplado en estudios de pregrado o posgrado este campo del análisis estructural), al implementarse las normas plasmadas en el literal

F.2.18 de las NSR-10, se generó un gran vacío tanto académico como implementativo de esta ley.

En el diseño por fuego regido por la NSR-10 (en especial para las estructuras de acero), se implementaron en sus títulos F y J varios códigos simultáneamente, como las normas europeas (Eurocódigos) y las normas americanas (ASTM e ISO). Esto generó un problema de aplicación de códigos internacionales, dado que lo que se permite en los Eurocódigos no necesariamente se permite en los códigos americanos.

Debido al desconocimiento de las metodologías de diseño para condiciones de incendio, se está presentando a escala nacional una práctica deficiente del diseño estructural para edificaciones de acero, en la que se evita el diseño obligatorio requerido en el literal F.2.18 y se aplican literales del título J en diseños prescriptivos simplificados.

El diseño estructural para condiciones de fuego no debe ser un factor desfavorable para el uso de estructuras de acero, dado que un análisis bien hecho optimiza la estructura y no necesariamente implica un mayor peso y costo económico de la edificación.

RECOMENDACIONES

Al implementar códigos internacionales en la legislación estructural colombiana, se debería tener conciencia de que su aplicabilidad y su uso en la comunidad estructural nacional han de tener un tiempo de desarrollo para conocerlos y aplicarlos bien. Por lo tanto, se recomienda desarrollar programas institucionales en estudios de pregrado y posgrado, en los que se actualicen los conocimientos de análisis estructural vigentes en el ámbito internacional que han de aplicarse a escala nacional, facilitando la adquisición y actualización de conocimientos de este grupo de profesionales.

REFERENCIAS

- National Fire Protection Association (1995). *Preface - Handbook of Fire Protection Engineering*. Massachusetts.
- Aroztegi, J. (2001). *Construcción segura al fuego*. Madrid.
- Instituto Técnico de la Estructura en Acero (ITEA) (2006). *Construcción segura al fuego*. Madrid.
- Eurocódigo (2006) (EC2-2004, EC3-2005, EC4-2005, EC5-2004, EC6-2005, EC9-1998).
- Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, A.C. (1999). *Estructuras de concreto resistentes al fuego*. México, D.F.
- National Fire Protection Association (1995). *General provisions. Handbook of Fire Protection Engineering*. Massachusetts.
- Sika (2009). *Manual técnico*. Sistemas de protección contra el fuego. Bogotá.
- Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10. NSR-10. Títulos F y J, Bogotá, D.C.

Difusión del conocimiento aplicativo y tecnológico para el desarrollo de métodos analíticos bioquímicos, como la extracción y purificación de proteínas

Applied and technological knowledge transmission to develop analytical biochemical methods, such as protein extraction and purification

DIANA ALEXANDRA OSPINA RIAÑO

Docente catedrática del Departamento de Ciencias Naturales de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

diana.ospina@escuelaing.edu.co

Recibido: 26/02/2018 Aceptado: 01/04/2018

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

Resumen

La proposición de nuevos tratamientos, alternativas diagnósticas y herramientas clínicas de última generación se ha soportado en rigurosas técnicas bioquímicas. Una de estas técnicas es la extracción y purificación de proteínas, la cual ha servido para elucidar múltiples mecanismos biológicos y postular diversas conclusiones de interés médico y científico. La rigurosidad de la técnica y sus respectivos subprocesos (aislamiento, extracción, purificación e identificación) permiten la presentación de resultados verificables o reproducibles y que, por lo tanto, representan aportes significativos al avance de la ciencia. La rigurosidad técnica en procesos de conocimiento de base es ideal en la investigación moderna y se deben inculcar en las aulas académicas desde las esferas más básicas del conocimiento.

Palabras claves: proteínas, purificación, aislamiento, metodología, técnica de laboratorio, investigación, bioquímica, biotecnología, bioclínica.

Abstract

The proposal of new treatments, diagnostic alternatives, and cutting-edge clinical tools has been supported by rigorous biochemical techniques. One of these techniques is the extraction and purification of proteins, which has served to elucidate multiple biological mechanisms and postulate various conclusions of medical and scientific interest. The rigor of the technique and its respective subprocesses (isolation, extraction, purification, and identification) allow the presentation of verifiable or reproducible results and that, therefore, represent significant contributions to the advancement of science. The technical rigor in basic knowledge processes is ideal in modern research and should be fostered in academic classrooms from the most basic spheres of knowledge.

Keywords: proteins, purification, isolation, methodology, laboratory technique, research, biochemical, biotechnology, bioclinical.

La sociedad moderna exige desarrollos progresivos, no sólo en áreas de procesos industriales. Es bien sabido que las propuestas investigativas y tecnológicas derivan en desarrollos sólidos y sostenibles. (1) *Ad portas* de cambios significativos en los ámbitos investigativo y académico, se hace necesario entender cómo muchas propuestas investigativas no sólo se orientan a dar solución a procesos industriales. El auge de los procesos biotecnológicos, bioclínicos y biomédicos ha alcanzado grandes avances en otros países (2), donde la aplicabilidad en diversas áreas de la salud y la bioingeniería se ha visibilizado ampliamente, valiéndose de fundamentos básicos de bioquímica para explorar nuevos escenarios prometedores e innovadores. De hecho, la proposición de nuevos tratamientos, alternativas diagnósticas y herramientas clínicas de última generación se ha soportado en rigurosas técnicas bioquímicas (3), con el fin de ser aptas para su publicación en revistas científicas internacionales de alto impacto. Una de las técnicas más exploradas en estas publicaciones científicas es la extracción y purificación de proteínas.

La razón por la cual esta técnica se ha convertido en el procedimiento más versátil del laboratorio es sencilla: las proteínas son moléculas de suma importancia en cualquier organismo, porque son las que cumplen la mayoría de los trabajos dentro de la célula, tales como la estructura, la función y la regulación de tejidos y órganos en el cuerpo (4). Y aunque han permitido develar innumerables empleos biológicos y farmacológicos, es de notar que algunas dudas metodológicas surgen en las aulas e incluso se trasladan a los laboratorios de investigación. Estas dudas que aún se deben resolver son cómo lograr difundir este conocimiento teórico en lo aplicativo y lo práctico, cómo desarrollar en el joven investigador y estudiante capacidades potenciales de interés en dichos métodos analíticos y cómo rescatar de ellos su implicación en la exploración del conocimiento actual.

En muchos trabajos publicados incluso en revistas de alto impacto, la veracidad de los resultados arrojados se pone en tela de juicio cuando se intentan reproducir las técnicas desarrolladas y publicadas (5). La razón es la falta de integración de conocimiento teórico y el ejercicio práctico de laboratorio. Los estudiantes en principio no discernen de qué manera el análisis de lo teórico puede influir en sus diseños experimentales, y es trabajo del investigador asesorarlo y dirigirlo en la integración

de estas variables (6). Por ejemplo, ciertos resultados extraídos de estas técnicas no serían posibles y representarían un fracaso procedimental si ejercicios iniciales y sencillos que provienen de los principios teóricos no se establecen como patrón práctico en cualquier diseño experimental. De hecho, la purificación de proteínas, una de las técnicas ampliamente utilizadas en todo diseño experimental del área bioquímica, puede arrojar resultados desvirtuados por la poca o baja reproducibilidad de éste (7). Y este problema está precisamente relacionado con la evasión de las estrategias básicas en el aislamiento, la extracción o la identificación.

La purificación proteica debe tener en cuenta, en primera instancia, la elección del método correcto para el aislamiento y la extracción de la fuente proteica; esto implica conocer la naturaleza, la procedencia y el comportamiento de la proteína en todos los medios. Si no se conoce de antemano, se pueden cometer diversos errores experimentales que alteren la veracidad de los resultados obtenidos por medio de estas técnicas.

La definición de un ensayo idóneo y esencialmente útil para la identificación de la proteína también es importante, puesto que, si se desconoce el método que favorecerá la determinación correcta, se puede incurrir en la pérdida de muestra obtenida, costos elevados innecesarios en el análisis, sin mencionar la baja capacidad o baja resolución que un método no apropiado puede representar en la identificación. Y, finalmente, centrar la atención en el análisis que permitirá definir qué tan exitoso fue el proceso de extracción y purificación. Es decir, qué tanto se obtuvo de la proteína en cuestión y qué tan pura se encuentra para realizar los respectivos estudios que, publicados o no, tendrán un impacto en la acumulación de conocimiento. La lógica y la consecución de todas estas operaciones representarán una alternativa para ahorrar tiempo en futuras investigaciones del mismo laboratorio o en otros grupos de investigación que hagan trabajos similares, siempre y cuando el método sea preciso y, sobre todo, reproducible.

Existen además diferentes métodos de purificación de proteínas. Uno de los adagios más populares de la bioquímica es nunca desgastar pensamientos puros en proteínas impuras (7). Por eso, hacer uso de los diversos métodos para purificar es el primer paso en cualquier estudio de éstas. Se encuentran, por ejemplo, en la bibliografía desde los métodos más sencillos, por simple fraccionamiento, esto es, modelos que utilizan la sepa-

ración sencilla diferencial (9), hasta las más complejas, que emplean el acople de técnicas analíticas modernas, como la cromatografía o espectrometría de masas. Claro está que para purificar una proteína, como ya se mencionó, es clave extraerla en forma correcta a través de procedimientos que permitan estabilizar la proteína térmicamente y por medio de soluciones tampón que inhiban su destrucción debido a cambios de pH (8). En muchos de estos procedimientos se utilizan inhibidores de proteasas (enzimas que degradan las proteínas).

Una vez que se logre conservar su integridad se purifican mediante métodos de separación, los cuales no son fáciles, pues son procedimientos usados para separar un extracto crudo que puede contener muchos componentes de interés o no. Para ello se utilizan por lo general estrategias de unión antígeno-anticuerpo que favorecen la unión por afinidad de la proteína de interés o la precipitan para separarla de otros componentes de poco interés (9).

Otra estrategia experimental se presenta en las técnicas cromatográficas, que permiten la separación física de los extractos crudos al eluirse sobre una fase estacionaria. Estas técnicas pueden incluir el principio de exclusión molecular, el cual se emplea para separar proteínas de acuerdo con el tamaño de las moléculas. Una segunda opción es el método de afinidad, relacionada con la unión de grupos funcionales que favorecen también la separación de moléculas no afines, y finalmente por intercambio iónico, relacionado con la correspondencia de cargas eléctricas.

Posteriormente, para determinar que en efecto se obtuvo sólo la proteína de interés, debe hacerse un monitoreo que permita confirmar el éxito de la purificación. La estrategia más utilizada para realizar este monitoreo es la electroforesis (8), una técnica que aprovecha la carga eléctrica neta que exhiben las proteínas, pues al someterlas a un campo eléctrico, las proteínas migrarán adicionalmente en función de su peso molecular característico. Algunos de los sistemas electroforéticos más utilizados son las condiciones nativas, a condiciones desnaturizantes o reductoras, o bien la electroforesis bidimensional (10).

Finalmente, se concluye el procedimiento en algunas ocasiones con combinaciones de técnicas más analíticas y automatizadas, que permiten la posterior caracterización de la proteína y, además, determinar la cantidad de proteína extraída y purificada. Estos métodos son muy

exactos, de amplia resolución cuantitativa y cualitativa, y permiten la identificación clara de la proteína de interés (11). De hecho, actualmente se están proponiendo protocolos más versátiles y complejos en los que se hace uso avanzado de métodos moleculares para aislar y purificar proteínas (12).

La práctica de cada uno de los pasos de este proceso previamente descrito representará gran valor procedimental, y la veracidad de los resultados dependerá de un diseño experimental sólido y riguroso. Desconocer alguna de estas técnicas puede generar errores que desfavorezcan o desvirtúen los resultados valiosos obtenidos. Pero ¿cómo difundir este ejercicio metodológico en el laboratorio? ¿Cómo integrar lo teórico en lo aplicativo y práctico? ¿Cómo rescatar de ellos su implicación en investigación?

Lograr que técnicas de este tipo se lleven a cabo correctamente en un laboratorio y que esto se instaure como ejercicio rutinario de un grupo de investigación no siempre es factible, más aún si la realidad de nuestros laboratorios en términos financieros es tan diferente de la de centros de investigación y universidades en otros países (13). En nuestro escenario actual, conseguir los recursos necesarios para suplir a un laboratorio de materiales y reactivos que soporten técnicas bien estandarizadas y diseñadas no es tarea fácil. Y desde ese principio se cometen errores experimentales que pueden impedir el sano desarrollo de trabajos de gran potencial para ser publicados.

Si ya de por sí el escenario no es alentador en términos financieros, por lo menos sí debe hacerse un gran esfuerzo para favorecer el entendimiento práctico y teórico de estas técnicas, metodologías y procedimientos, lo cual implica un esfuerzo no sólo por involucrar la investigación en la academia sino por acercar la ciencia a lo cotidiano y dejar de estigmatizarla como algo inalcanzable. De esta manera, se promueven capacidades de excelencia investigativa en los estudiantes, se fortalecen capacidades prácticas y se incorpora el conocimiento teórico a los ensayos de laboratorio, dándoles fuerza y soporte epistemológico a los resultados obtenidos. De esto se esperarían artículos dignos de revisión internacional y que converjan en trabajos de calidad y de impacto investigativo, lo cual llevaría a generar cadenas de autosostenibilidad del conocimiento.

REFERENCIAS

1. Barbier, E. & Markandya, A. (1990). *Sustainable development economics and environment in the third world*. David Pearce, Londres: Earthscan Ltd.
2. Indicadores del desarrollo mundial (IDM) [internet]. Washington, DC, World Datta Bank, sept 2016. [consulta marzo de 2018], The World Bank Annual Report, 67 páginas, disponible en <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/24985>.
3. Velázquez, R. (2009). *Manual de prácticas de bioquímica clínica*. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, pp. 4-6.
4. Biblioteca Nacional de Medicina [internet]. Genetics home reference, Rockville Pike USA, 2018 [consultado marzo 2018], disponible en <https://ghr.nlm.nih.gov/primer/howgeneswork/protein>.
5. McMillan, V. (1996). *Writing Papers in the Biological Sciences*, 5th ed. Boston, New York: Colgate University Statistics Consultant, Robert Arnold Colgate University Library Consultant, Charles F. Priore Jr. Carleton College and St. Olaf College Bedford/ST. Martin's, pp. 71-80.
6. III Congreso Internacional de Nuevas Tendencias en la Formación Permanente del Profesorado. Barcelona, 5, 6 y 7 de septiembre de 2011. Aprendizaje reflexivo y formación permanente.
7. Berg, J.M., Tymoczko, J.L. & Stryer, L. (2002). *Biochemistry*, 5th ed. New York: WH Freeman, section 4.1 - Protein Isolation and Purification Information.
8. Voet, D., Voet, J. & Pratt, C. (2007). *Fundamentos de bioquímica*. Madrid: Ed. Médica Panamericana, pp. 105-107.
9. Roca, P., Oliver, J. & Rodríguez, A. (2004). *Bioquímica: técnicas y métodos*. Palma: Editorial Hélice, Facultad de Ciencias Universidad de las islas Baleares, pp. 217-219.
10. Magdeldin, S., Shymaa, E., Yoshida, Y., Bo Xu, Ying Zhang, Zureena, Z. et al. (2014). Basics and recent advances of two dimensional-polyacrylamide gel electrophoresis. *Clin Proteomics* (1): 16. doi: 10.1186/1559-0275-11-16.
11. Urban, P.L. (2016). Quantitative mass spectrometry. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 374 (doi:10.1098/rsta/374/2079).
12. Eschenfeldt, W.H., Lucy, S., Millard, C.S., Joachimiak, A. & Mark, I.D. (2009). A Family of LIC Vectors for High-Throughput Cloning and Purification of Proteins. In: S.A. Doyle (ed.). *High Throughput Protein Expression and Purification. Methods in Molecular Biology*, vol 498. Humana Press.
13. Unibiblos (2004). *Biotecnología para no biotecnólogos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Dolly Montoya Castaño (ed.), 350 pp.

Factibilidad de una instalación solar fotovoltaica residencial, según la Ley 1715 y la Resolución CREG 121 del 2017

Feasibility of a residential photovoltaic solar installation, according to Law 1715 and Resolution CREG 121 of 2017

NATALIA PASCUAS ARAÚJO¹ - ANDRÉS FERNANDO SALVADOR PERILLA¹ -
EDWIN JOHJAN QUIROGA GUERRERO¹ - JAVIER ANDRÉS RUIZ GARZÓN² -
DANIEL JOSÉ GONZÁLEZ TRISTANCHO²

1. Estudiantes del programa de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
2. Profesores del programa de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

natalia.pascuas@mail.escuelaing.edu.co - andres.salvador@mail.escuelaing.edu.co - edwin.quiroga-g@mail.escuelaing.edu.co - javier.ruiz@escuelaing.edu.co - daniel.gonzalez@escuelaing.edu.co.

Recibido: 01/03/2018 Aceptado: 03/04/2018

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

Resumen

Este artículo trata sobre un caso de estudio presentado para la implementación de un sistema fotovoltaico de autogeneración a pequeña escala en una vivienda ubicada en la ciudad de Bogotá. Para determinar el tamaño óptimo de la instalación se utilizó como criterio el mayor rendimiento financiero, según lo establecido en la Ley 1715 y la Resolución 121 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). La evaluación financiera se hizo usando el costo unitario de prestación del servicio eléctrico, reglamentado por la Resolución 121, mientras que la factibilidad de la instalación se analizó utilizando RETScreen. El mejor rendimiento financiero se logró al instalar un medidor horario de energía y seguir los trámites para exención del IVA.

Palabras claves: energía solar fotovoltaica, autogeneración a pequeña escala, fuentes no convencionales de energías renovables, FIT (*Feed-In Tariff*).

Abstract

In this article a case study is presented for the implementation of a small scale self-generation photovoltaic system in a house located in the city of Bogotá. To determine the optimal size of the facility, the highest financial performance was used as a criterion, as established in Law 1715 and Resolution 121 of the Energy and Gas Regulation Commission. The financial evaluation was implemented using the unit cost of providing the electric service, regulated by resolution 121, while the feasibility of the installation was analyzed using RETScreen. The best financial performance was achieved by implementing an hourly energy meter in the installation and following the procedures for IVA exemption.

Keywords: photovoltaic solar energy, small-scale self-generation, non-conventional sources of renewable energies, FIT (*Feed-In Tariff*).

INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de promover la utilización de fuentes no convencionales de energía —principalmente las de carácter renovable— en el sistema eléctrico nacional, se le confirió a la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) la elaboración de normas para la remuneración de excedentes que generen autogeneradores de pequeña escala.

En el ámbito internacional, varios países han implementado métodos para avanzar en la inclusión de las tecnologías limpias, con el objetivo de reducir niveles de contaminación y fortalecer este nuevo tipo de economía. Los sistemas de apoyo, que muchos países han usado para activar la generación y consumo a partir de fuentes no convencionales de energía renovable, están definidos por dos criterios (Bustos, 2005):

- La inversión inicial.
- La generación de excedentes, donde se encuentran las tarifas o primas reguladas, cuotas o certificados verdes, subastas de energía, incentivos fiscales, etc.

El alcance general de la implementación de mecanismos de apoyo para generación con fuentes no convencionales de energías renovables (FNCER) se basa en los siguientes aspectos (UPME, 2015):

- Bajar los costos de administración.
- Fomentar la confianza de los inversores.
- Promover costos de fabricación más bajos.
- Reducir el precio para los consumidores de energía.
- Garantizar una alta absorción del mercado.
- Cumplir con el mercado eléctrico y con otros instrumentos de política.
- Mejorar los beneficios para energía eólica y otras energías renovables en los ámbitos local y regional.
- Aumentar la aceptación pública de las tecnologías renovables.

Colombia, un país con diversidad de ecosistemas, cuenta con un gran potencial para desarrollar energías limpias a partir del agua, el viento, el sol, residuos de biomasa (caña de azúcar, aceite de palma), entre otros, como se evidencia en los atlas interactivos del Ideam (Ideam, 2015).

La producción de energía eléctrica en el país es baja en emisiones de carbono comparada con países que

tienen mayor participación de combustibles fósiles; sin embargo, la alta dependencia del potencial hidroeléctrico hace que eventos naturales, como el fenómeno del Niño, pongan en riesgo el continuo suministro de energía eléctrica en el país. Por ello surge la necesidad de diversificar la matriz energética y abrir una oportunidad a nuevos desarrollos energéticos.

El gobierno tiene la necesidad de reducir la dependencia en combustibles importados y la presión de atender incrementos en la demanda mediante nueva capacidad instalada con base en recursos domésticos; también hay un riesgo asociado a la energía hidroeléctrica por el incremento en el precio del kWh que ha tenido el mercado de energía en años anteriores debido a sequías provenientes del fenómeno del Niño y al aumento en los precios de la electricidad y el gas natural.

En el año 2010, el Mercado de Energía Mayorista (MEM) estableció a través de su Resolución 18-0919 de 2010 (MME, 2010) metas indicativas para lograr un incremento de 6,5 % en la participación de energía no convencional para el año 2020. Con el aprovechamiento de los recursos disponibles en el territorio nacional, tales como los vientos de velocidades medias a 9 m/s, 450.000 TJ/año por residuos de biomasa y una irradiación solar de 194 w/m², aproximadamente (UPME, 2015), y las tecnologías probadas internacionalmente, habría tendencia a que en Colombia se considerara la utilización de estas fuentes no explotadas.

Algunas estrategias que países como Alemania, Chile, Brasil, Estados Unidos (el estado de California, específicamente) han optado durante los últimos quince años para la implementación de las FNCER (UPME, 2015), han sido los mecanismos de apoyo basados en la inversión inicial y la generación de excedentes. En la tabla siguiente se describen el mecanismo usado, sus ventajas, desventajas, duración y riesgo, información que da un punto de referencia para la inclusión de las FNCER en Colombia (tabla 1).

El estudio se realiza en una vivienda localizada en el barrio Normandía de la ciudad de Bogotá, en la cual se pretende instalar una solución de autogeneración fotovoltaica. Para esto se consideran escenarios que afectan su óptimo dimensionamiento con base en la viabilidad financiera, por medio del programa computacional RET-Screen, tales como el uso del medidor de energía horaria y la inscripción del proyecto en los organismos correspondientes, con el fin de obtener exención tributaria.

DESCRIPCIÓN DE LOS MECANISMOS DE APOYO IMPLEMENTADOS EN UNA INSTALACIÓN DE MENOS DE 0,1 MW EN COLOMBIA

Con el objeto de implementar el empleo de energías renovables en el sector residencial en Colombia por medio de los mecanismos de apoyo, se toma como caso base una casa residencial familiar ubicada en el barrio Normandía, con un consumo medio de energía anual de 5 MWh, a la cual se le instalarán paneles solares. A partir de estas condiciones, la CREG estableció un marco legal para los dos mecanismos principales con el fin de incentivar este tipo de energías, los cuales son el FIT y los incentivos fiscales, que se describirán a continuación.

Feed-In Tariff (FIT)

Este mecanismo fija una tarifa de compra durante un periodo mínimo de diez años y la vida útil del proyecto, siendo un mecanismo atractivo para recuperar la inversión y obtener un beneficio económico para un periodo medio.

Las tarifas son fijadas por la Resolución CREG 012 de 2017 para autogeneradores menores de 0,1 MW (CREG 012 de 2017), la cual establece que:

- El comercializador integrado con el operador de red tiene la obligación de recibir los excedentes ofrecidos por el autogenerador.
- El autogenerador con capacidad menor o igual que 0,1 MW, que instale un sistema de medición de fronteras de generación, debe cumplir con las características establecidas por la Resolución 038 de la CREG (CREG 038 de 2014).
- El autogenerador que entregue sus excedentes al comercializador integrado al operador de red, además del precio de venta, recibirá un beneficio económico en reconocimiento de la utilidad que este tipo de medición brinda al sistema.

El comercializador que recibe la energía es responsable de la liquidación y la facturación, incorporando información detallada de consumos, exportaciones y cobros, entre otros. También tiene la obligación de informar en cada factura, de manera individual, los valores según el segmento que corresponda.

La facturación de la energía consumida se determina con base en el costo unitario de prestación del servicio (\$/kWh) (CREG 119 de 2007):

$$CUv_{n,m,i,j} = G_{m,i,j} + T_m + D_{n,m} + Cv_{m,i,j} + PR_{n,m,i,j} + R_{m,i} \quad (1)$$

Donde:

i es el i -ésimo comercializador, j es el j -ésimo mercado de comercialización, n es el n -ésimo nivel de tensión, y m es el m -ésimo mes. Mientras que $G_{m,i,j}$ es el costo de compra de energía en \$/kWh, T_m es el costo por uso del STN en \$/kWh, $D_{n,m}$ es el costo por el uso del sistema de distribución \$/kWh, $Cv_{m,i,j}$ es el margen de comercialización, $PR_{n,m,i,j}$ es el costo de compra, transporte y reducción de pérdidas de energía, y $R_{m,i}$ es el costo de restricciones y servicios asociados con generación en \$/kWh.

Para las exportaciones de energía, la Resolución CREG 121 del 2017 (CREG 121 de 2017) establece el cálculo de la valorización del excedente del autogenerador ($VE_{i,j,n,m}$), por medio de dos criterios: sin medidor y con medidor horario:

- Para el caso sin medidor horario, los autogeneradores que utilizan fuentes no convencionales de energía renovable con capacidad instalada menor o igual que 0,1 MW.

$$VE_{i,j,n,m} = (\text{Exp}1_{i,j,n,m-1} - \text{Imp}_{i,j,n,m-1}) \times CUv_{n,m,i,j} - (\text{Exp}1_{i,j,n,m-1} - Cv_{m,i,j}) + (\text{Exp}2_{i,j,n,m-1} - PB_{m-2}) \quad (2)$$

$\text{Exp}1_{i,j,n,m-1}$ es la sumatoria de la exportación de energía del autogenerador durante cada hora del periodo, en kWh. Esta variable puede tomar el valor entre cero y $\text{Imp}_{i,j,n,m}$.

$\text{Imp}_{i,j,n,m-1}$ es la sumatoria de la importación de energía del autogenerador durante cada hora del periodo, en kWh.

$CUv_{n,m,i,j}$ es el componente del costo unitario de presentación del servicio en \$/kWh. En usuarios no regulados, es el costo del servicio pactado.

$\text{Exp}2_{i,j,n,m-1}$ es la sumatoria de la exportación de energía del autogenerador durante cada hora del periodo, en kWh. Esta variable supera el $\text{Imp}_{i,j,n,m-1}$.

PB_{m-2} es el precio de bolsa promedio horario mensual, en \$/kWh, calculado sin tener en cuenta los valores que superan el precio de escasez ponderado.

- Para el caso con medidor horario, los autogeneradores que utilizan fuentes no convencionales de energía renovable con capacidad instalada menor o igual que 0,1 MW.

$$VE_{(i,j,n,m)} = \left(\text{Exp}1_{i,j,n,f-1} - \text{Imp}_{i,j,n,m-1} \right) \times CUy_{n,m,i,j} - \left(\text{Exp}1_{i,j,n,f-1} \times Cv_{m,i,j} \right) + \left(\text{Exp}2_{i,j,n,m-1} \times PB_{m-2} \right) + \left[\left(\text{Exp}1_{i,j,n,f-1} + \text{Exp}2_{i,j,n,m-1} \right) \times \text{beneficios} \right] \quad (3)$$

Donde:

$$\text{Beneficios} = 0,5 \times \left(Rr_{m-1,i} + PR_{n,m-1,j} \right) \quad (4)$$

$Rr_{m-1,i}$ son los costos de restricciones y servicios asociados a la generación en \$/kWh, incluidas en la variable $Rr_{m,i}$, Resolución CREG 119 de 2017 (CREG 119 de 2007). En este costo no se incluye ninguno distinto del de restricciones del sistema.

$PR_{n,m-1,i,j}$ son los costos de gestión de pérdidas de energía trasladables al usuario final, expresados en \$/kWh, se determinarán de conformidad con la siguiente expresión, que incluye:

- a) El costo de las pérdidas eficientes de energía.
- b) Los costos del transporte de las pérdidas eficientes de energía.

Incentivos fiscales

Para Colombia, la Ley 1715 (UPME, 2014) promueve “la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, estableciendo el marco legal y los instrumentos para la promoción, desarrollo y utilización de las fuentes no convencionales de energía (FNCE), en especial las de carácter no renovable, en el SIN (Sistema Interconectado Nacional), mediante su integración al mercado eléctrico”. La ley busca fomentar un ahorro y beneficio en la preinversión e inversión en cuanto a los equipos, elementos, maquinaria y servicios de importación.

Anexo a esta ley, el Decreto 2143 (MME, 2015) define los lineamientos para la aplicación de estos incentivos y define las exclusiones que se van a realizar, las cuales son:

- **Exclusión de IVA.** El Decreto 2143 (MME, 2015), capítulo VIII, sección 3, artículo 2.2.3.8.3.1, establece: “Estarán excluidos del IVA la compra de equipos, elementos y maquinaria, nacionales o importados, o la adquisición de servicios dentro o fuera del territorio nacional que se destinen a nuevas inversiones, con la certificación emitida por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales de equipos y servicios excluidos del impuesto”. Con base en este artículo y aplicándolo al territorio nacional, el IVA es del 19 % para los elementos mencionados anteriormente.
- **Régimen de depreciación acelerada.** El Decreto 2143 (MME, 2015), capítulo V, artículo 2.2.3.8.5.1, dice: “Aquellos generadores que generen a partir de FNCE y realicen nuevas inversiones en maquinaria, equipos y obras civiles, adquiridos o construidos con posterioridad a la vigencia de la Ley 1715 de 2014, exclusivamente para las etapas de preinversión, inversión y operación proyectos de generación a partir de FNCE, podrán aplicar el incentivo de depreciación fiscal acelerada”. Se podrá tomar en la parte contable, hasta una tasa anual global del 20 %.
- **Deducción sobre el impuesto de renta y complementarios.** El Decreto 2143 (MME, 2015), capítulo VIII, sección 2, Artículo 2.2.3.8.2.1, dice: “Los contribuyentes declarantes del impuesto sobre la renta y complementarios que realicen directamente nuevas erogaciones en investigación, desarrollo e inversión en el ámbito de la producción y utilización de energía a partir de FNCE o gestión eficiente de la energía, y obteniendo previamente la certificación de beneficio ambiental que expide el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible”, tendrán derecho a deducir hasta el 50 % del valor de las inversiones (el valor máximo a deducir por periodo gravable en ningún caso podrá ser superior al 50 % de la renta líquida del contribuyente, antes de restar la deducción).

CASO DE ESTUDIO

Para analizar qué tan factible económicamente es la implementación de una instalación de generación por medio de paneles fotovoltaicos para una vivienda ubicada en la ciudad de Bogotá de menos de un 0,1 MW y basándose en la Resolución CREG 121 de 2017 (CREG 121 de 2017), la cual propone los incentivos

Tabla 1
Comparación de los mecanismos de apoyo para inclusión de FNCER en varios países

PAÍS	INCENTIVO	DURACIÓN	VENTAJA	DESVENTAJA	RIESGO
ALEMANIA (Jankowska, 2014)	Feed-In Tariff (FIT)	A partir del 2000	Garantiza retribución a la actividad de producción durante un periodo específico de años.	El gobierno ha reducido el FIT, se disminuye la incorporación de nueva capacidad en los últimos años.	En los últimos años, los sistemas FIT en Alemania han sido uno de los modelos reconocidos por su estabilidad (muy bajo).
AUSTRALIA (Talberg & Swoboda, 2013)	Largescale Renewable energy target (LRET)/Small-scale Renewable energy certificates (SREC)	A partir del 2011	Flexibilidad para alcanzar los objetivos/metás.	La desventaja que se presenta es en la parte técnica, dado que la red podría sobrecargarse porque varios productores están inyectando energía al sistema.	Este país ha mantenido este tipo incentivo por varios años, adicional a eso Australia trabaja con otros mecanismos que sirven de soporte a las tecnologías renovables (muy bajo).
BRASIL (Aneel, 2015)	Programa de Incentivos a las Fuentes Alternativas (Proinfa)	A partir del 2002	Establece un monto pagado por electricidad comprada, costos administrativos y cargos de contratación con la Empresa Brasileña de Energía Eléctrica (Electrobras).	Los numerosos trámites que hay que hacer para conseguir la financiación, el trato con organismos públicos, la obtención de licencia ambiental y otros procesos administrativos retrasan y hacen más costosos los proyectos.	La capacidad eólica de Brasil pasó de cerca de 22 MW a los 414 MW instalados. Esto se debe en gran parte al esfuerzo de Proinfa (muy bajo).
CALIFORNIA (Estados Unidos) (Union of Concerned Scientists, 2016)	Renewables Portfolio Standard (RPS)	A partir del 2002	Desde que se creó el programa RPS en 2002, se han construido más de 200 proyectos de generación de energía renovable dentro del estado. Casi tres cuartas partes de estos proyectos se construyeron en condados con altos niveles de desempleo: 6% o más.	Los reguladores en California retuvieron recientemente la mayor tarifa de medición neta existente para los nuevos clientes de medición neta y pusieron en marcha un proceso para rediseñar las tarifas residenciales, con lo que se espera reducir el atractivo económico de los sistemas eléctricos solares distribuidos.	Este tipo de mecanismos que aplica California incorpora Feed-In Tariff, subastas y contratos para energía solar que han establecido una dinámica transparente (muy bajo).
CHILE (Sauma, 2012)	Instrumentos fiscales (Ley 20.257)	A partir del 2008	Establece una obligación para las empresas eléctricas con capacidad instalada superior a 200 MW que efectúen retiros de energía desde los sistemas eléctricos, con el fin de comercializarla con distribuidoras o clientes finales, de certificar ante la Dirección de Peajes del Centro de Despacho Económico de Carga (CDEC) que una cantidad equivalente de 10 % proviene de medios de generación renovable no convencionales, ya sea propios o contratados.	Las tecnologías de energías renovables no convencionales (ERNC) poseen características intrínsecas que hacen que el riesgo que enfrentan los generadores en un sistema de cuota difiera, dependiendo de la tecnología de ERNC empleada.	El costo en el caso de Chile para generar electricidad con ERNC es muy alto respecto a las fuentes no renovables y por ello puede que esta ley no solvente bien este riesgo (medio)
CHINA (Ming, Ximei, & Xue Song, 2013)	Feed-In Tariffs	A partir del 2005	La implementación de categorías respecto a las tarifas por el uso de ERNC, donde las áreas con mejores recursos renovables tendrán tarifas más bajas, mientras que aquellas con menores producciones podrán acceder a aranceles más generosos.	La infraestructura de la red de la nación presenta dificultades para hacer frente a los avances y producción de equipos para la producción de ERNC.	Ayuda a evitar la expansión y dependencia a los altos subsidios, reduciendo el costo del consumo de electricidad en toda la sociedad tanto como sea posible y mejorando el efecto subsidio (muy bajo).
REINO UNIDO (Mattholie, 2017).	Contratos por diferencia (CFD)/obligaciones renovables (RO)/Feed-In Tariff (FIT)	A partir del 2013 CFD/2002 RO/2010 FIT	CFD tiene precios fijos (precio de ejercicio), reduciendo así la exposición del generador a la volatilidad de los precios de la electricidad y, consecuentemente, el costo del capital de la inversión. Las RO tienen un esquema estricto y transparente. El FIT incluye reducción de aranceles.	Como el mercado de energía tiene precios variables, las reformas que se realizan constantemente en las tarifas hacen que pierda la estabilidad y eficiencia del método.	Sin ayudas públicas e incentivos las ERNC no podrían sobrevivir en el Reino Unido, ya que su generación es más cara que la energía convencional (muy bajo).

anteriormente expuestos (FIT e incentivos fiscales) y por medio del *software* RETScreen, herramienta que facilita la toma de decisiones en proyectos de energías vinculando bases de datos de productos, costos y datos climáticos (Ideam, 2015).

Datos de la residencia.

Los datos generales del consumo para una vivienda estrato 4 ubicada en el barrio Normandía, de la ciudad de Bogotá, así como también los consumos mensuales específicos, se consignan a renglón seguido (tablas 2 y 3).

Tabla 2
Descripción del lugar del proyecto

Promedio de consumo de energía eléctrica mensual del último año	471 kWh
Costo promedio del kWh mensual del último año	\$447,32
Consumo de energía anual	5652 kWh

Tabla 3
Consumo de energía eléctrica en zona residencial

Consumo de energía eléctrica		
Mes	Año	kWh
Enero	2017	371
Febrero	2017	406
Marzo	2017	411
Abril	2017	508
Mayo	2017	488
Junio	2017	527
Julio	2017	481
Agosto	2017	493
Septiembre	2017	453
Octubre	2017	535
Noviembre	2016	468
Diciembre	2016	511
Promedio mensual		471

El comportamiento de los paneles solares depende de las condiciones ambientales de la zona de la instala-

ción, aumentando su eficiencia en sitios con mayor irradiación y disminuyéndola con el aumento de la temperatura (González, 2016) Los paneles solares fotovoltaicos seleccionados para la instalación tienen las características mencionadas a continuación (tabla 4).

Tabla 4
Descripción del panel fotovoltaico

Tipo de panel	Monocristalino de silicio (Si)
Marca	Suntech
Modelo	STP320S-24Ven
Eficiencia	16,50 %
Área de cada panel	1,94 m ²
Costo por kW instalado	\$7.000.000

Con el fin de cubrir la demanda de la energía requerida por la vivienda se establece una capacidad del sistema que tiene asociado una inversión inicial del proyecto (tabla 5).

Tabla 5
Inversión inicial del sistema solar fotovoltaico

	Capacidad instalada (kW)	Energía eléctrica (kWh)	Costo del sistema
Para todos los casos	4,32	5676	\$30.240.000

Sin medidor horario

Para obtener un beneficio por el ahorro de la energía eléctrica consumida, se plantea un escenario donde el valor que hay que pagar en la factura ($VE_{i,j,n,m}$) sea igual o mayor que 0.

Para autogeneradores que utilizan fuentes no convencionales de energía renovable con capacidad instalada menor o igual que 0,1 MW, sin medidor horario. Partiendo de la ecuación (2) y haciendo el valor por pagar igual a cero, se obtiene;

$$Exp2_{i,j,n,m-1} = 0,559273 [kWh] \cong 0,56 [kWh] \quad (5)$$

De acuerdo con los resultados de la ecuación (5), para que el valor por pagar en la factura sea igual a cero, es necesario que por cada 1 kWh que se importe de la

red se exporten 1,56 kWh, de tal modo que el excedente de energía sea de 0,56 kWh.

En la figura siguiente (figura 1) se muestra la curva de carga del sistema para el caso sin medidor horario, así como el comportamiento de los ingresos económicos durante los primeros diez años del proyecto (figura 2). Donde el costo mensual del sistema se refiere al valor total del sistema dividido entre la vida útil de éste, la utilidad mensual es la suma entre el costo mensual del sistema y su utilidad, el pago de factura mensual es el pago que se debe hacer por el servicio de energía eléctrica y el beneficio neto mensual se refiere al pago que se recibe por exportar energía eléctrica a la red.

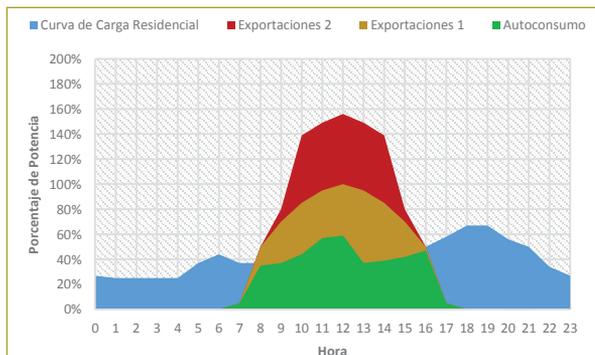


Figura 1. Curva de carga del sistema sin medidor horario.

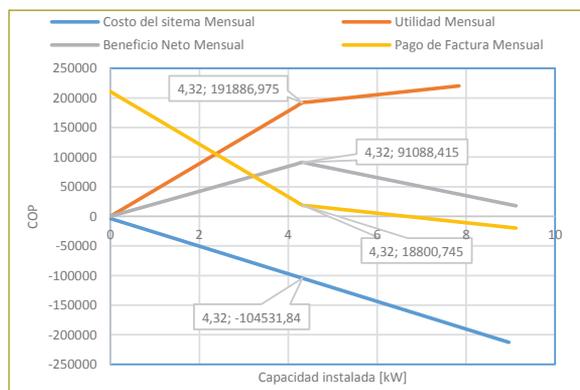


Figura 2. Comportamiento económico de los ingresos sin medidor horario.

Con medidor horario

Para la misma condición del caso 1, para autogeneradores que utilizan fuentes no convencionales de energía renovable con capacidad instalada menor o igual que 0,1 MW, con medidor horario, partiendo de la ecuación (3) y haciendo el valor por pagar igual a cero, se obtiene:

$$Exp2_{i,j,n,m-1} = 0,138947 [kWh] \cong 0,14 [kWh] \quad (6)$$

De acuerdo con los resultados de la ecuación (6), para que el valor por pagar en la factura sea igual a cero es necesario que por cada kWh que se importe de la red se exporten 1,14 kWh, de tal forma que el excedente de energía sea de 0,14 kWh.

A continuación se muestra la curva de carga del sistema para el caso con medidor horario (figura 3), así como el comportamiento de los ingresos económicos durante los primeros diez años del proyecto (figura 4).

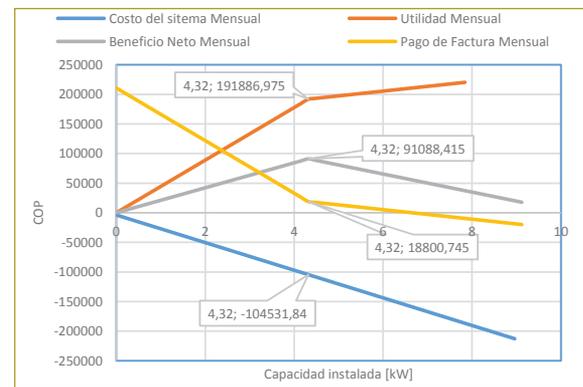


Figura 3. Curva de carga del sistema con medidor horario.

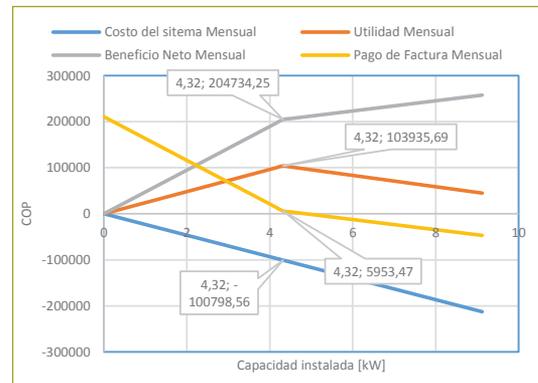


Figura 4. Comportamiento económico de los ingresos con medidor horario.

Se puede observar que el beneficio neto mensual del sistema aumenta cuando el costo del sistema se hace mayor; es decir, para mayor beneficio neto mensual se debe instalar un sistema más grande, lo cual también favorece un menor pago de facturación. La utilidad mensual máxima en este caso se logra con una capacidad instalada de 4,32 kWp, lo que significa que con

4,32 kWp instalados, la energía eléctrica que se importa desde la red eléctrica es igual a la que se exporta; esto no se traduce en un pago de factura mensual igual a cero pesos, debido a que se debe pagar la comercialización de las exportaciones de energía eléctrica.

Antes de que se logre la utilidad mensual máxima, el precio al cual equivale el pago de energía es igual al costo unitario de prestación del servicio de energía eléctrica en \$/kWh menos la comercialización de la energía que se exporta; esto sucede cuando las exportaciones no superan a las importaciones.

Después de que se logre la utilidad mensual máxima, el precio al cual equivale el pago de los excedentes de energía que superen las importaciones es igual al precio de bolsa. Lo anterior se debe a lo establecido en la Resolución CREG 121 del 2017 (CREG 121 de 2017).

Para obtener un valor pago de facturación igual a cero, se debe instalar un 56 % por encima de la capacidad que se da cuando el beneficio neto es máximo (figura 2).

De acuerdo con la consideración económica de la instalación con medidor horario (figura 4), se debe instalar un 14 % por encima de la capacidad que se da cuando el beneficio neto es máximo; sin embargo, en el punto donde se logra el cero en el pago de la facturación no se consigue el mayor beneficio neto.

Análisis de factibilidad por medio de RETScreen Expert

El objetivo inicial de este sistema que se plantea es observar el comportamiento económico del proyecto a través de su vida útil, consiguiendo ganancias de dinero debidas al no tener que pagar por el servicio de energía eléctrica durante el periodo de vida del proyecto, y obteniendo ganancias de éste con el ahorro de la energía.

Se llevó a cabo una simulación de una planta solar fotovoltaica en el *software* RETScreen Expert, con los parámetros técnicos y económicos que deben considerarse para instalar este sistema (tabla 6).

El sistema tendrá las siguientes características financieras:

Inversión inicial:	100 %
Financiación:	0 %
Tasa de inflación:	6 %
Tasa de descuento:	0 %
Tiempo de vida del proyecto:	25 años

Tabla 6

Parámetros climatológicos del lugar de instalación (Ideam, 2015)

Mes	Temperatura del aire	Radiación solar diaria - horizontal	Velocidad del viento
	°C	kWh/m ² /d	m/s
Enero	12,9	4,7	2,2
Febrero	13,2	4,3	2,2
Marzo	13,6	4,3	2,2
Abril	13,8	3,7	2
Mayo	13,8	3,5	2,1
Junio	13,5	3,65	2,5
Julio	13,1	3,9	2,7
Agosto	13,1	4,1	2,6
Setiembre	13,1	3,95	2,2
Octubre	13,2	3,95	2
Noviembre	13,4	4	2
Diciembre	12,9	4,3	2,3
Anual	13,3	4,03	2,3

Temperatura de diseño de la calefacción	4,1
Temperatura de diseño del aire acondicionado	28,0
Amplitud de la temperatura del suelo	8,5

En la tabla anterior (tabla 6) se pueden apreciar los parámetros climatológicos del lugar donde se va a ubicar la instalación. A su vez, los valores de radiación solar diaria promedio mensual se registraron con base en el atlas solar interactivo del Ideam (Ideam, 2015), en tanto que los indicadores de inflación básica y variación anual se adquirieron del Banco de la República de Colombia para diciembre de 2016 (Banrep, 2017).

En la figura siguiente se puede observar el comportamiento de la radiación solar diaria promedio, donde

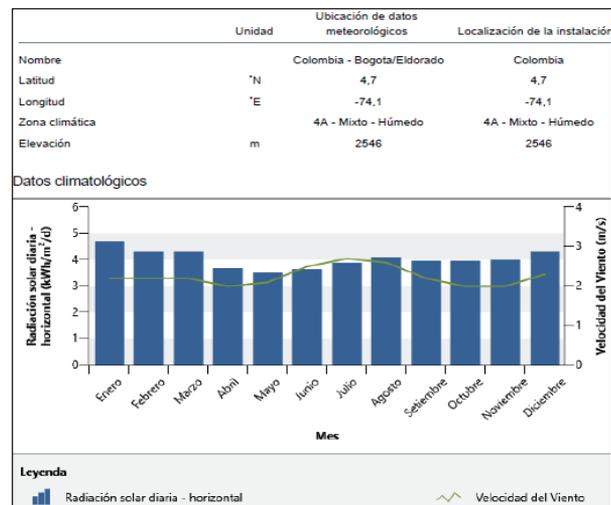


Figura 5. Gráfica de la radiación solar promedio mensual.

la radiación mínima se obtiene en el mes de mayo con un valor de 3,5 kWh/m²; al ser el mes más desfavorable en cuanto a recurso solar, se usó para los cálculos de producción de energía de la instalación (figura 5).

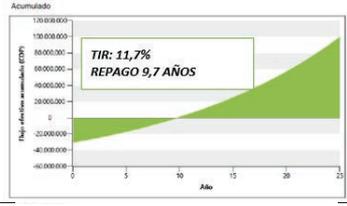
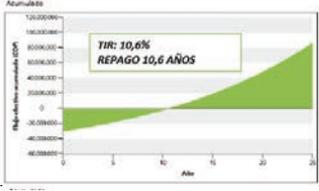
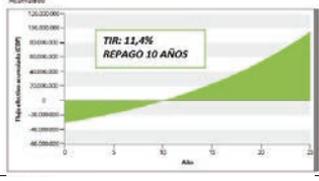
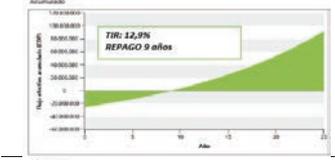
Para evaluar la factibilidad financiera se plantearon distintos casos de estudio (tablas 7 y 8), que se diferencian por la aplicación del incentivo de exención del IVA propuesto por la Ley 1715 de 2014 (UPME, 2014) y la Resolución CREG 121 de 2017 (CREG 121 de 2017), los cuales permiten comparar y deter-

minar cuál es el caso más favorable con base en la tasa interna de retorno (TIR) y los años de retorno de la inversión inicial.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El beneficio de la exclusión del IVA que promueve la Ley 1715 del 2014 (UPME, 2014) conduce a que los casos 4 y 5 presenten una mejor viabilidad económica, lo cual indica que este incentivo fiscal funciona en gran

Tabla 7
Descripción y resultados de los casos

N.º de caso	Caso de estudio	Descripción	Tiempo de retorno
Caso 1	Sin incentivos	La instalación solar fotovoltaica que tiene la casa es suficiente para ser autosuficiente en el consumo de energía eléctrica, no exporta energía a la red y no opta por recibir ningún tipo de incentivo.	
Caso 2	Con FIT y sin medidor de horario	La instalación solar fotovoltaica que tiene la casa es suficiente para obtener la máxima utilidad del sistema, sin que la instalación tenga medidor horario de energía; el cobro de energía se calculó con la ecuación propuesta.	
Caso 3	Con FIT y con medidor de horario	La instalación solar fotovoltaica que tiene la casa es suficiente para obtener la máxima utilidad del sistema, sin que la instalación tenga medidor horario de energía, el cobro de energía se calculó con la ecuación propuesta.	
Caso 4	Con FIT, sin medidor de horario y aplicando descuento del IVA	La instalación solar fotovoltaica que tiene la casa es suficiente para obtener la máxima utilidad del sistema, sin que la instalación tenga medidor horario de energía; hubo un descuento equivalente al IVA, para los costos iniciales del sistema.	
Caso 5	Con FIT, con medidor de horario y aplicando descuento de IVA	La instalación solar fotovoltaica que tiene la casa es suficiente para obtener la máxima utilidad del sistema, sin que la instalación tenga medidor horario de energía; hubo un descuento equivalente al IVA, para los costos iniciales del sistema.	

medida, ya que reducir los costos iniciales del sistema afecta la evaluación financiera.

La TIR representa la rentabilidad que genera un proyecto. Es un índice que mide la rentabilidad de una inversión; para que un proyecto en Colombia sea llamativo, debe tener una TIR que supere el 12 % (Clavijo, 2016), lo que indica que en los casos donde no se aplicó la excepción del IVA (caso 1, caso 2 y caso 3) se rechazarían en Colombia, pero en países como España se espera que en proyectos de generación fotovoltaica la TIR sea superior al 8 % (Fernández, 2013); es decir, todos los casos son aceptados, pero en el caso de Colombia se espera que el rendimiento de un proyecto sea mayor que en España.

Comparativamente, el caso 5 es el de mejor viabilidad financiera, debido a que está exento del IVA y obtiene beneficios por contar en su instalación con un medidor horario según la Resolución CREG 121 de 2017 (CREG 121 de 2017).

El repago de capital o *payback* es una herramienta útil para la decisión de aceptar proyectos o inversiones en función del plazo de recuperación de la inversión inicial. Invertir en este tipo de proyectos de autogeneración a pequeña escala no genera un beneficio económico inmediato, como se aprecia en la tabla siguiente, en la que los repagos varían de 8,5 a 10,6 años (tabla 8).

Tabla 8
Resultados financieros

N.º de caso	TIR	Repago del capital (años)	VPN	Relación beneficio-coste
1	11,70 %	9,7	\$99.844.373	4,3
2	10,60 %	10,6	\$86.241.633	3,9
3	11,40 %	10	\$95.217.602	4,1
4	12,90 %	9	\$91.987.233	4
5	13,70 %	8,5	\$100.963.292	4,3

CONCLUSIONES

La utilidad máxima del sistema no se logra cuando el monto por pagar en la factura de energía eléctrica es cero, debido a que para obtener esta facturación habría que sobredimensionar la capacidad total del sistema fotovoltaico (kWp) para cubrir los costos de comercialización, lo que se traduciría en un costo inicial más elevado.

La utilidad máxima se consigue cuando las exportaciones de energía son iguales a las importaciones; esto significa que el proyecto debe generar y suplir la misma energía que el sistema demande, lo que no implicaría tener un valor de facturación cero, ya que se debe pagar la comercialización de la energía que se exporte a la red eléctrica (figuras 2 y 4).

El FIT en Colombia como mecanismo presenta dificultades para establecer acuerdos de compra de energía entre usuario y comercializador, lo cual lleva por el momento a considerar esta opción como una medida que tendrá que tomarse en una futura resolución.

La condición para la integración al sistema eléctrico de sistemas de generación distribuida (GD) o autogeneración debe ser igual o inferior al 5 % de la capacidad nominal del circuito, transformador o subestación donde se solicita el punto de conexión, o que la energía que pueden entregar los GD o autogeneradores en una hora no puede superar el 50 % de la mínima demanda de energía horaria registrada en dicho circuito o transformador. Por esto, entidades como la Asociación Colombiana de Ingenieros (ACIEM) recomiendan que para una nueva resolución se ajusten los límites con respecto a la capacidad nominal del circuito al cual se va a conectar (ACIEM, 2017).

Según la Resolución CREG 121-2017, artículo 5 (CREG 121 de 2017), en la que se determinan los estándares técnicos de la disponibilidad del sistema, ésta tiene una limitante en cuanto al uso de fuentes no convencionales de energía, pues “la capacidad instalada en GD o autogeneradores no debe sobrepasar el 5 % de la capacidad nominal del circuito”. Suponiendo que un circuito tiene una capacidad nominal de 100 kW y una residencia realiza un proyecto con capacidad de 5 kW, ésta estaría cumpliendo el límite del 5 %, restringiendo el desarrollo y la proliferación de más proyectos en el circuito.

REFERENCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) (2015). Obtenido del Programa de Incentivo às Fontes Alternativas. Disponible en <http://www.aneel.gov.br/proinfa>.
- Asociación Colombiana de Ingenieros (ACIEM) (2017). Comentarios a la resolución CREG 121 de 2017. Disponible en http://capacitacion.aciem.org/Especiales_Comisiones/2017/Nov_24/pdf/Energia_01.pdf.
- Bustos, M. (2005). Los sistemas de apoyo a la electricidad renovable en la Unión Europea. Asociación de Productores de Ener-

- gías Renovables. Disponible en <http://www.appa.es/descargas/DocumentosAPPA01.pdf>.
- Banco de la República de Colombia (Banrep) (2017). Indicadores de inflación básica y su variación anual. Disponible en <http://www.banrep.gov.co/es/precios/indicadores-inflacion-basica-y-su-variacion-anual>.
- Comisión de Regulación en Energía y Gas (CREG) (2017). Proyecto de Resolución CREG 121 de 2017. Disponible en <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/b5341fbcfab96db80525819b006d42fa?OpenDocument>.
- Comisión de Regulación en Energía y Gas (CREG) (2017). Resolución CREG 012 de 2017. Disponible en [http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/0131f0642a87e34105258133004f8d6f/\\$FILE/Creg012-2017.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/0131f0642a87e34105258133004f8d6f/$FILE/Creg012-2017.pdf).
- Comisión de Regulación en Energía y Gas (CREG) (2014). Resolución CREG 038 de 2014. Disponible en [http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/0131f0642192a5a205257cd800728c5e/\\$FILE/Creg038-2014.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/0131f0642192a5a205257cd800728c5e/$FILE/Creg038-2014.pdf).
- Comisión de Regulación en Energía y Gas (CREG) (2007). Resolución CREG 119 de 2007. Disponible en <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/c63f06a9114e1a150525785a007a6fa2?OpenDocument>.
- Clavijo, S. (2016). La paz y su tasa de retorno (TIR). *La República*. Disponible en <https://www.larepublica.co/analisis/sergio-clavijo-500041/la-paz-y-su-tasa-interna-de-retorno-tir-2434551>
- Fernández, M. J. (2013). Energías renovables: estudio de viabilidad de una instalación solar fotovoltaica (huerto solar). Disponible en https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/27871/PFC_Mar%C3%ADa%20Jos%C3%A9%20Fern%C3%A1ndez%20Llobell.pdf?sequence=1.
- González, D. (2016). Prototipo de energía eléctrica fotovoltaica para el laboratorio de energía de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Disponible en <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/446>.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) (2015). Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia. Disponible en <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>.
- Jankowska, K. (2014). The German Policy Support Mechanism for Photovoltaics: The Road to Grid Parity. Disponible en https://link.springer.com/chapter/10.1057/9781137338877_13.
- Mattholie, R. (2017). Energy support mechanisms. Disponible en <https://www.ice.org.uk/knowledge-and-resources/briefing-sheet/energy-support-mechanisms>.
- Ming, Z., Ximei, L., & Xue Song, L. (2013). Renewable and Sustainable Energy Reviews. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113002785>.
- Ministerio de Minas y Energía (MME) (2015). Decreto 2143 de 2015. Disponible en http://www.upme.gov.co/Normatividad/Normatividad%20Sectorial/DECRETO_2143_04_NOVIEMBRE_2015.pdf.
- Ministerio de Minas y Energía (MME) (2010). Resolución 18 - 0919 de 2010. Disponible en http://servicios.minminas.gov.co/compilacionnormativa/docs/resolucion_minminas_180919_2010.htm.
- Sauma, E. E. (2012). Políticas de fomento a las energías renovables no convencionales (ERN) en Chile. Centro de Políticas Públicas UC. Disponible en <https://politicaspublicas.uc.cl/wp-content/uploads/2015/02/descargar-politicas-de-fomento-a-las-energias-renovables-no-convencionales.pdf>.
- Talberg, A. & Swobodam K. (2013). Parliament of Australia - Support for renewable energy. Disponible en https://www.aph.gov.au/About_Parliament/Parliamentary_Departments/Parliamentary_Library/pubs/BriefingBook44p/RenewableEnergy.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. Disponible en http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVABLES_WEB.pdf.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2014). Ley 1715 de 2014. Disponible en http://www.upme.gov.co/normatividad/nacional/2014/ley_1715_2014.pdf.
- Union of Concerned Scientists (2016). California's Renewables Portfolio Standard (RPS) Program. Disponible en <https://www.ucsusa.org/clean-energy/ca-and-western-states/renewables-portfolio-standard#.Ww7XS0iUs2x>.

Metodología para la evaluación del riesgo por flujos de lodos y avalanchas en Colombia

Risk assessment method for mud flows and avalanches in Colombia

JORGE EDUARDO UPARELA OLIVERA¹ - MANUEL GARCÍA LÓPEZ²

1. Ingeniero civil. Estudiante de la maestría en Ingeniería Civil, con énfasis en Geotecnia. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

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

jorge.uparela@mail.escuelaing.edu.co - manuel.garcia@escuelaing.edu.co

Recibido: 10/03/2018 Aceptado: 09/04/2018

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

Resumen

A lo largo del presente artículo se establece una metodología para la evaluación del riesgo por flujos de lodos y avalanchas en Colombia mediante el estudio de algunas metodologías existentes a escalas nacional e internacional, la cual se aplicó al caso de estudio de la cuenca de la quebrada La Chapa, un sitio históricamente vulnerable a la ocurrencia de flujos de lodo.

En primer lugar, se evaluó la amenaza de la cuenca de la quebrada utilizando el método de relación de frecuencias por medio de sistemas de información geográfica, considerando como factores condicionantes: la litología, la geomorfología, la cobertura vegetal y la topografía. También, se evaluó la amenaza por flujos de lodo y avalanchas al casco urbano y la zona rural del municipio de Paz de Río para diferentes periodos de retorno utilizando como herramienta el *software* FLO 2D, el cual permite modelar flujos hiperconcentrados como flujos de detritos y flujos de lodos. El *software* predice alturas de depósito y presión de impacto de los flujos, las cuales son variables utilizadas en el cálculo de la amenaza.

El análisis de la vulnerabilidad se realizó teniendo en cuenta variables como el grado de exposición y la calidad de la construcción de las edificaciones.

Finalmente, se calculó el riesgo tomando como variables la amenaza y la vulnerabilidad.

Los resultados obtenidos coinciden en señalar que algunas viviendas del barrio Santa Teresa, situado en el casco urbano del municipio de Paz de Río, están en zona de riesgo. También muchas viviendas del área rural se encuentran en zonas de alto riesgo, a pesar de que en los últimos años muchas familias han decidido mudarse del lugar debido a los recientes eventos, que han ocasionado pérdidas humanas y materiales.

Palabras claves: amenaza, avalancha, lodo, modelación, riesgo, sedimentos, susceptibilidad, vulnerabilidad.

Abstract

This document established a methodology for risk assessment of mud flows and torrential floods in Colombia through the study of some existing methodologies at national and international level, which was applied to the case study of the basin of Quebrada La Chapa, a site historically susceptible to the occurrence of mud flows. In the first place, the threat of the ravine basin was evaluated using the method of frequency relation by means of geographic information systems, the conditioning factors: lithology, geomorphology, vegetation cover, and topography. Also, the threat of mud and torrential flows to the urban area and the rural area of the municipality of Paz de Río was evaluated for the different return periods using FLO 2D software as a tool, which allows the modeling of hyperconcentrated flows as debris flows and sludge flows. The software predicts deposit heights and impact pressure of the flows, which are variables used in the threat calculation.

Vulnerability analysis is performed taking into account the variables such as the degree of exposure and the quality of the construction of the buildings.

Finally, the risk was calculated taking the threat and the vulnerability as variables.

The results obtained coincide in the urban area of the municipality of Paz de Río some housing in the Santa Teresa neighborhood is in the risk zone. Also, many rural dwellings are located in high risk areas, despite the fact that, in recent years, many families have decided to move due to the latest events that caused human and material losses.

Keywords: Flood, Hazard, modelling, mud, risk, sediments, susceptibility, torrential flood, vulnerability.

INTRODUCCIÓN

La Región Andina colombiana es susceptible de sufrir frecuentes procesos geológicos internos y externos, los cuales generan grandes procesos físicos, tales como terremotos, erupciones volcánicas, fusión de nieves, que, sumados a las lluvias intensas, ocasionan desastres naturales como los flujos de lodos y avalanchas. Además, el desconocimiento o falta de políticas de prevención y mitigación de riesgos por flujos de lodos y avalanchas aceleran el desarrollo de los desastres.

El problema central, ya identificado, es el elevado número de desastres causado por flujo de lodos y avalanchas en Colombia.

Los flujos de lodos y avalanchas son movimientos en masa muy complejos, que generan daños en infraestructura (edificaciones y carreteras) y afectación humana (muertos, heridos, desplazados), lo cual genera, a su vez, problemas sociales, de salud y educación.

En los últimos 30 años, Colombia ha sido uno de los países más vulnerables a desastres naturales en América. En un informe presentado por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) en septiembre de 2008, se revela que en promedio cada año ocurren 597 desastres en Colombia, superando a Perú (585), México (241) y Argentina (213) (*Vanguardia*, 2009).

Entre 2006 y 2014 hubo 3181 muertos y 12,3 millones de afectados debido a los desastres naturales (DNP, 2015). En el caso de las avalanchas (caso específico de desastre natural), entre 1998 y 2015 hubo un total de 335 eventos, los cuales dejaron como consecuencia: 334 muertos, 302 heridos, 101 desaparecidos y 2452 viviendas destruidas (NGRD, 2016).

A partir de la expedición de la ley de gestión del riesgo de desastres (Ley 1523 de 2012), todos los municipios del país deben realizar estudios de riesgos naturales como parte esencial de las políticas orientadas a la planificación del progreso seguro y a la gestión ambiental territorial sostenible. Por esta razón, el Servicio Geológico Colombiano publicó en el año 2016 la *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. En la guía se describen los procesos metodológicos para hacer estudios de riesgo por movimientos en masa a escala detallada o local, de modo que su ejecución sea viable a partir de la información y las herramientas disponibles y que con esto se consigan condiciones básicas de calidad, rigurosidad

y uniformidad en los estudios. La guía se podrá aplicar en la mayoría de las cabeceras municipales y centros poblados pequeños y medianos de Colombia (Ávila, Cubillos & Granados, 2016).

Sin embargo, en la metodología de evaluación de riesgo que se plantea en la guía se limita exclusivamente a riesgos por movimientos en masa, es decir, se excluyen los procesos metodológicos para evaluación de riesgos por inundaciones o avenidas torrenciales. Los desastres causados por los flujos de lodos y avalanchas en Colombia obligan a reflexionar y tomar medidas al respecto. ¿De qué manera se pueden reducir, mitigar y prevenir los desastres ocasionados por los flujos de lodos y avalanchas?

Frente a este contexto, en el presente artículo se pretende desarrollar una metodología para la evaluación del riesgo por flujos de lodo y avalancha, de tal manera que se puedan determinar áreas en riesgo y desarrollar herramientas y metodologías que ayuden a tomar decisiones correctas para reducir el riesgo que corren de las personas.

METODOLOGÍA

En la investigación planteada se contempló la revisión de la información disponible respecto al estudio de evaluación del riesgo por flujos de lodos y avalanchas. De la recopilación y estudio de metodologías, se estableció una metodología de evaluación de riesgos por flujos de lodos y avalanchas en Colombia. Finalmente, dicha metodología se aplicó a una zona vulnerable a ocurrencia de procesos de remoción en masa, sobre todo a avalanchas, como fue la cuenca de la quebrada La Chapa, en el departamento de Boyacá.

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO POR FLUJOS DE LODOS Y AVALANCHAS EN COLOMBIA

La metodología establecida (de acuerdo con el estudio de la bibliografía) más conveniente para el estudio de riesgo por flujos de lodos y avalanchas en Colombia se resume a continuación (tabla 1).

Tabla 1
Resumen de la metodología planteada (elaboración propia)

Variable	Definición	Procedimiento de análisis
1. Amenaza	Condición potencial de que un evento natural se presente con una intensidad tal que pueda afectar la vida de las personas o causar daños en infraestructura física. Se evalúa en función de la probabilidad de ocurrencia temporal y espacial. La intensidad de la amenaza se expresa en términos de velocidad y presión de impacto en el caso de flujos de lodo y avalanchas (Ávila, Cubillos & Granados, 2016).	1.1 Definición de los factores geoambientales o condicionantes que intervienen en la amenaza de una cuenca.
		1.2 Análisis de la susceptibilidad de una cuenca.
		1.3 Zonificación de la susceptibilidad de una cuenca.
		1.4 Identificación y análisis de los factores detonantes que intervienen en la amenaza en una cuenca.
		1.5 Zonificación de la amenaza en una cuenca.
		1.6 Identificación y análisis de los factores que intervienen en la amenaza de una zona urbana.
		1.7 Zonificación de la amenaza en una zona urbana.
2. Vulnerabilidad	Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada en caso de que se presente un evento natural. Se expresa en una escala de 0 (no pérdida) a 1 (pérdida total) (Ávila et al., 2016).	2.1 Identificación y localización de los elementos expuestos.
		2.2 Caracterización de los elementos expuestos: tipología, exposición y resistencia.
		2.3 Tipos de daño o efectos esperados como resultado de los escenarios de vulnerabilidad.
		2.4 Zonificación de la vulnerabilidad.
3. Riesgo	El riesgo es una medida de la probabilidad y severidad de un efecto adverso a la vida, la salud, la propiedad o el ambiente. Se mide en vidas humanas, propiedades en riesgo y daños ambientales. Generalmente, el riesgo estimado como el producto de la probabilidad de la amenaza por las consecuencias para los elementos en riesgo (Suárez, 1998).	3.1 Cálculo del riesgo
		3.2 Zonificación del riesgo.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Localización

La quebrada La Chapa es el límite político entre los municipios de Socha y Tasco. Nace en el páramo de Mesa Alta a una altura de 3600 msnm, fluye aguas abajo a través de una topografía escalonada y recibe aportes de agua de quebradas menores. La longitud total de la quebrada es de aproximadamente 6,5 kilómetros y desemboca en el río Chicamocha, en el municipio de Paz de Río, en la zona donde está ubicada la inspección de policía de Santa Teresa, corregimiento del municipio de Socha, sobre la cota 2250 m. En la parte media del recorrido de la quebrada se localiza el campamento de la mina La Chapa (figura 1).

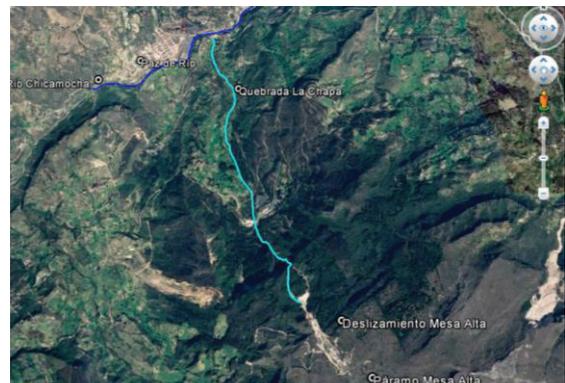


Figura 1. Localización del área de estudio (Google Earth).

Antecedentes

En la quebrada La Chapa, tanto en la cabecera como en su cauce, se presentan frecuentemente movimientos en masa que, según la clasificación de Varnes (1978), son denominados flujos de lodos y avalanchas de detritos. Se movilizan materiales granulares de diferentes tamaños, desde bloques de varios metros de diámetro hasta fracciones más finas de arenas, embebidas en una fase líquida formada por agua, suelos finos (limo y arcilla) y aire, acompañado por residuos vegetales. Debido a la alta pendiente por donde se moviliza la quebrada, el lodo alcanza altas velocidades, lo cual trae consecuencias devastadoras sobre las personas y viviendas que habitan en la zona.

Según Chaparro (2004), citando a Sarmiento (1986), en el año 1963 ocurrió una avalancha que arrasó la inspección de Santa Teresa, dejando como saldo fatal un centenar de muertos. Además, los días 6 y 9 de noviembre de 1986 se presentaron avalanchas que afectaron la mina La Chapa e inundaron varias estructuras de propiedad de Acerías Paz del Río S.A.; afortunadamente, no hubo pérdidas humanas, pero se vieron afectadas algunas tierras fértiles (Chaparro, 2005).

Según el Comité Regional para la Prevención y Atención de Desastres de Boyacá (Crepad), se presentó una avalancha en noviembre de 1995, dejando como saldo cuatro muertos, aparte de los daños estructurales sufridos por cuatro viviendas que tuvieron que ser evacuadas.

El 6 de diciembre de 2011 hubo una avalancha, la cual dejó una persona herida (Radio, 2011).

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL CASO DE ESTUDIO DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CHAPA

El procedimiento empleado para el estudio de riesgo en la cuenca de la quebrada La Chapa se presenta más adelante (tabla 2).

RESULTADOS

Los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología al caso de estudio de la cuenca de la quebrada La Chapa fueron los siguientes:

- Mapa de vulnerabilidad a movimientos de remoción en masa en la cuenca de la quebrada La Chapa.

- Mapa de amenaza de la cuenca de la quebrada La Chapa por movimientos de remoción en masa.
- Mapa de amenaza en las áreas rural y urbana por flujos de lodos (para periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años).
- Mapa de vulnerabilidad física (para periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años).
- Mapa de riesgo (para periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años).

Los mapas obtenidos se observan en los planos 1, 2, 3, 4 y 5.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Susceptibilidad de la cuenca

La susceptibilidad es la facilidad con que un movimiento de remoción en masa puede ocurrir sobre la base de las condiciones naturales del suelo. Existen varias metodologías para estimar la susceptibilidad. En el presente trabajo se utilizó el método de relación de frecuencias, el cual pertenece al grupo de métodos estadísticos bivariados. Este método se emplea para establecer la correlación espacial entre la ubicación de deslizamientos y factores que generan los deslizamientos. A continuación, se presentan los factores tenidos en cuenta para la evaluación de la susceptibilidad de la cuenca de la quebrada La Chapa y su incidencia en la ocurrencia de movimientos en masa:

- *Pendiente.* Del mapa de pendientes se concluyó que el terreno es escarpado, y los movimientos en masa más frecuentes son aquellos que están en laderas con pendientes entre los 16° y 35°. Esto se debe a que los esfuerzos cortantes movilizados son muy altos (por la inclinación de la ladera) y existe una gran probabilidad de que se supere la resistencia al corte del suelo.
- *Geología.* En el mapa geológico o litológico se evidencia que los movimientos en masa más frecuentes se presentan en los depósitos coluviales del Cuaternario. La razón es que tales materiales corresponden a antiguos deslizamientos depositados en las bases de las laderas. Su inestabilidad se debe a que son materiales sueltos y heterogéneos.
- *Geomorfología.* El mapa geomorfológico evidencia que los movimientos en masa están asociados a la

Tabla 2
 Procedimiento utilizado para el caso de estudio de la quebrada La Chapa (elaboración propia)

Variable	Procedimiento de análisis	Observaciones
1. Amenaza	1.1 Definición de los factores geoambientales o condicionantes que intervienen en la amenaza de una cuenca.	Factores condicionantes: pendiente del terreno, geología, geomorfología y cobertura vegetal.
	1.2 Análisis de la susceptibilidad de una cuenca.	Se aplicó el método de relación de frecuencias.
	1.3 Zonificación de la susceptibilidad de una cuenca.	Se utilizó la función "álgebra de mapas" ArcGIS.
	1.4 Identificación y análisis de los factores detonantes que intervienen en la amenaza en una cuenca.	Se analizó la lluvia como factor detonante aplicando la metodología de Castellanos (1996).
	1.5 Zonificación de la amenaza en una cuenca.	Se utilizó ArcGIS.
	1.6 Identificación y análisis de los factores que intervienen en la amenaza de una zona urbana.	Modelación de flujos de lodos usando el software FLO 2D. Factores: caudal líquido, concentración volumétrica de sedimentos, gravedad específica de sólidos, viscosidad y esfuerzo cortante.
	1.7 Zonificación de la amenaza en una zona urbana.	De acuerdo con las alturas de depositación y presiones de impacto se realiza la zonificación.
2. Vulnerabilidad	2.1 Identificación y localización de los elementos expuestos.	De acuerdo con el plano catastral obtenido en el IGAC y el plano de amenaza se identificaron los elementos expuestos.
	2.2 Caracterización de los elementos expuestos: tipología, exposición y resistencia.	Se hizo un inventario de las viviendas ubicadas en la zona de amenaza alta. La información obtenida de las viviendas fue: número de pisos, sistema estructural y abertura de las fachadas.
	2.3 Tipos de daño o efectos esperados como resultado de los escenarios de vulnerabilidad.	Aplicación de la metodología propuesta por Ingeocim (1998).
	2.4 Zonificación de la vulnerabilidad	De acuerdo con la categorización de Chaparro (2005) se zonificó la vulnerabilidad en ArcGIS.
3. Riesgo	3.1 Cálculo del riesgo	El riesgo se calcula como el producto de la amenaza y la vulnerabilidad
	3.2 Zonificación del riesgo	De acuerdo con la categorización de Ávila et al. (2016), se zonificó el riesgo en ArcGIS.

unidad geomorfológica IIa, nomenclatura asociada al relieve ondulado en la que se describen procesos de remoción en masa en los cuales hay traslación de detritos por acción hidrogravitacional (coluviones).

- *Cobertura vegetal.* El mapa de cobertura vegetal permite concluir que los movimientos en masa se presentan con mayor frecuencia en zonas con escasa cobertura vegetal, como es el caso del arbustal abierto y el herbazal. Esto se debe a que la ausencia de raíces permite que el suelo se erosione fácilmente.

Por último, se concluye que de acuerdo con los resultados del método de relación de frecuencias, la inestabilidad de las laderas en la cuenca de la quebrada La Chapa está asociada a la presencia de coluviones en la mayor parte de la cuenca y a la escasa cobertura vegetal en algunas zonas.

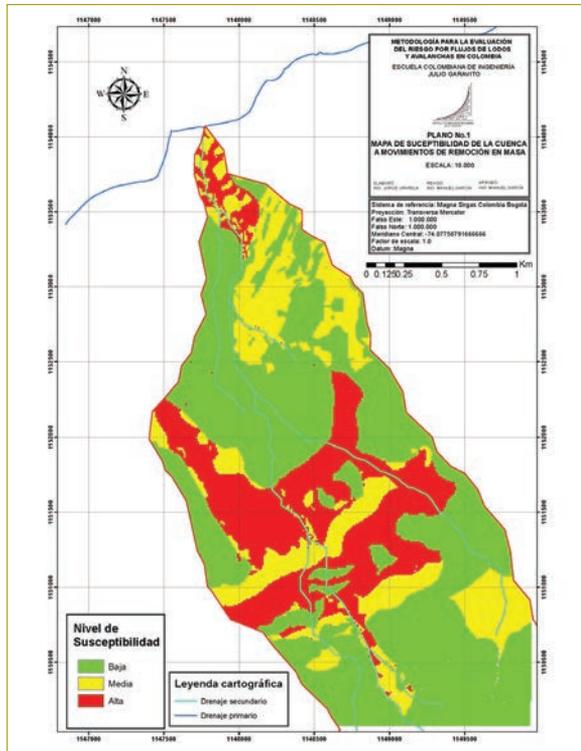
Evaluación de la lluvia como factor detonante de movimientos de remoción en masa

Para evaluar la lluvia como factor detonante de deslizamientos en la quebrada La Chapa se utilizó la metodología probabilística de Castellanos (1996), en la cual se asocia una lluvia crítica acumulada a la formación de este tipo de eventos.

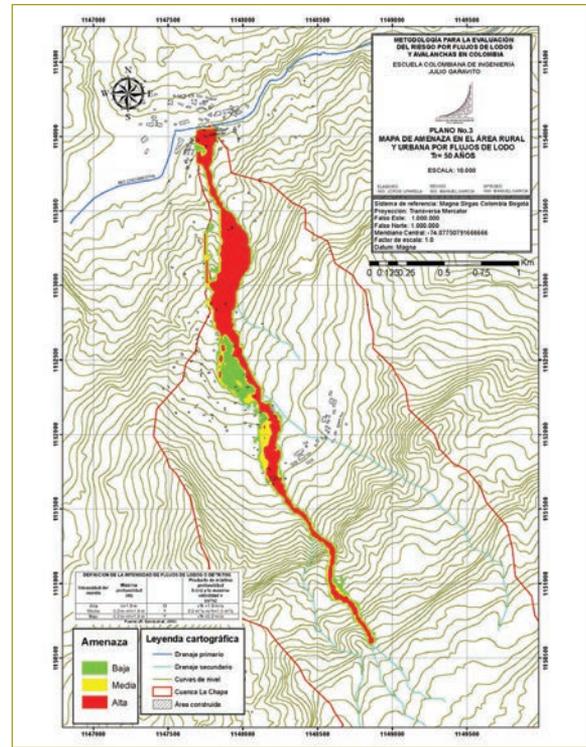
Se realizó el análisis para dos eventos de gran magnitud ocurridos en el pasado. Estos eventos fueron flujos de lodos generados por la continua actividad del deslizamiento de Mesa Alta.

En resumen, el método consistió en realizar la gráfica de precipitación acumulada vs. días antecedentes. En el cambio brusco de la pendiente de la gráfica se logra evidenciar la lluvia que detonó ambos eventos.

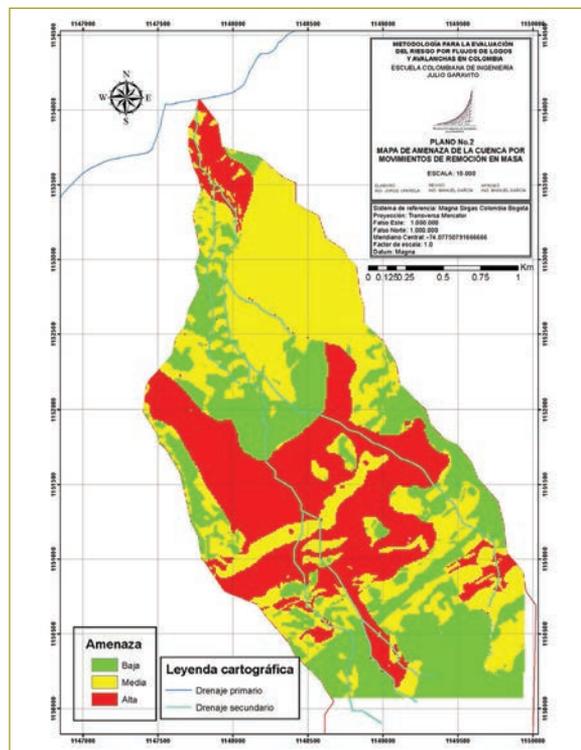
El análisis realizado para los dos eventos históricos permite concluir que ambos se produjeron en una tem-



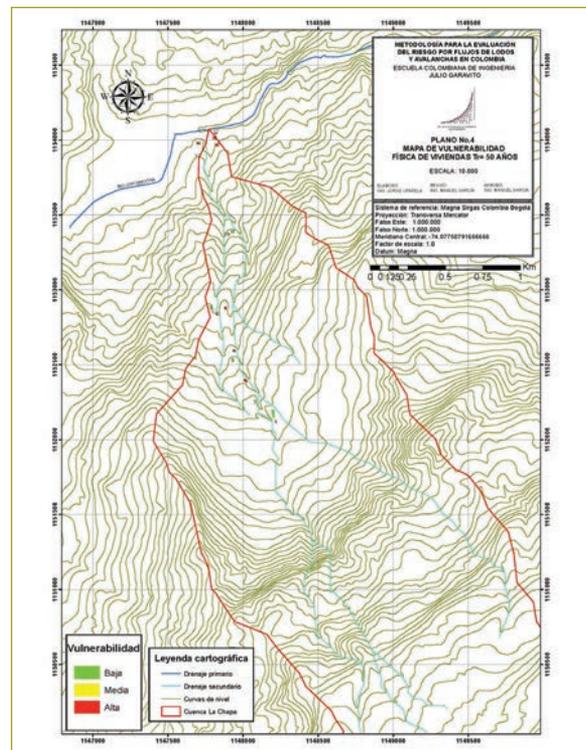
Plano 1. Mapa de la vulnerabilidad de la cuenca a movimientos de remoción en masa.



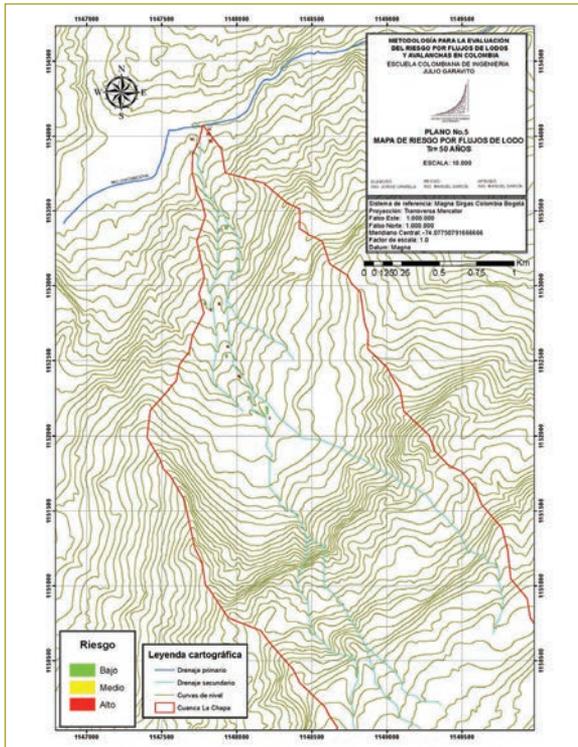
Plano 3. Mapa de amenaza en las áreas rural y urbana por flujos de lodo $Tr = 50$ años.



Plano 2. Mapa de amenaza de la cuenca por movimientos de remoción en masa.



Plano 4. Mapa de vulnerabilidad física de viviendas $Tr = 50$ años.



Plano 5. Mapa de riesgo por flujos de lodo $T_r = 50$ años.

porada de intensas lluvias (entre octubre y diciembre) y que los deslizamientos se detonaron probablemente por lluvias acumuladas entre 30 y 45 días de duración.

Amenaza de la cuenca

La amenaza de la cuenca de la quebrada La Chapa se obtuvo sumando matemáticamente la susceptibilidad y la lluvia. El resultado final fue el mapa de amenaza de la cuenca. El grado de amenaza alta está localizado en la parte media de la cuenca y en sectores específicos como en el páramo de Mesa Alta y la desembocadura de la quebrada. En la mayoría de las zonas de amenaza alta están localizados los depósitos coluviales y las áreas de poca cobertura vegetal, lo cual confirma la gran incidencia que tienen estos factores en la generación de movimientos en masa.

Amenaza en los cascos rural y urbano

La amenaza en los cascos rural y urbano depende básicamente de la altura de depositación y presión de

impacto de las avalanchas que frecuentemente fluyen por el cauce de la quebrada La Chapa.

Para la modelación de flujos de lodos existe gran variedad de *softwares*. En el presente trabajo se utilizó el *software* FLO 2D, el cual permite la modelación de flujos hiperconcentrados como flujos de lodos y avalanchas. Este *software* se ha utilizado en numerosas investigaciones y la comunidad científica lo ha aceptado como válido hoy en día.

Inicialmente, se hizo una calibración del modelo, tomando como referencia algunas alturas de depositación de la última avalancha (9/12/11), las cuales aún se evidencian. De la calibración se concluyó que los parámetros de esfuerzos cortantes y propiedades físicas del flujo utilizados (de acuerdo con ensayos realizados por Cuervo et al. (1989) y Chaparro (2005)) se ajustan satisfactoriamente para la modelación de los flujos en la zona de estudio.

La modelación se realizó para eventos con periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años.

Según los resultados obtenidos, las zonas que presentan el grado de Amenaza Alta son la vereda La Chapa (área rural), y los barrios Santa Teresa y Libertador (área urbana).

Anteriormente había mayor número de viviendas en zona de Amenaza Alta, pero muchas de ellas fueron abandonadas ante el peligro al que estaban expuestas las personas que habitaban en ellas. Incluso la mina La Chapa, que funcionó durante muchos años, también fue abandonada. Actualmente se logra evidenciar la destrucción de algunas edificaciones de la mina debido al impacto de la última avalancha.

Análisis de la vulnerabilidad

El grado de afectación que puedan sufrir las viviendas ubicadas en la zona de amenaza alta se realiza mediante el análisis de vulnerabilidad física, que depende de la calidad de las edificaciones y su grado de exposición.

En total, fueron 17 viviendas localizadas en la zona de amenaza alta, a las cuales se les hizo un inventario para poder evaluar la vulnerabilidad.

Se hizo el análisis de vulnerabilidad para los periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años.

De los resultados obtenidos, se concluye que:

- Para el periodo de retorno de 5 años, 7 viviendas tienen cierto grado de vulnerabilidad. El 57 % se ubica en la zona de vulnerabilidad alta, el 14 % en la zona de vulnerabilidad media y el 29% en la zona de vulnerabilidad baja.
- Para el periodo de retorno de 10 años, 11 viviendas tienen cierto grado de vulnerabilidad. El 55 % se ubica en la zona de vulnerabilidad alta, el 18 % en la zona de vulnerabilidad media y el 27 % en la zona de vulnerabilidad baja.
- Para el periodo de retorno de 25 años, 11 viviendas tienen cierto grado de vulnerabilidad. El 73 % se ubica en la zona de vulnerabilidad alta y el 27 % en la zona de vulnerabilidad baja.
- Para el periodo de retorno de 50 años, 17 viviendas tienen cierto grado de vulnerabilidad. El 65 % se ubica en la zona de vulnerabilidad alta y el 35 % en la zona de vulnerabilidad baja.

Cálculo del riesgo

El riesgo de los elementos expuestos al materializarse la amenaza es una función de la probabilidad de ocurrencia del evento, la vulnerabilidad y el valor en pesos del elemento expuesto. El riesgo estima el costo de daños asociados a la ocurrencia del evento.

Para el presente trabajo, dado que no fue posible estimar los costos de las edificaciones, se dejó expresado el riesgo como un porcentaje del costo de las viviendas.

Se calculó el riesgo para los periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años.

De los resultados obtenidos se concluye que:

- Para el periodo de retorno de 5 años, 7 viviendas tienen cierto grado de riesgo. El 57 % se ubica en la zona de riesgo alto, el 14 % en la zona de riesgo medio y el 29 % en la zona de riesgo bajo.
- Para el periodo de retorno de 10 años, 11 viviendas tienen cierto grado de riesgo. El 55 % se ubica en la zona de riesgo alto, el 18 % en la zona de riesgo medio y el 27 % en la zona de riesgo bajo.
- Para el periodo de retorno de 25 años, 11 viviendas tienen cierto grado de riesgo. El 55 % se ubica en la zona de riesgo alto, el 18 % en la zona de riesgo medio y el 27 % en la zona de riesgo bajo.
- Para el periodo de retorno de 50 años, 17 viviendas tienen cierto grado de riesgo. El 59 % se ubica en

la zona de riesgo alto, el 6 % en la zona de riesgo medio y el 35 % en la zona de riesgo bajo.

CONCLUSIONES

Conclusiones generales de la metodología

- En Colombia son muy frecuentes los movimientos de remoción en masa, especialmente los flujos de lodos, flujos de detritos y avenidas torrenciales. Estos eventos han dejado como resultado víctimas fatales y pérdidas económicas millonarias. Se considera necesario incrementar el número de investigaciones que permitan predecir mejor el comportamiento de los flujos, y tomar decisiones que reduzcan el riesgo asociado a este tipo de movimientos de remoción en masa.
- En el presente trabajo se elaboró una metodología para hacer estudios de riesgo por flujos de lodos y avalanchas a escala detallada, y que se puede aplicar a cabeceras municipales en Colombia.
- El trabajo consistió en efectuar una revisión bibliográfica de estudios de riesgo en los ámbitos nacional e internacional. Luego se identificaron los métodos más convenientes para aplicarlos en Colombia, considerando el acceso a la información y viabilidad técnica y económica.
- Se procuró desarrollar una metodología concisa y metódica en la cual se indican los pasos que se deben seguir, los insumos requeridos y los resultados que se esperan al aplicarla.
- Los resultados de estudios que se realicen utilizando la metodología que se planteó en el presente trabajo permitirán a las autoridades gubernamentales tomar medidas preventivas y correctivas para salvaguardar la integridad de las personas que habitan en zonas de riesgo alto.
- Debido a la complejidad en el comportamiento de los flujos de lodos y avalanchas, donde intervienen muchas variables, la metodología planteada integra varias áreas del conocimiento, como geología, geotecnia, hidráulica, hidrología y sistemas de información geográfica.
- La utilización de mapas en la metodología planteada exigió el uso de un sistema de información geográfica (SIG), el cual es una de las características destacadas de la metodología. Los SIG tienen muchas ventajas, entre las cuales se cuenta la agrupación de

los mapas en una serie de capas que permiten una mejor organización e interpretación. Adicionalmente, se pueden hacer operaciones matemáticas con los mapas, cuyos resultados pueden analizarse en una forma rápida, racional y fácilmente inteligible para el usuario, permitiendo así una evaluación ágil y sencilla.

- Para la modelación de flujos de lodos se planteó el uso del *software* FLO 2D, el cual permite modelar flujos hiperconcentrados. La ventaja del *software* es su gran acierto en la predicción del comportamiento de flujos hiperconcentrados. Además, tiene un postprocesador que genera los mapas de amenaza directamente. Otra ventaja es su interfaz amigable y sencilla, que permite al usuario trabajar cómodamente.

Conclusiones del caso de estudio (quebrada La Chapa)

De acuerdo con el estudio de la información disponible sobre la cuenca de la quebrada La Chapa, y la visita de campo realizada para el presente trabajo, se concluye lo siguiente:

- En la cuenca media del río Chicamocha se presentan numerosos procesos de remoción en masa, especialmente en la cuenca de la quebrada La Chapa, en la cual ocurren con frecuencia avalanchas y flujos de lodos que han ocasionado pérdidas de vidas humanas, daños en infraestructura y pérdidas económicas para empresas dedicadas a la minería.
 - Se estableció que los flujos de lodos y avalanchas en la quebrada La Chapa se originan en un gran deslizamiento traslacional activo, ubicado en el páramo de Mesa Alta. El material del deslizamiento es un depósito glacial (Cuaternario). En periodos de lluvias fuertes y prolongadas, se produce una aceleración en el deslizamiento que vierte sus materiales a un boquete en el cual comienzan los flujos de lodos.
 - Interviene en la generación de flujos de lodos la litología de los materiales, en los cuales predominan bloques de areniscas embebidos en limos y arcillas arenosas.
 - El material del deslizamiento de Mesa Alta está formado por arcilla arenosas, que envuelven bloques de arenisca de diferentes tamaños. Al moverse los flujos por el canal de la quebrada, éste se engruesa por el aporte de materiales de deslizamientos laterales.
 - De acuerdo con Cuervo et al. (1989), Chaparro (2005) y los ensayos realizados a una muestra de depósito de flujos de lodo en el presente trabajo, se verificó que el material de la matriz fina clasifica como una arena arcillosa. La concentración volumétrica de los flujos se calculó entre 35 y 40 %.
 - Se identificaron tres zonas bien definidas para el desarrollo de los flujos: la zona de origen que corresponde al deslizamiento del Mesa Alta, el cual aporta los materiales para la formación de los flujos. Una zona de flujo canalizado de una gran pendiente y escalonada, por donde se movilizan los flujos. La zona de depositación, donde la pendiente se reduce y se comienzan a depositar los flujos.
- Según la aplicación del Método para la Evaluación del Riesgo por flujos de lodos y avalanchas al caso de estudio de la quebrada La Chapa, se concluye que:
- Las áreas de la cuenca de la quebrada La Chapa con grado de amenaza alta para la formación de movimientos de remoción en masa son las correspondientes a la parte media, y algunos sectores específicos como el páramo de Mesa Alta y la desembocadura de la quebrada.
 - Se realizó el mapa de amenaza de movimientos de remoción en masa y no el de flujos de lodos, ya que los flujos de lodos se presentan en un sitio específico (páramo de Mesa Alta). Al contrario, otros movimientos de remoción en masa, como deslizamientos y caídas de rocas, se distribuyen espacialmente en toda el área de la cuenca. Por lo tanto, resultó ser más conveniente hacer el mapa de amenaza para los movimientos en masa que se presentan en toda el área de la cuenca.
 - El mapa de amenaza en los cascos rural y urbano permite concluir que no son muchas viviendas las que se encuentran en el grado de amenaza alta. Esto se debe al desalojo de muchas viviendas que se ubicaron en esa zona durante mucho tiempo, ante el peligro inminente de las avalanchas. En total, se contabilizaron 17 viviendas con grado de amenaza alta.
 - De las 17 viviendas clasificadas en el grado de amenaza alta, en cuanto al riesgo físico de las estructuras, se obtuvieron valores altos de riesgo para la mayoría de las viviendas.

RECOMENDACIONES

- La modelación de flujos de lodos tiene cierto grado de incertidumbre, asociada con la calidad de la información de campo. Para minimizar la incertidumbre se debe tener una descripción precisa de lo ocurrido (tiempos de duración de la avalancha, profundidades de inundación, entre otros).
- La calidad de la modelación de flujos también depende del grado de precisión del levantamiento topográfico. Se recomienda hacer esta clase de levantamiento con curvas de nivel cada cinco metros en aquellas zonas donde se presenten este tipo de eventos.
- Se debe tener un registro de alturas de depositación de avalanchas ocurridas en el pasado en aquellas zonas donde frecuentemente se presente este tipo de eventos. Esto permitirá hacer una mejor calibración de los modelos que simulan el comportamiento de ese tipo de flujos.
- Para el caso de la cuenca de la quebrada La Chapa se recomienda instalar una estación pluviométrica, ya que las más cercanas quizás no representen con precisión el comportamiento hidrológico de la cuenca.
- El mapa de riesgo obtenido de un estudio de evaluación del riesgo debe emplearse para prever obras de protección y reubicación de las viviendas afectadas, que se encuentren en la zona de alto riesgo.
- En las poblaciones afectadas deben establecerse sistemas de alerta temprana de funcionamiento automático, que sean confiables y permanentes. Además, se recomiendan zonas de evacuación adecuadas para pronóstico anticipado. Su efectividad depende de la calidad de la instrumentación en el origen de los eventos.

REFERENCIAS

- Aparicio, F. (1992). Relaciones lluvia-escorrentía. En *Fundamentos de hidrología de superficie* (pp. 203-237). México, D.F.: Limusa. Recuperado a partir de http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoren/HIDRO/Fundamentos_de_hidrologia_de_superficie_-_Aparicio.pdf.
- Asale, R. (s. f.). Definición de riesgo. Recuperado el 20 de diciembre de 2016, a partir de <http://dle.rae.es/?id=WT8tAMI>.
- Ávila, G., Cubillos, C. & Granados, A. (2016). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa* (1.ª ed.). Bogotá: Minminas y Servicio Geológico Colombiano.
- Beverage, J. & Culbertson, J. (1964). Hyperconcentrations of suspended sediment. *Journal of Hydraulics Division*, 90, 117-128.
- Bonham-Carter, G. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists*. Oxford: Pergamon Press.
- Brunsdon, D. (1984). Mudslides. En *Slope Instability* (p. 620). Chichester: John Wiley & Sons.
- Calvillo, M., Cascini, L. & Mastroianni, S. (2013). Landslide zoning over large areas from a sample inventory by means of scale-dependent terrain units. *Geomorphology*, 182, 33-48.
- Cardozo, C. (2013, mayo). Zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal, Salta (Argentina). Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba. Recuperado a partir de <http://www.famaf.unc.edu.ar/wpcontent/uploads/2014/04/16-Gulich-Cardoso.pdf>.
- Castellanos, R. (1996). Lluvias críticas en la evaluación de amenaza de eventos de remoción en masa. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Chaparro, O. (2005). Evaluación de riesgo por flujos de lodo en la quebrada La Chapa, municipio de Tasco y Socha (Boyacá). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Chow, V. T., Maidment, D. & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada* (McGraw Hill).
- Chuquisengo, O., Ferradas, P. & Díaz, J. (2005). Gestión de riesgo en los gobiernos locales. En *Gestión de riesgo en los gobiernos locales* (p. 12). Lima. Recuperado a partir de <https://books.google.com.co/books?id=4DDRTIuIMO4C&printsec=frontcover&hl=e s#v=onepage&q&f=false>.
- Contreras, S. (2007, marzo). Avalúo de edificaciones y construcciones. Guanare: Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora (Unellez).
- Cruz, M. (2001). Determinación de la tormenta de diseño. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 22 (2), 27-30.
- Curso online gratis de ArcGIS 9.3. (2016, diciembre). Recuperado el 23 de diciembre de 2016, a partir de <http://www.todosig.es/9-mdt-y-tin.html>.
- Dai, F., Lee, C. & Ngai, Y. (2001a). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64 (1), 65-87. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00093-X).
- Dai, F., Lee, C. & Ngai, Y. (2001b). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64 (1), 65-87. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00093-X).
- Esper, M. (2014). Susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos, mediante SIG, en una porción del departamento de Iglesia, San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 71 (2), 267-274.
- García, M. (1998). *Manual de estabilidad de taludes* (Invías). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- García, M. (2008). *Sedimentation engineering. Processes, measurements, modeling and practice*. ASCE.
- García, R., Noya, M. & López, J. (2003). Hazard mapping for debris-flow events in the alluvial fans of northern Venezuela. Presentado in Third International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment. Davos, Suiza.
- Huang, X. & García, M. (2016). A perturbation solution for bingham-plastic mudflows. *Journal of Hydraulics Engineering*, 123 (11), 986-994.
- Ingeniería y Geotecnia Ltda. (1988). Problemas geotécnicos en la región Belencito - Paz de Río (N. 222-12). Bogotá.
- Instituto Geográfico Nacional de Argentina (2016, diciembre). Introducción. Recuperado el 23 de diciembre de 2016, a partir de <http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Introduccion>.
- Johnson, A. (1984). Debris flow. En *Slope Instability* (p. 620). Chichester: John Wiley & Sons.

- Langlé, R. (2010, junio). ¿Qué es un SIG? Recuperado el 23 de diciembre de 2016, a partir de <https://langleruben.wordpress.com/%c2%bfque-es-un-sig/>.
- Lara, G. (2002). Análisis de amenaza por inestabilidad de la parte sur del municipio de Guacamayas, departamento de Boyacá. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Lavell, A. (2001). Sobre la gestión del riesgo: apuntes hacia una definición. Recuperado el 20 de diciembre de 2016, a partir de http://www.cridlac.org/cd/cd_inversion/pdf/spa/doc15036/doc15036.htm.
- Lavell, A., Narváez, L. & Pérez, G. (2009). *La gestión del riesgo de desastres: un enfoque basado en procesos* (1.a ed.). Lima.
- López, D. (2004). Evaluación de amenaza por deslizamientos: para el área correspondiente con la plancha 172-I-B. Paz de Río, Boyacá, Colombia, a través de sistemas de información geográfica. Bogotá: Universidad Nacional de Córdoba.
- López, J., González, M. & Scaini, A. (2012). Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca del río Arga, en Pamplona, y su aplicación a cinco avenidas significativas. *Obras y Proyectos*, 1 (12), 15-30.
- Luna, B., Blahut, J., Van Westen, C., Sterlacchini, S., Van Asch, T. & Akbas, S. (2011). The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 2047-2060.
- Manzanal, D., Drempevic, V., Haddad, B., Pastor, M. & Martin, M. (2016). Application of a New Rheological Model to Rock Avalanches: An SPH Approach. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49 (6), 2353-2372. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0909-5>.
- Mayorga, R. (2003a). Desarrollo de una metodología para la determinación de lluvias detonantes de deslizamientos. *Meteorología Colombiana*, 73-80.
- Mayorga, R. (2003b). Determinación de umbrales de lluvia detonante de deslizamientos en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 157-168.
- Medidores de flujo - Instrumentación (s.f.). Recuperado 23 de diciembre de 2016, a partir de http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index_archivos/INST_Flujo/fundamentosteoricos.html.
- Mejía, R. (2011). *El riesgo y la historia empresarial antioqueña. Tres casos de estudio* (p. 50). Medellín: Fondo Editorial Universidad Eafit.
- Méndez, A. & Pérez, L. (2010). Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos (una revisión del viscosímetro de Couette). *Latin American Journal of Physics Education*, 4 (1), 237-245.
- Millán, J. & González, A. (2001). Evaluación de la acción del hombre en los estudios de amenaza y riesgo por deslizamiento en Bogotá (Colombia). Presentado en el III Simposio Panamericano de Deslizamientos, Bogotá.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo. Decreto 1807 de 2014.
- Moreira, A. (1996). Los sistemas de información geográfica y sus aplicaciones en la conservación de la diversidad biológica. *Ambiente y Desarrollo*, 7 (2), 80-86.
- Neumann, A. & Downs, M. (2002). Instrumentos de apoyo para el análisis y la gestión de riesgos naturales en el ámbito municipal de Nicaragua. Managua: Edisa. Recuperado a partir de <http://www.cridlac.org/digitalizacion/pdf/spa/doc14893/doc14893.htm>
- NGRD (2016). Consolidado anual de emergencias. Recuperado el 11 de agosto de 2016, a partir de <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/>.
- Niño, V. (2015). *Comparación de criterios de engrosamiento del flujo para la simulación de avalanchas en casos colombianos de estudio*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Núñez, R. & Giraldo, M. (2012). *Conceptos generales sobre gestión del riesgo de desastres y contexto del país* (p. 6). Santiago: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Recuperado a partir de http://www.preventionweb.net/files/38050_38050conceptosbsicos.pdf.
- O'Brien, J. (2009). Flo 2D. *Reference Manual*. Recuperado a partir de <https://www.flo-2d.com/download/>.
- O'Brien, J. & Julien, P. (1985). Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediments flows (pp. 260-279). Presentado en Specialty Conference on Delineations of Landslide, Flashflood, and Debris Flow Hazards in Utah. Utah: Logan.
- O'Brien, J., Julien, P. & Fullerton, W. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulics Engineering*, 119 (2), 244-261.
- O'Brien, J. & Julien, P. (1988). Laboratory Analysis of Mud Flow Properties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114 (8), 877-887.
- Obregón, C. & Lara, J. (2014). Aplicación del mapa de susceptibilidad por procesos de geodinámica superficial a la gestión territorial. *Rev. del Instituto de Investigación (RIIGEO)*, 17 (33), 73-80.
- Ojeda, J., Castro, E., Valencia, A. & Fonseca, S. (2002). Evaluación del riesgo por fenómenos de remoción en masa: guía metodológica. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Páez, J. (2016). Modelación matemática de flujos de avalancha. Bogotá: Universidad de los Andes. Recuperado a partir de <https://documentodegrado.uniandes.edu.co/documentos/10141.pdf>.
- Pérez, J. (2004). Estudio Geológico y Geomorfológico de la Microcuenca de la quebrada La Chapa. Municipios Paz de Río - Socha - Tasco. Crepad Boyacá.
- Pierson, T. & Costa, J. (1987). A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. *Engineering Geology*, 7, 1-12.
- Política nacional de gestión de riesgos de desastres, Pub. L. No. Ley 1523 de 2012 (2012). Recuperado a partir de <http://www.alcaldiaibogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=47141>.
- Prieto, C. (2011). Metodología para la evaluación de riesgos por deslizamientos en líneas de conducción de hidrocarburos. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Radio, C. (2011, diciembre 8). Una persona herida deja una avalancha en Paz de Río, Boyacá. Recuperado 31 de marzo de 2017, a partir de http://caracol.com.co/radio/2011/12/08/regional/1323334320_589788.html.
- Rodríguez, A. (1987, junio). Estudio geológico y mapa de riesgos quebrada La Chapa -Área de los municipios de Socha, Tasco y Paz del Río - Depto. de Boyacá. Ministerio de Minas y Energía.
- Sánchez, J. (2016). Hidrología superficial (III): Relación precipitación - escorrentía. Universidad de Salamanca. Recuperado a partir de http://hidrologia.usal.es/temas/Hid_sup_3.pdf.
- Sepúlveda, A. & Patiño, J. (2016). Metodología para la evaluación de riesgo por flujo de detritos detonados por lluvia. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Stefanović, M., Gavrilović, Z. & Bajčetić, R. (2015). Local Communities and Challenges of Torrential Floods. OSCE.
- Suárez, Á., Peraldo, G., Badilla, E. & Obando, L. (2009). Zonificación geomorfológica para la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos en la cuenca del río Viejo, Puriscal, Costa Rica. *Revista geológica de América Central*, 41(1), 55-69.
- Suárez, J. (1998). Zonificación de amenaza y riesgo. En *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales* (Ingeniería de Suelos Ltda, pp. 355-376). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Recuperado a partir de <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonastropicales.html>.

Suárez, J. (2001). Erosión en masa. Flujos y avalanchas. En *Control de erosión en zonas tropicales* (pp. 167-192). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Suárez, N. & Suárez, J. (2006). *Caracterización, análisis y diagnóstico de los flujos de lodos y detritos en la cuenca de la quebrada Angulito en Girón, Santander*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Takahashi, T. (1981). Debris flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 13, 57-77.

Undro (1979). *Natural disasters and vulnerability analysis*. Ginebra. Recuperado a partir de <http://www.unisdr.org/files/resolutions/NL800388.pdf>.

Unicef (2006). *Prevención y mitigación de desastres* (pp. 16-28). Santo Domingo: Unicef.

Vanguardia (2009). Los 10 desastres naturales que marcaron al país. Recuperado el 18 de mayo de 2017, a partir de <http://www.vanguardia.com/historico/26659-los-10-desastres-naturales-que-marcaron-alpais>.

Modelación numérica del comportamiento de la represa del proyecto hidroeléctrico El Guavio

Numeric modelling of the dam behavior at El Guavio hydroelectrical project

CARLOS FERNANDO PEÑA PINTO¹ - RICARDO SALAZAR FERRO²

1. Magíster en Ingeniería Geotécnica.

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

carlos.pena@mail.escuelaing.edu.co - ricardo.salazar@escuelaing.edu.co

Recibido: 12/03/2018 Aceptado: 15/04/2018

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

Resumen

En el presente artículo se registran los resultados de la modelación numérica que se realizó del comportamiento, relativo a esfuerzos efectivos, presiones de poros y deformaciones, de la represa Alberto Lleras, dentro del proyecto hidroeléctrico El Guavio. Esta represa es del tipo ECRD (*Earth Core Rockfill Dam*), tiene una altura de 247 m y posee registros de instrumentación de más de 20 años. Lo anterior se logró mediante la implementación del *software* Abaqus, que utiliza el método de elementos finitos y el acoplamiento entre flujo y deformaciones, simulando las diversas etapas del proyecto, como la construcción (5 años), reposo (2,5 años), primer llenado (5 meses) y operación.

En la modelación se identifican factores importantes en la evolución del comportamiento de la represa en materia de la trayectoria de esfuerzos, deformaciones y condiciones de carga, suponiendo que el núcleo de arcilla se encuentra saturado. Se llega a apreciaciones valiosas, tales como que la geometría y los esfuerzos del núcleo se “cuelgan” de los espaldones en enrocado y se hace referencia a un potencial de almacenamiento de energía del núcleo hasta un punto culmen, determinado por las condiciones de frontera del modelo y las propiedades del material.

Palabras claves: condiciones de carga (drenada y no drenada), presiones de poros, compresibilidad, plasticidad, esfuerzo promedio efectivo, colgamiento.

Abstract

This article shows the results of a numeric modelling performed for the behavior, in terms of effective stress, pore pressure, and strains, of Alberto Lleras Dam at El Guavio hydroelectrical project. This is an ECRD (Earth Core Rockfill Dam), 247 meters high, and has instrumentation records over 20 years old. All of the above was achieved through the implementation of Abaqus software, which uses the finite element method and coupling between flow and strains, simulating each of the project stages, such as construction (5 years), settlement (2.5 years), first filling (5 months), and operation.

In the modelling, important factors in dam behavior evolution were identified regarding stress trajectories, strains, and load conditions, assuming the clay core is saturated. Meaningful conclusions were reached, e.g. the core geometry and stress depend on the rock dam shoulders and refers to core energy storage potential until a breaking point, determined by the frontier conditions of the model and material properties.

Keywords: load conditions (drained and undrained), pore pressure, compressibility, plasticity, effective average stress

Hoy en día, la simulación de problemas complejos mediante *software* especializado ayuda a entender mejor los procesos que se generan en la ingeniería, además de que permite diseñar y prever el comportamiento que las estructuras tendrán en su vida de servicio. Dado que la represa Alberto Lleras posee registros de instrumentación y es una estructura que se encuentra en una interacción compleja y acoplada entre redes de flujo de agua y deformaciones en el esqueleto sólido, se decidió realizar una idealización geométrica y modelación numérica de esta obra, asignando los parámetros geotécnicos hallados en ensayos de laboratorio, para luego comparar estos resultados con los que evidencia la instrumentación. Para el desarrollo y entendimiento del análisis se tomaron como base la teoría de flujo en medios porosos bajo deformación, los modelos constitutivos elástico (ley generalizada de Hooke) y elastoplástico (modelo Cam Clay modificado), y el método de los elementos finitos.

Se debió definir un sistema de unidades para el programa de elementos finitos (tabla 1), ya que éste no trae uno por omisión, de la siguiente manera:

Luego se caracterizaron los materiales de transición y espaldones mediante el modelo elástico, donde los parámetros relevantes son el módulo de Young (E) y la relación de Poisson (ν), la fuerza de cuerpo está definida por la densidad y su propiedad hidráulica es la permeabilidad (tabla 2).

Para el material del núcleo se utilizó el modelo elastoplástico modificado Cam Clay. Los parámetros en esta

ocasión para la zona de plasticidad son la relación de esfuerzos en el estado crítico (M), la pendiente de la línea de consolidación normal en el plano e vs. $\ln p'$ (λ) y la relación de vacíos en la línea de consolidación normal, correspondiente a una presión unitaria (e_1). Las propiedades elásticas quedan definidas por la pendiente de la línea de recompresión en el plano e vs. $\ln p'$ (k) y la relación de Poisson (ν). Para finalizar, la fuerza de cuerpo está caracterizada por la densidad y el comportamiento hidráulico mediante la permeabilidad. Los parámetros anteriormente relacionados y sus respectivos valores para el núcleo se presentan a renglón seguido (tabla 3).

Tabla 3
Parámetros del material elastoplástico

Parámetro	Núcleo
M	1
k	0,002
e_1	0,4
λ	0,02
ν	0,4
Densidad	0,001804
Permeabilidad	$1,1574 \times 10^{-8}$

Para la modelación de elementos finitos se emplearon elementos cuyos grados de libertad eran desplazamientos y presiones en condición de deformaciones en el plano. Además, se estableció como condición de frontera mecánica que en la base (fundación) se restringieran

Tabla 1
Sistema de unidades utilizado en el programa de elementos finitos

Longitud	Fuerza	Esfuerzo	Tiempo	Permeabilidad	Peso unitario	Densidad
m	MN	MPa	s	m/s	MN/m ³	Gg/m ³

Tabla 2
Parámetros de los materiales elásticos

Parámetro	Enrocado 3C Aguas arriba	Transición	Enrocado 3B	Enrocado 3C Aguas abajo
Módulo de Young (E)	70	70	124	87
Relación de Poisson (ν)	0,3	0,3	0,3	0,3
Densidad	0,0019	0,0018	0,0019	0,00185
Permeabilidad	5×10^{-1}	1×10^{-3}	3×10^{-1}	5×10^{-1}

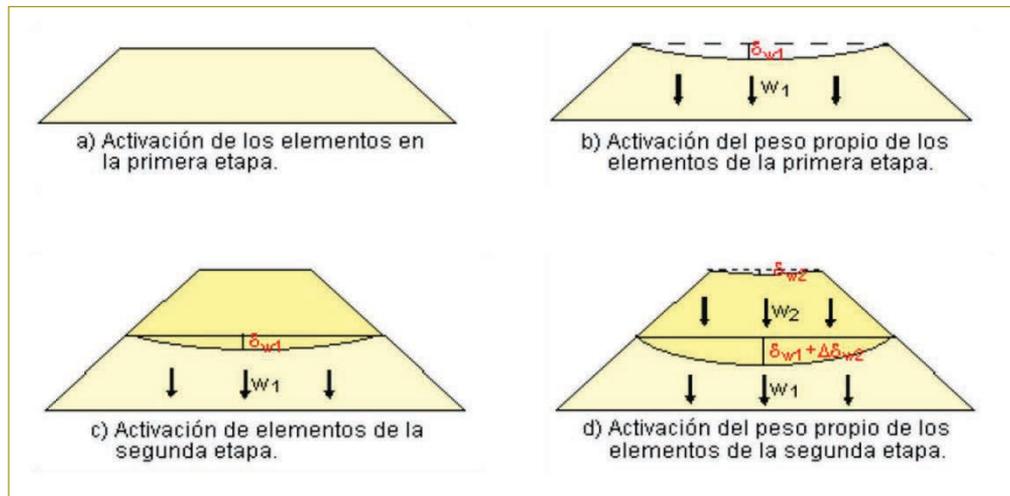


Figura 1. Modelación de capas sucesivas con material elástico únicamente.

los desplazamientos verticales y horizontales (Despl. $X =$ Despl. $Y = 0$) y como condiciones hidráulicas que los enrocados (3B y 3C) funcionaran como drenajes, es decir, que su presión de poros fuera igual a cero y que la fundación fuera impermeable.

Para la etapa de construcción, que va desde la colocación del primer relleno hasta el final de la construcción (EOC), se modeló el proceso de conformación del relleno en capas sucesivas ascendentes para zonas donde sólo se involucró el material elástico de la manera como se ve en la figura siguiente (figura 2).

Por el contrario, para modelar el proceso constructivo de capas sucesivas en zonas donde se involucraba el material elastoplástico, se determinó el siguiente desarrollo de superposición de estratos:

Se obtuvieron resultados específicos a lo largo del tiempo en zonas específicas de análisis, así como también resultados gráficos por contornos. Como primer foco de análisis se tienen los resultados de los puntos de control conseguidos (figura 3) y se comparan con los registros de presiones de poros (u), celdas de presión (CP) y sensores neumáticos de asentamiento (SNA).

Igualmente, se solicita al programa la realización de las gráficas de trayectoria de esfuerzos (esfuerzo promedio - p' vs. esfuerzo de distorsión Von Mises - q), de compresibilidad, de variación de p' y q en función del tiempo y la variación de las componentes ortogonales del esfuerzo promedio en el tiempo.

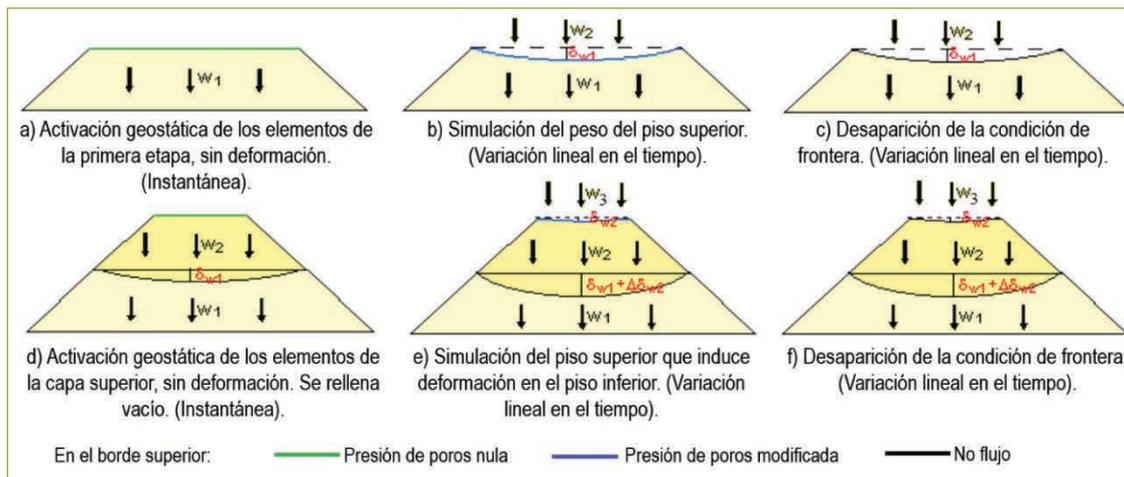


Figura 2. Modelación de capas sucesivas que poseen material elastoplástico.

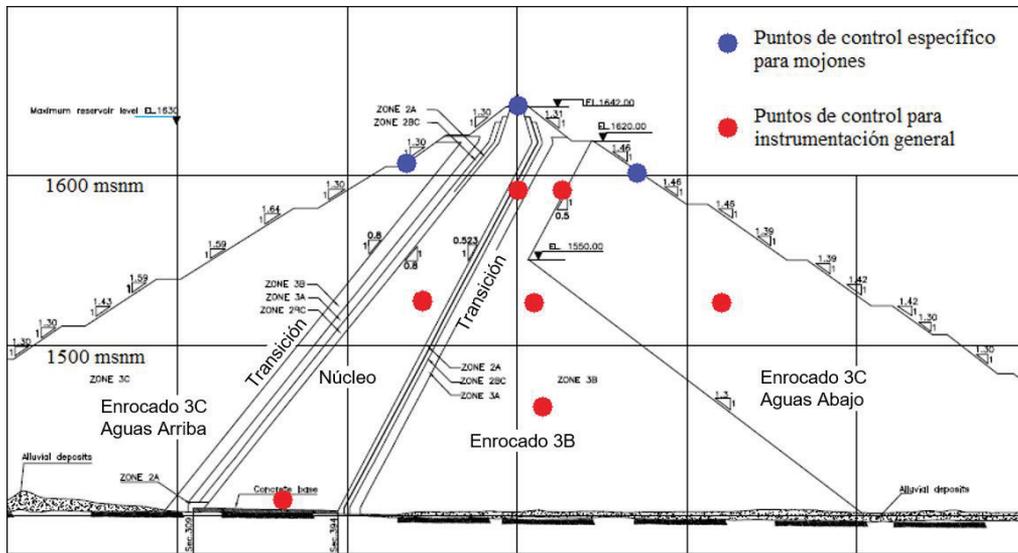


Figura 3. Zonificación y puntos de análisis de la simulación numérica.

Para el punto en el núcleo a la elevación 1520 msnm se obtuvieron las siguientes gráficas (figura 4), en las que se puede observar que mediante la modelación no se alcanzan las presiones de poros que la instrumentación registra durante construcción, los valores son bajos (del orden de 0,2 MPa) y hacen que los esfuerzos efectivos sean cercanos a los esfuerzos totales. Durante el periodo de reposo (desde el final de la construcción hasta el inicio del llenado), en la modelación se obtienen tendencias horizontales de esfuerzos, mientras que para la instrumentación se observa un notorio descenso de la

presión de poros (0,5 MPa de disipación) y los esfuerzos totales tienen una tendencia similar. Lo anterior se puede explicar mediante un colgamiento del núcleo en los espaldones, que hace que el agua fluya y se intente producir un proceso de consolidación en el núcleo, pero como hay restricción de movimiento del esqueleto de éste (casi empotramiento en la interfase suelo- espaldones), no se deformará y por lo tanto no habrá incremento en el esfuerzo efectivo. Como el esfuerzo total es la sumatoria del esfuerzo efectivo y la presión de poros, los esfuerzos efectivos prácticamente tendrán el mismo

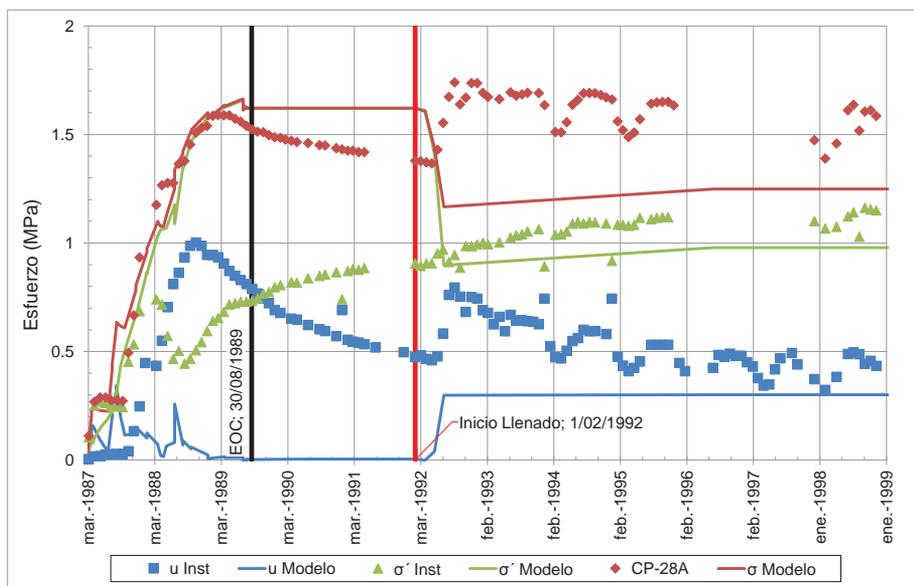


Figura 4. Comportamiento de esfuerzos en dirección vertical y presiones de poros, núcleo EL.1520 msnm.

comportamiento de la presión de poros, porque los esfuerzos efectivos permanecen constantes. Para poder llegar a este punto de disipación de energía, el núcleo tuvo que haber acumulado una presión de poros considerable hasta el final de la construcción y luego dejarla perder. Mediante el programa de elementos finitos se verificó que para una combinación de condiciones de frontera y de carga, y con las propiedades hidráulicas del material, se llega a un punto culmen de acumulación de energía, que como se puede observar en la simulación llegó a un máximo de 0,35 MPa, y parece como si se transformara en una propiedad inherente del material a una altura determinada.

Un fenómeno notorio en el periodo del primer llenado mediante la modelación numérica es que, por medio del proceso de carga hidráulica (ascenso del nivel del embalse), la presión de poros repercute en una disminución de los esfuerzos totales; se observa que el decremento de esfuerzo efectivo es mayor que el incremento de la presión de poros, lo que da como resultado un descenso en los esfuerzos totales. El comportamiento de los registros de instrumentación en este periodo para los esfuerzos totales es contrario, ya que aumentan muy parecido a como aumentan las presiones de poros con los esfuerzos efectivos constantes, similar a un proceso de carga no drenado dentro del rango elástico.

Sin embargo, el valor del incremento de presión de poros de la instrumentación es muy cercano al del modelo, del orden de 0,3 MPa, lo que indica que las propiedades

hidráulicas escogidas del modelo están de acuerdo con los datos *in situ* y que se está presentando una reducción de energía cercana al 70 % dentro del núcleo.

Por último, durante la operación, la instrumentación sigue mostrando un proceso de “consolidación” fallida, producida por el colgamiento del núcleo en los espaldones, mientras que con el modelo se llega a un equilibrio hidráulico sin incremento de presiones de poros.

De las figuras siguientes (figuras 5 y 6), que contienen únicamente datos proveniente de la modelación numérica, se puede observar que durante el proceso de construcción existe una tendencia ascendente del esfuerzo promedio p' y del esfuerzo de distorsión q , lo que indica un proceso de carga parcialmente drenado en la zona elastoplástica, debido a que el suelo se implementó en una condición inicial normalmente consolidada, junto con el mayor decremento de relación de vacíos. En el periodo de reposo, hay un equilibrio sin incrementos de esfuerzos. Luego, en el tiempo correspondiente al primer llenado, se aprecia que el esfuerzo promedio tiene una tendencia descendente, producida por el incremento de presión de poros en función de las ecuaciones constitutivas y las de acoplamiento. También sobresale un punto de inflexión (o quiebre) en la gráfica de q , que diferencia el paso de un proceso de descarga parcialmente drenado dentro de la zona elástica a un proceso de carga no drenado en la zona elastoplástica (decremento de p' y aumento de q); en ambos procesos no se percibe una variación mayor en la relación de

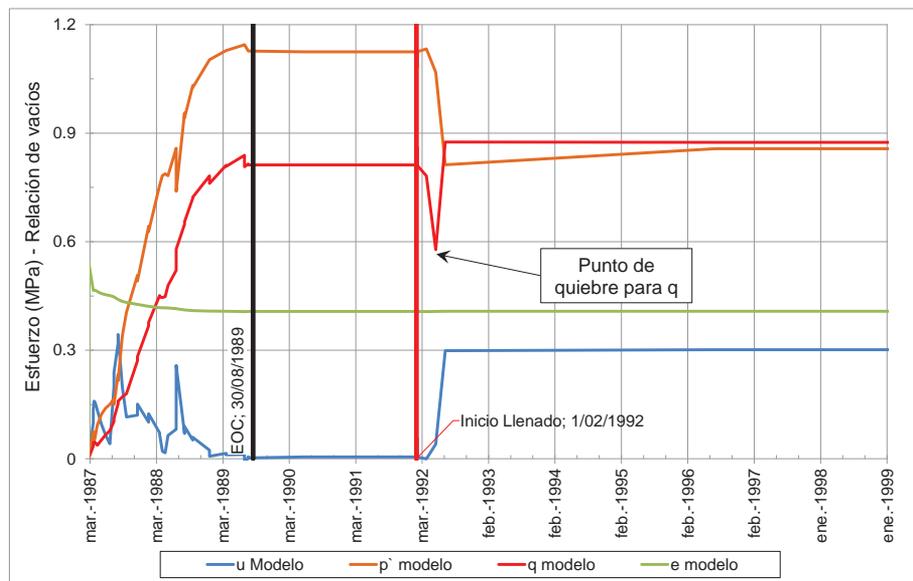


Figura 5. Variación p' y q en función del tiempo. Núcleo EL. 1520 msnm.

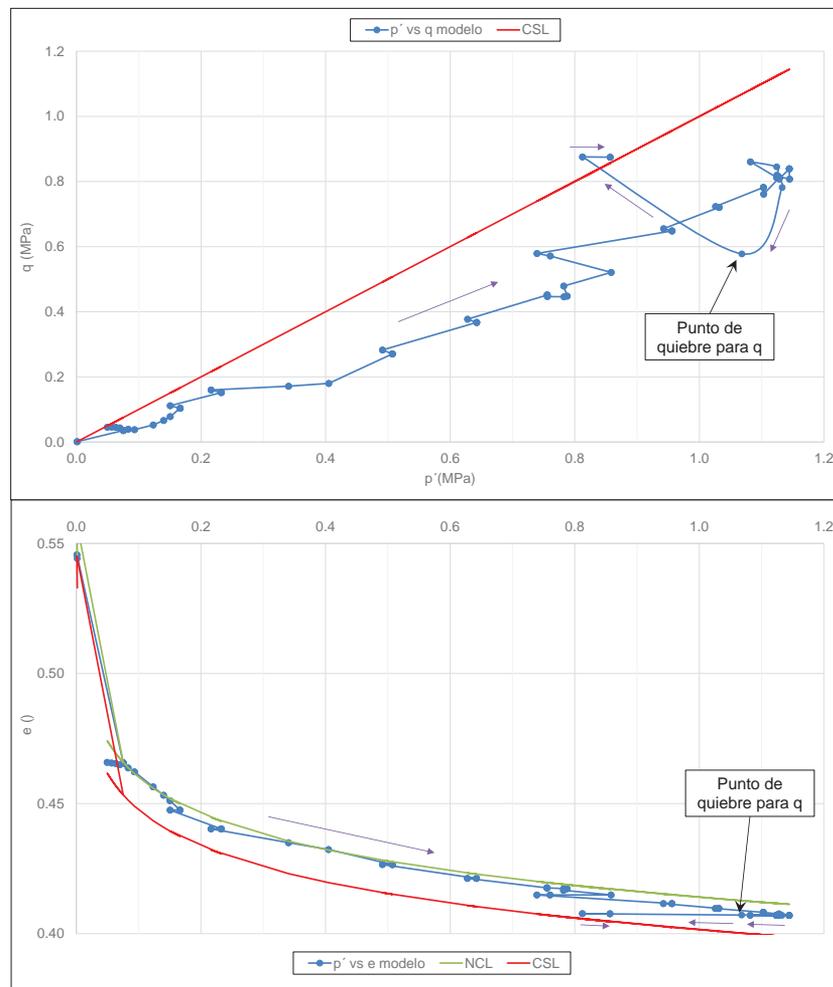


Figura 6. p' vs. q y p' vs. Relación de vacíos (e). Núcleo EL. 1520 msnm.

vacíos del suelo debido al valor bajo del parámetro de expansión (k), por lo que se señala que antes y después del quiebre en q , es la presión de poros la que intenta conducir al suelo a la falla, generando distorsiones pero pocos cambios volumétricos. Ya en el periodo de operación se observa que la presión de poros y q permanecen constantes, pero p' aumenta un poco su valor, lo que se puede atribuir a una acomodación del esqueleto.

Durante la construcción se observa un incremento de esfuerzo axial en todas las direcciones (vertical, horizontal y perpendicular al plano de análisis), lo que indica que el suelo se está comprimiendo por el proceso de carga de superposición de estratos (figura 7). Luego, en el periodo de reposo, se tiene una distribución horizontal sin variación de esfuerzos. En la etapa de llenado, el decremento de presión se distribuye en las componentes direccionales de esfuerzos (σ'_{11} , σ'_{22} , σ'_{33} y σ_{12}) en función de la condición de carga y de la

dirección y magnitud de la velocidad de infiltración del agua, que puede repercutir en un aumento de los esfuerzos efectivos verticales si la dirección de flujo es hacia abajo; su magnitud es considerable, en especial si se presume que no hay lavado de material; lo mismo ocurre en la componente horizontal, donde es posible que la velocidad de infiltración debilite o fortalezca el contacto entre las partículas del esqueleto. Los picos y cambios de pendiente en las gráficas durante el llenado coinciden con el punto de quiebre encontrado en la gráfica de q , mostrando que antes había una condición de carga drenada (alta influencia de la velocidad de flujo) y después es una condición no drenada, donde el efecto de la velocidad de flujo se reduce. Específicamente en este caso se observa que el esfuerzo horizontal es el que aumenta en la condición de carga drenada, lo que muestra que el flujo lo está “fortaleciendo” en su configuración sólida.

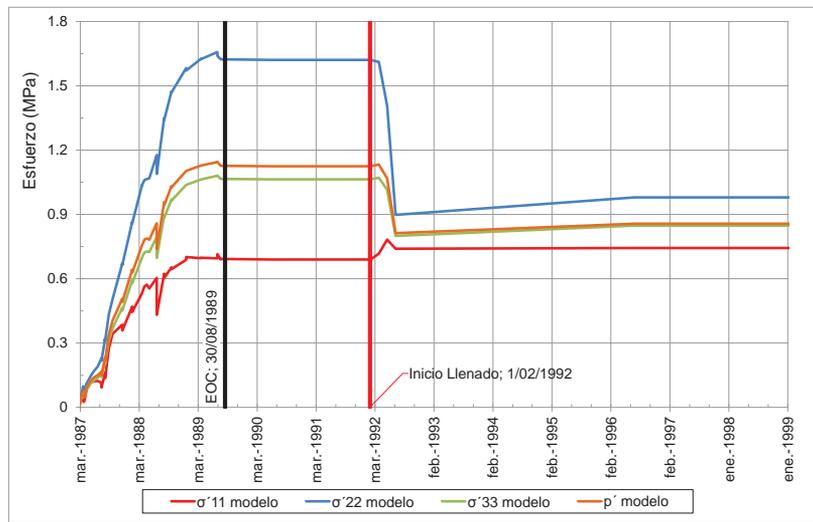


Figura 7. Componentes direccionales (σ'_{11} horizontal, σ'_{22} vertical, σ'_{33} perpendicular y σ_{12}) del esfuerzo promedio (p'). Núcleo EL. 1520 msnm.

Ahora, tomando como punto de análisis los esfuerzos efectivos horizontales durante la construcción (figura 8), que en un comienzo se calcularon como una fracción de los efectivos verticales, se observa que su evolución es cercana a la de los calculados por la instrumentación, señalando una buena distribución de la tensión hidrostática (p') en cada uno de sus componentes de dirección (σ'_{11} , σ'_{22} , σ'_{33} y σ_{12}). En esta ocasión, nuevamente, influye la posesión de una distribución de presión de poros distinta e inferior a la encontrada en campo, que repercute en la obtención de valores de esfuerzos totales diferentes y menores que los encontrados en sitio. En esta ocasión, durante el primer llenado, hay aumento del esfuerzo total en la dirección

horizontal, apoyado por el incremento del esfuerzo axial en esa dirección, que vino de la repartición de p' en componentes direccionales. En la instrumentación durante operación se mantiene la disipación de presión de poros sin que las tome el esfuerzo efectivo y haciendo que los esfuerzos totales bajen, mientras que en la modelación ya todo se encuentra en equilibrio.

Se observa que los valores específicos de asentamiento arrojados por el programa son menores que los registrados en campo, pero la tendencia de comportamiento es similar (figura 9). Esto se puede deber a la adopción de bajos valores para los parámetros de deformación plásticos (λ). Se supone que al realizar una modelación con valores más altos de las pendientes de

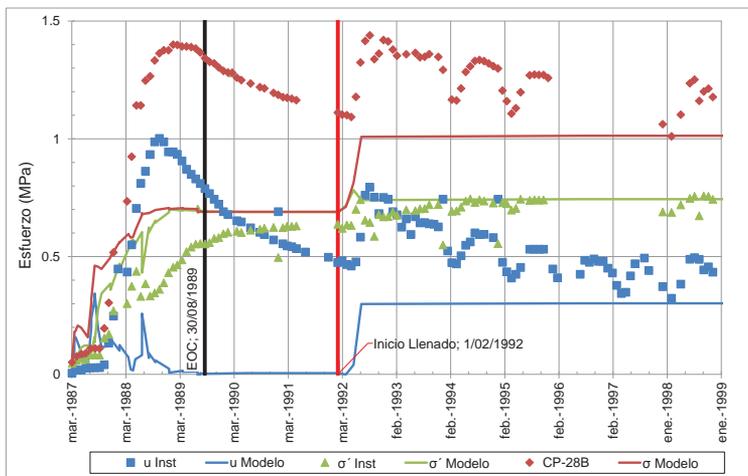


Figura 8. Comportamiento de esfuerzos en dirección horizontal y presiones de poros. Núcleo EL. 1520 msnm.

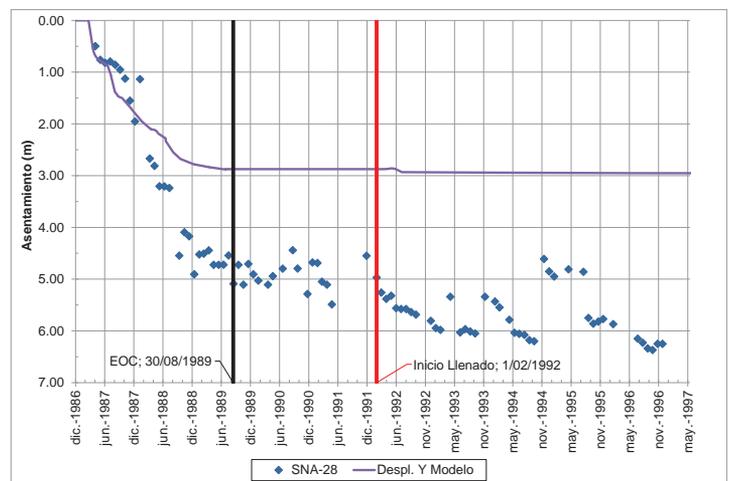


Figura 9. Asentamientos. Núcleo EL. 1520 msnm.

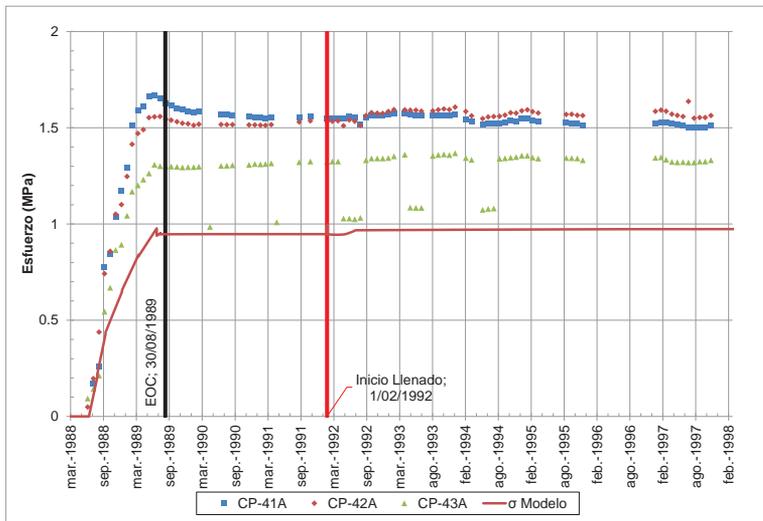


Figura 10. Esfuerzos en dirección vertical. Transición EL. 1590 msnm.

las líneas de recompresión y consolidación normal, la tendencia seguirá siendo la misma, pero los valores se aproximarán más a los “reales”, sin olvidar que se puede incurrir en problemas de convergencia debido al incremento de deformación que se generará y al respectivo acople con el medio líquido.

Los resultados anteriores se presentan de manera similar para el otro punto de análisis dentro del núcleo de la presa.

Con respecto al punto de análisis ubicado en la transición, se observa que los valores de esfuerzo obtenidos por el modelo están por debajo de los de instrumentación, pero con una tendencia bastante similar. Con respecto a las deformaciones, la tendencia de simulación

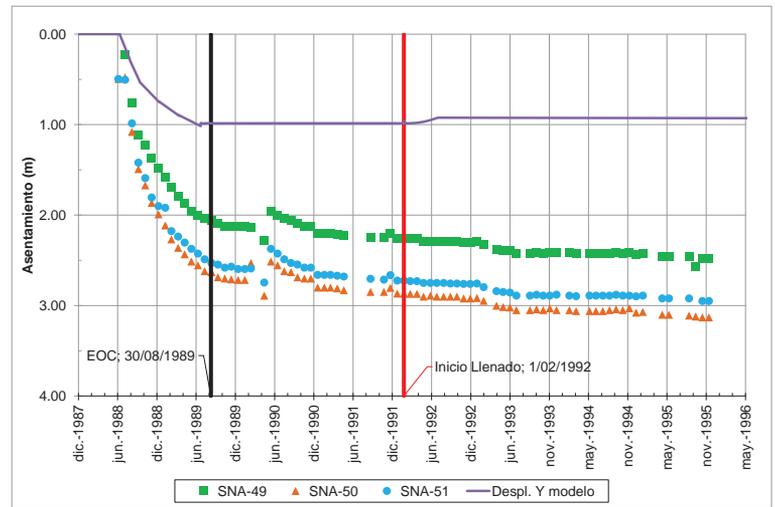


Figura 11. Asentamientos. Transición EL. 1590 msnm.

es muy similar a la de campo, pero las deformaciones tienen menor valor (figuras 10 y 11).

Este comportamiento también se evidenció en los puntos de análisis del enrocado 3C aguas abajo.

Por su parte, en los puntos de análisis en el enrocado 3B, los esfuerzos modelados se acoplan perfectamente a los valores y tendencia de aquellos registrados por los instrumentos; sin embargo, los asentamientos sí siguen subvalorados (figuras 12 y 13).

Como puntos de análisis para la deformación en superficie, se tomó el punto de control topográfico en la cresta, arrojando los valores mostrados en la figura siguiente (figura 14), en la que, según la instrumentación, existe asentamiento durante el periodo de reposo hasta

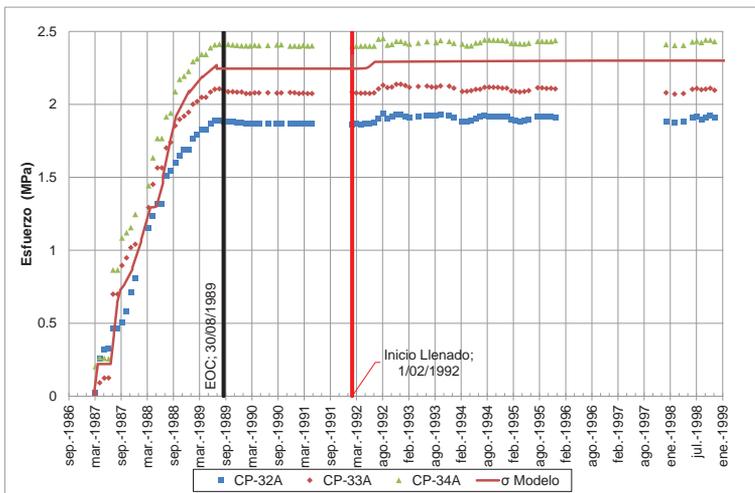


Figura 12. Esfuerzos en dirección vertical. Enrocado 3B EL. 1520 msnm.

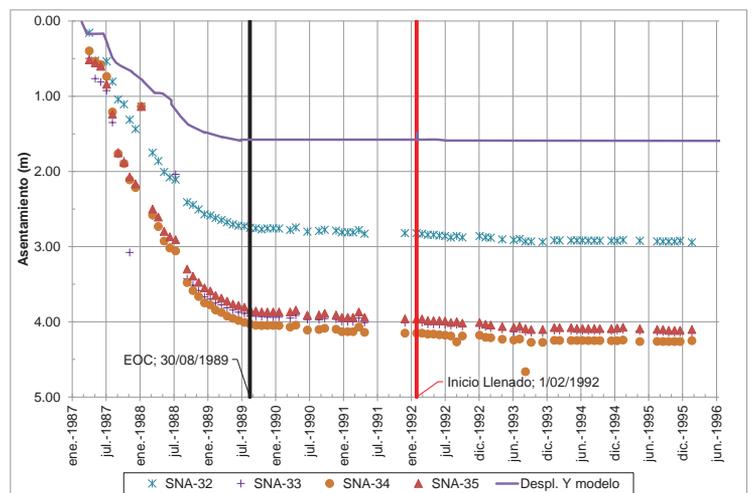


Figura 13. Asentamientos. Enrocado 3B EL. 1520 msnm.

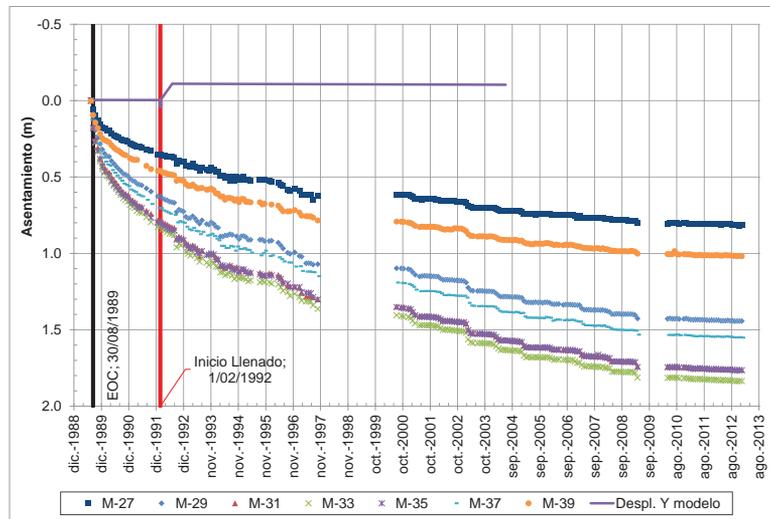


Figura 14. Asentamientos cresta. EL. 1642 msnm.

la operación, mientras que con la modelación numérica se presenta un “hinchamiento” del suelo generado por la carga hidráulica.

Ahora, en referencia a los resultados por contornos, se puede apreciar una línea de infiltración superior acorde con las pérdidas que se generan en el núcleo y con las condiciones de frontera del modelo (figura 15), un col-

gamiento de los esfuerzos en el núcleo con respecto a los espaldones pronunciados en el contacto aguas arriba núcleo - transición (figura 15).

Los desplazamientos se concentran en el núcleo, por ser un material menos rígido, en ambas direcciones; hacia la mitad de la presa en dirección vertical, con valores pico de 4,3 m (figura 17).

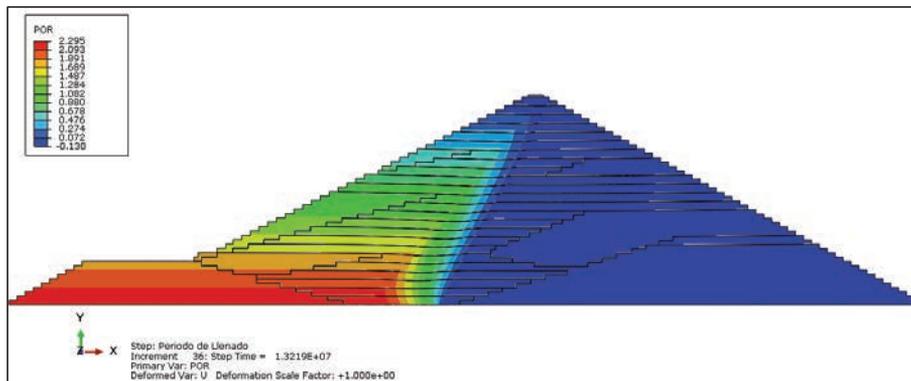
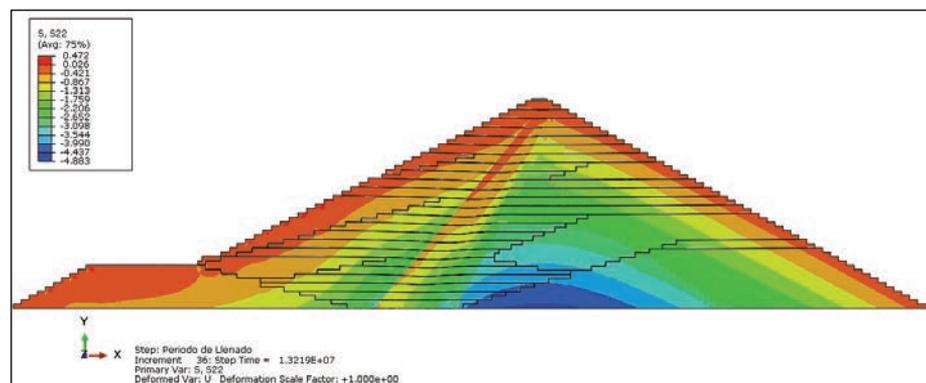


Figura 15. Presión de poros. Periodo de llenado.

Figura 16. Esfuerzos efectivos verticales. Periodo de llenado.



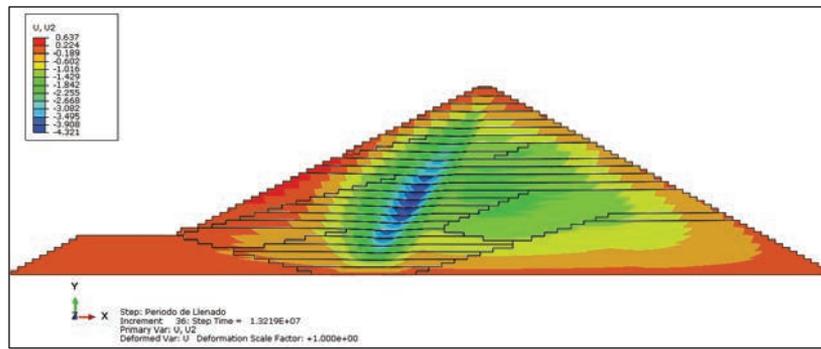


Figura 17. Desplazamiento vertical. Periodo de llenado.

Para los desplazamientos en dirección horizontal (figura 18) se ve una repartición de desplazamientos en dirección hacia aguas arriba, concentrados en el núcleo (1,23 m), y aguas abajo en la cresta y en el enrocado 3C (0,99 m).

Por último, se puede observar en la deformada de la presa un colgamiento geométrico del núcleo con respecto a los espaldones, sobresaliente en el contacto aguas debajo del núcleo con la transición (figura 19).

Como conclusión se tiene que la simulación es un proceso bastante sensible a los parámetros escogidos para los materiales, los procesos de carga y las condiciones de borde. Se aprecia que, según la modelación, no se garantiza que el esfuerzo total de un diferencial de suelo permanezca constante, así no se construyan más estratos sobre él, porque si existe un proceso de carga o descarga hidráulica se puede alterar el estado de reposo de los esfuerzos totales, que finalmente se ve reflejado en un colgamiento geométrico y de esfuerzos

del núcleo con respecto a los espaldones, en función también de la geometría inclinada del núcleo.

Se supone que el colgamiento mostrado por la instrumentación en el periodo de reposo se podría simular, siempre y cuando se definan unas propiedades hidráulicas para que al final de la construcción se tenga la suficiente energía para disipar, es decir, posiblemente disminuir los coeficientes de permeabilidad para que el suelo tenga un punto culmen mayor de acumulación de presión de poros. También es posible acercarse más a las deformaciones evidenciadas por los instrumentos mediante una reducción de los parámetros de rigidez elástica y plástica. Como propuesta final, se podría implementar una simulación con dos tipos de elementos finitos: unos que consideren sólo el desplazamiento en las zonas de enrocados y transición, y otros (como los utilizados en esta simulación) que tengan como grados de libertad desplazamiento y presiones de poros para el núcleo.

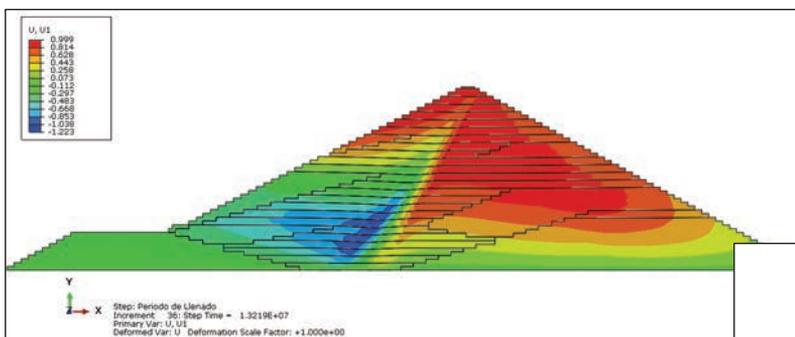
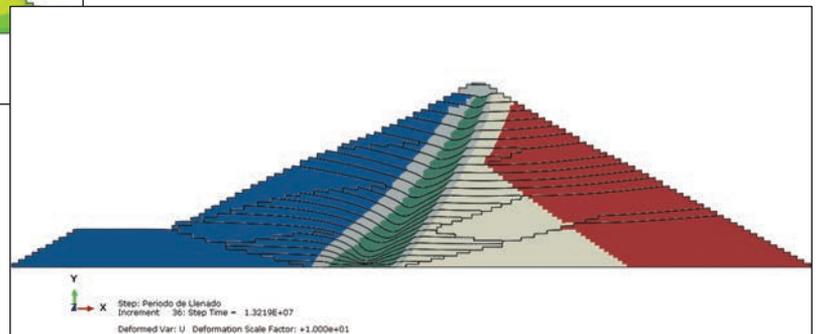


Figura 19. Deformada. Periodo de llenado.

Figura 18. Desplazamiento horizontal. Periodo de llenado.



Propuesta de adaptación del documento ASCE/SEI31-03, "Evaluación sísmica de edificaciones existentes"

Proposal to adapt ASCE/SEI31-03 "Seismic evaluation of existing buildings"

PAULO MARCELO LÓPEZ PALOMINO¹ - PEDRO NEL QUIROGA² - NANCY TORRES CASTELLANOS³

1. Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería.
2. Doctor en Estructuras y director del Centro de Estudios de Estructuras y Materiales. Profesor asociado de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
3. Magíster en Estructuras y doctora en Ciencia y Tecnología de Materiales. Profesora asociada de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

paulo.lopez@mail.escuelaing.edu.co – pedro.quiroga@escuelaing.edu.co - nancy.torres@escuelaing.edu.co

Recibido: 18/04/2017 Aceptado: 31/07/2017

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

Resumen

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10, es esencialmente un código de diseño y construcción de edificaciones nuevas, aunque contiene algunas secciones dedicadas a la evaluación y reforzamiento de edificaciones diseñadas y construidas antes de la vigencia del reglamento. Existen otras metodologías desarrolladas específicamente para la evaluación y el reforzamiento sísmico de edificaciones, como la "Evaluación sísmica de edificaciones existentes" ASCE/SEI 31-03, y cuyo uso es aceptado por la NSR-10. Esta metodología presenta ventajas respecto a códigos de diseño, entre las que se puede señalar que no adoptan un valor único global de capacidad de disipación de energía para toda la estructura, sino que consideran un valor para cada elemento, dependiendo de si su comportamiento es frágil o dúctil, así como su capacidad de deformación.

Con la premisa de que es importante que los ingenieros colombianos cuenten con una metodología alterna para la evaluación sísmica, como la ASCE/SEI 31-03, en este artículo se presentan las diferencias significativas entre esta metodología y la del NSR-10.

Palabras claves: evaluación sísmica, rehabilitación sísmica, vulnerabilidad sísmica, edificaciones existentes.

Abstract

Colombian Seismic Design and Construction Code, NSR-10, is essentially a code intended for new buildings, although it contains some sections on evaluation and retrofitting of existing buildings. There are other methodologies specifically developed for the evaluation and seismic rehabilitation of existing buildings, such as "Seismic evaluation of existing buildings", ASCE / SEI 31, and "Seismic rehabilitation of existing buildings", ASCE / SEI-41, whose use is allowed by the NSR-10. These methodologies have advantages over design codes which may not adopt a global unique value of energy dissipation for the full structure but have considered a value for each element depending on whether their behavior is brittle or ductile, as well as the deformation capacity.

With the premise that it is important for Colombian engineers to have an alternative methodology for seismic evaluation, as is the ASCE/SEI 31-03, this article describes the significant differences between this methodology and the NSR-10.

Keywords: seismic evaluation, seismic rehabilitation, seismic vulnerability, existing buildings.

INTRODUCCIÓN

La metodología de evaluación e intervención de construcciones existentes se estipula en el capítulo A.10 del Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente, NSR-10. El procedimiento consiste en evaluar la demanda y la capacidad de la estructura, comparando las sollicitaciones equivalentes del reglamento con la resistencia efectiva de la estructura y las deflexiones verticales y las derivas de piso obtenidas contra los desplazamientos permitidos.

El NSR-10 da la posibilidad de realizar los estudios de evaluación y rehabilitación sísmica empleando metodologías alternas, como “Seismic Evaluation of Existing Buildings” de la American Society of Civil Engineers (ASCE/SEI 31-03) y NEHRP “Handbook for Seismic Evaluation of Existing” FEMA 178.

En ese sentido, la metodología ASCE/SEI31-03 para la evaluación de edificaciones existentes, además de valorar los requisitos de resistencia y rigidez, tiene en cuenta la configuración estructural y los detalles básicos de ductilidad en un proceso de evaluación, que consta de tres fases: fase 1 (Inspección), fase 2 (Evaluación) y fase 3 (Evaluación detallada).

Con la aplicación de la metodología ASCE/SEI31-03, se determina si la edificación cumple con el objetivo de desempeño seleccionado; de esta manera, se escoge el procedimiento de intervención o rehabilitación sísmica más adecuado para los elementos que presenten deficiencias.

COMPARACIÓN DE LA METODOLOGÍA ASCE/SEI31-03, “EVALUACIÓN SÍSMICA DE EDIFICACIONES EXISTENTES” CON EL NSR-10

El propósito de esta norma es dar una guía a los diseñadores estructurales que efectúan la evaluación, para que determinen si un edificio está adecuadamente diseñado y construido para resistir las fuerzas sísmicas; en ese sentido, se establece la vulnerabilidad sísmica de una edificación existente a través de tres fases de evaluación de orden progresivo.

Generalidades

La metodología ASCE/SEI31-03, que se fundamenta en el diseño basado en el desempeño sísmico, consiste en la selección de esquemas de evaluación apropiados

que permitan el cálculo de dimensionado y detalle de los componentes estructurales, no estructurales y contenidos, de manera que, para unos niveles de movimiento del terreno determinados y con ciertos niveles de fiabilidad, los daños en la estructura no deberán superar ciertos estados límites (Bertero, 2000).

El nivel de desempeño se refiere a los daños esperados de una edificación conforme al sismo utilizado. En el informe del Comité Visión 2000 de la Asociación de Ingenieros Estructurales de California (Seacoc, por su sigla en inglés), se definieron los siguientes niveles de desempeño:

- **Operacional (O).** Se esperan daños mínimos, por lo que la edificación permanece apta para su uso normal, no hay deflexiones permanentes y la estructura mantiene su resistencia y rigidez iniciales.
- **Ocupación inmediata (IO).** Se pronostica poco daño tanto de los elementos estructurales como de los no estructurales, no hay deflexiones permanentes y se requerirán algunas reparaciones menores, pero las partes críticas de la edificación son habitables. La estructura mantiene la mayor parte de su resistencia y rigidez inicial.
- **Preservación de la Vida (LS).** Los daños de la estructura son importantes, pero se mantiene un margen contra el colapso estructural, ya sea parcial o total; pueden producirse lesiones, pero se espera que el riesgo total de amenaza para la vida como resultado de un daño estructural sea bajo. Aunque la estructura dañada no es un riesgo inminente de colapso, sería prudente instalar arriostramientos temporales antes de volver a ocupar el edificio, con el fin de implementar las reparaciones estructurales.
- **Prevención del colapso (CP).** Los daños son tan importantes que el edificio está al borde de un colapso parcial o total. Se ha producido un daño sustancial a la estructura, incluyendo la degradación significativa en la rigidez y la resistencia del sistema de resistencia de fuerza lateral, grandes deformaciones permanente laterales de la estructura, y (en un grado limitado) la degradación de la capacidad de transporte de carga vertical. Sin embargo, todos los componentes importantes del sistema de resistencia de carga vertical pueden seguir transportando las cargas. Existe riesgo significativo de lesiones debido a los peligros de la caída de escombros. Es posible

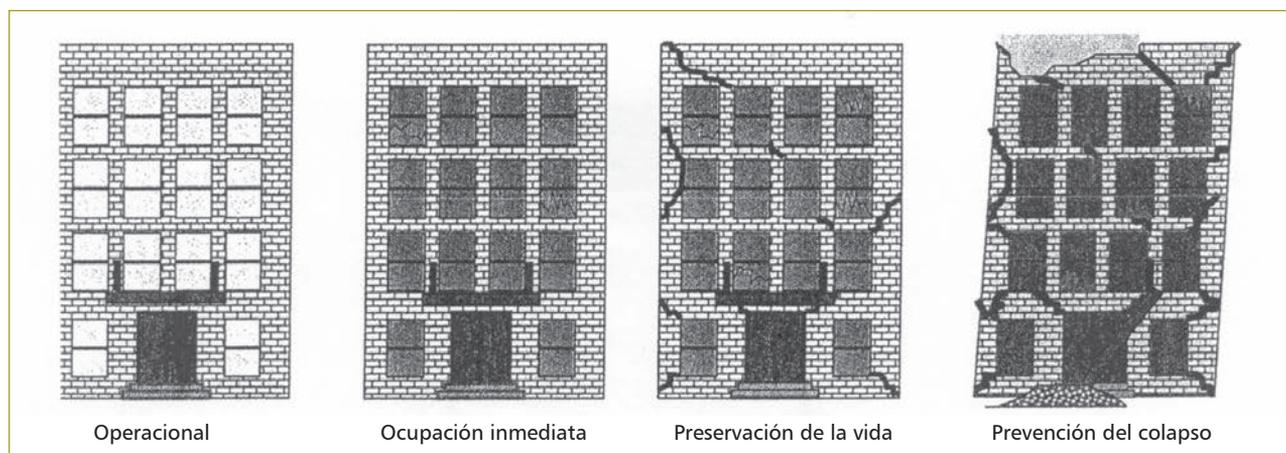


Figura 1. Niveles de desempeño de la edificación (Portland Public Schools -KPF Project No. 209193) (2009).

que no se pueda reparar la estructura y no es seguro volver a ocuparla (Portland Public Schools-KPFF Project N.º 209193) (2009).

En la figura anterior (figura 1) se ilustra el daño esperado de la edificación para los niveles de desempeño.

En el documento ASCE/SEI 31-03 se aplica la metodología para los niveles de desempeño, ocupación inmediata (IO) y preservación de la vida (LS).

El NSR-10 no hace referencia directamente a niveles de desempeño, pero los utiliza implícitamente mediante el coeficiente de importancia (I), que tiene como objeto amplificar la aceleración espectral (S_a) para contar con fuerzas sísmicas más grandes. El coeficiente I está en función del uso de la edificación, en cuanto que en el NSR-10 se definen cuatro grupos de uso: indispensables (IV), de atención a la comunidad (III), ocupación especial (II) y ocupación normal (I). La aplicación del coeficiente I pretende llevar a las edificaciones de uso indispensable al nivel de desempeño de ocupación inmediata, y las de ocupación normal al nivel de desempeño de preservación de la vida.

La ASCE 31-03 considera el máximo sismo para una probabilidad de excedencia de 2%/50 años (periodo de retorno de 2500 años). El NSR-10 considera un sismo máximo de 10%/50 años (periodo de retorno de 475 años). Sin embargo, la ASCE 31-03 hace una aclaración con respecto a este tema al indicar que el diseñador o el propietario de la edificación o la autoridad reguladora podrían considerar el uso del valor del 10%/50 años, porque la mayoría de los códigos de edificaciones nuevas utilizan dicho parámetro.

Adicionalmente, el NSR-10, en su cap. A.10.3, permite ajustar la probabilidad de excedencia del 20%/50 años para rehabilitación sísmica para el rango de desempeño de seguridad limitada y está en función de la aceleración pico efectiva reducida (A_e), caracterizada para cada región del país. Y para los movimientos sísmicos de umbral de daño el sismo considerado es de 20%/50 años (grupos de IV-III), para la determinación de la operatividad de la edificación en el rango elástico después de ocurrir el sismo de diseño.

Metodología de evaluación

La edificación se debe clasificar dentro de una de las quince tipologías que define la ASCE 31-03 para materiales de madera, acero estructural, concreto armado y mampostería, incluyendo elementos prefabricados:

El NSR-10 reconoce cuatro tipos de sistemas estructurales, y toda edificación o cualquier parte de ella debe quedar clasificada allí. La tipología de concreto prefabricado de la ASCE 31-03 es la única que no se incluye explícitamente en el NSR-10.

La evaluación se hace en tres fases de complejidad creciente:

- Fase 1. Evaluación simplificada
- Fase 2. Evaluación
- Fase 3. Evaluación detallada

Fase 1 (Evaluación simplificada)

Esta fase consiste en tres grupos de listas de verificación que permiten una evaluación rápida de los elementos es-

Tabla 1
Listas de verificación requeridas (ASCE 31-03)

Zona de amenaza sísmica	Nivel de Desempeño	Listas de verificación requeridas						
		Zona de amenaza baja	Estructural básica	Estructural complementaria	Cimentaciones y sitios de riesgo geológico	No estructural básica	No estructural intermedia	No estructural complementaria
Baja	LS	▶						
	IO		▶		▶	▶		
Moderada	LS		▶		▶	▶		
	IO		▶	▶	▶	▶	▶	
Alta	LS		▶	▶	▶	▶	▶	
	IO		▶	▶	▶	▶	▶	▶

estructurales y no estructurales de la edificación, así como de las condiciones del sitio. El propósito de esta fase es identificar rápidamente edificios que cumplen con los requisitos o, por el contrario, deficiencias potenciales de otros edificios. El nivel de análisis es mínimo, y muchos cálculos se pueden hacer en forma aproximada y rápida.

Una vez clasificada la edificación, la ASCE 31-03 indica que se deben completar unas listas de verificación de los componentes de la edificación (tabla 1). Además, hay una categoría llamada “zona de amenaza sísmica baja” que se emplea para las edificaciones que se encuentran en esas zonas.

Las listas de verificación familiarizan a los diseñadores con la edificación y sus posibles deficiencias y su comportamiento sísmico. Por ejemplo, la lista de verificación estructural contiene los siguientes puntos por evaluar:

- Sistema de construcción: verificación de la geometría, discontinuidades, irregularidades (torsión - piso débil - flexible).
- Sistema de resistencia de fuerza lateral: comprobaciones de esfuerzo cortante y axial.
- Conexiones: verificación de los detalles de las uniones o conexiones.

La lista de verificación de los elementos no estructurales incluye particiones, cielos rasos, accesorios de iluminación, acristalamientos, enchapes, parapetos, cornisas, chimeneas, escaleras, equipos eléctricos y mecánicos, tuberías, almacenamiento de materiales peligrosos, ascensores, equipamiento de la edificación (archivadores).

Para el análisis del sistema de resistencia lateral, utiliza el pseudocortante lateral que representa la fuerza que se requiere en un análisis estático lineal para imponer la deformación real esperada de la estructura en su estado de fluencia para el sismo de diseño. En función de este parámetro se comprueba la resistencia y rigidez de la edificación utilizando ecuaciones aproximadas, entre las que se destacan:

- Deriva de piso de pórticos a momento:

$$D_r = \left(\frac{k_b + k_c}{k_b k_c} \right) \left(\frac{b}{12E} \right) V_c \quad (1)$$

D_r = relación de deriva: desplazamiento entre pisos dividido por la altura del piso.

k_b = I/L para la viga representativa.

k_c = I/h para la columna representativa.

b = altura del piso (mm).

I = momento de inercia (mm⁴).

L = longitud de viga centro a centro a las columnas adyacentes (mm).

E = módulo de elasticidad (MPa).

V_c = cortante en la columna (N).

- Esfuerzo cortante en columnas de pórtico de concreto:

$$v_j^{avg} = \frac{1}{m} \left(\frac{n_c}{n_c - n_f} \right) \left(\frac{V_j}{A_c} \right) \quad (2)$$

n_c = número total de columnas.

n_f = número total de pórticos en dirección de la carga.

A_c = suma del área de la sección transversal de todas las columnas en el piso en consideración.

V_j = cortante de piso en el nivel j (N).

m = factor de modificación de elemento; se tomará igual a 2,0 para las edificaciones evaluadas para el nivel de desempeño de preservación de la vida e igual a 1,3 para ocupación inmediata.

- Esfuerzo cortante en muros:

$$v_j^{avg} = \frac{1}{m} \left(\frac{V_j}{A_w} \right) \quad (3)$$

V_j = cortante de piso en el nivel j (N).

A_w = suma del área de sección transversal horizontal de todos los muros a cortante en dirección de la carga. Se tendrán en cuenta las aberturas al computar A_w . Para muros de mampostería, se usará el área neta. Para los muros de pórticos de madera, se utilizará la longitud en lugar del área.

m = se obtendrá de la tabla 2.

Tabla 2
Factores m para muros a cortante

Tipo de muro	Nivel de desempeño	
	LS	IO
Concreto reforzado, concreto prefabricado, madera y mampostería reforzada	4,0	2,0
Mampostería no reforzada	1,5	N/A

- Arriostamiento diagonal:

$$v_j^{avg} = \frac{1}{m} \left(\frac{V_j}{sN_b r} \right) \left(\frac{L_{br}}{A_{br}} \right) \quad (4)$$

L_{br} = longitud promedio entre arriostamientos (mm).
 N_{br} = número de arriostamientos en tensión y compresión si los arriostamientos están diseñados para compresión; número de diagonales en tensión si los arriostamientos están diseñados sólo para tensión.

s = longitud promedio de vano arriostrado (mm)

A_{br} = área promedio del arriostamiento diagonal (mm²).

V_j = máximo cortante de piso en cada nivel (N).

m = se tomará de la tabla 3.

Tabla 3
Factores m para arriostamientos diagonales

Tipo de arriostamiento	d/t^1	Nivel de desempeño	
		LS	IO
2 Tubo	$< 621/(F_{ye})^{1/2}$	6,0	2,5
	$> 1310/(F_{ye})^{1/2}$	3,0	1,5
2 Tubería	$< 10342/F_{ye}$	6,0	2,5
	$> 41370/F_{ye}$	3,0	1,5
Sólo tensión		3,0	1,5
Todos los demás		6,0	2,5

Relación profundidad - espesor.

La interpolación se usará para tubos y tuberías.

F_{ye} = 1,25 F_y ; esfuerzo de fluencia esperado.

- Conexiones de prefabricados:

$$M_{gj} = \frac{V_j}{m} \left(\frac{1}{n_c - n_f} \right) \left(\frac{b}{2} \right) \quad (5)$$

n_c = número total de columnas.

n_f = número total de pórticos en dirección de la carga.

V_j = cortante de piso en el nivel inmediatamente debajo de la conexión en consideración.

b = altura típica de columnas del piso.

m = se tomará igual a 2,0 para el nivel de desempeño de preservación de la vida e igual a 1,3 para ocupación inmediata.

- Esfuerzo axial debido al volcamiento:

$$P_{at} = \frac{1}{m} \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{V_{b_n}}{L n_f} \right) \left(\frac{1}{A_{col}} \right) \quad (6)$$

n_f = número total de pórticos en dirección de la carga.

V = seudofuerza lateral.

b_n = altura (mm) por encima de la base hasta el nivel del techo.

L = longitud total del pórtico (mm).

m = se tomará igual a 2,0 para preservación de la vida e igual a 1,3 para ocupación inmediata.

A_{col} = área del extremo de la columna del pórtico.

El NSR-10 no contiene listas de verificación para los componentes de las edificación ni ecuaciones aproximadas que permitan evaluar preliminarmente la resistencia y rigidez de la edificación, pero menciona en el cap. A.10.2 que se deben hacer investigaciones o exploraciones a la estructura de los siguientes aspectos:

documentos descriptivos del diseño de la estructura y cimentación; calidad de la construcción; estado de conservación; evidencia de deflexiones, corrosión de armaduras y fallas locales; asentamientos de la cimentación y su efectos en la estructura, y las modificaciones que pudieron haber afectado la integridad de la estructura, como explosiones, incendios, sismos, remodelaciones, aumentos de cargas y otras modificaciones.

Fase 2 (Evaluación)

Se presentan dos opciones para realizar la evaluación en esta fase: sólo para los elementos que presentaron deficiencias en la fase 1 o para toda la edificación. Los métodos de análisis sísmico que se pueden emplear son el estático lineal, dinámico lineal, método especial para muros portantes de mampostería no reforzada con diafragmas flexibles y método para elementos no estructurales (para este último, indica pruebas de resistencia para los materiales).

Los métodos lineales representan una idea aproximada del comportamiento no lineal de la estructura, pero ignoran la redistribución de esfuerzos en el campo plástico y otros efectos no lineales. Los métodos dinámicos se basan en el uso de valores reales de aceleración espectral, resultante de los propios espectros de respuesta, y no se reduce por el coeficiente de disipación de energía.

Los criterios de aceptación se fundamentan en confrontar las acciones de cada elemento, que pueden ser de dos tipos: controladas por deformación (elementos dúctiles) o por fuerza (elementos frágiles).

- Para las acciones controladas por deformación (ejemplo, flexión en vigas):

$$Q_{CE} \geq Q_{UD}/m \quad (7)$$

Q_{CE} = resistencia esperada.

Q_{UD} = acciones de cargas gravitacionales y cargas sísmicas.

$$Q_{CE} = 1,25 R_n$$

- Para las acciones controladas por fuerza (ejemplo, cortante en vigas):

$$Q_{CN} \geq Q_{UF} \quad (8)$$

Q_{CN} = resistencia nominal.

Q_{UF} = acciones de cargas gravitacionales y cargas sísmicas.

Para limitar la capacidad de ductilidad de los elementos controlados por deformación se emplean unos factores de modificación m , porque con el cálculo del pseudocortante basal, la estructura experimenta esfuerzos mayores de los que realmente desarrollaría; por lo tanto, los factores m reducen la capacidad para la respuesta no lineal. Se establecen para cada tipo de elemento a lo largo de la estructura y material, al contrario que el factor de disipación de energía R de los códigos de construcciones nuevas, lo cual es conveniente en evaluación y reforzamiento porque la ductilidad no es uniforme, sino que varía entre los diversos elementos o incluso en distintos puntos de un elemento o para diferentes acciones en una sección dada de un elemento.

El NSR-10 utiliza el factor R' (coeficiente de disipación de energía) de acuerdo con el sistema estructural y la información disponible. Este factor R' se basa en una filosofía de diseño ampliamente aceptada, que considera la respuesta no lineal de la estructura cuando ésta se somete a un sismo de diseño; los desplazamientos de la edificación calculados mediante las fuerzas sísmicas reducidas por el factor R' son inferiores a las que el edificio experimentaría durante el sismo de diseño (ASCE 31-03) (2003).

El factor R' se aplica a todo el sistema estructural sin distinguir el comportamiento frágil de algunos elementos, pretendiendo establecer que la edificación tendrá una ductilidad uniforme. El R' parte de la premisa de que las deformaciones en el rango elástico son las mismas en el rango inelástico bajo el mismo nivel de carga (principio de deformaciones iguales) para periodos largos; para periodos cortos, utiliza el principio de igualdad de energía. A mayor R' , la estructura alcanza prematuramente la fluencia y genera mayor ductilidad, lo que indica que sí hay disipación de energía pero con daños residuales (Ruiz, 2012). Es decir, que la estructura debe degradarse más rápido si quiere disipar energía.

Los criterios de aceptación de la NSR-10 están basados en hacer una comparación entre la demanda y la capacidad de los elementos estructurales, por medio de la definición de los índices de sobreesfuerzo y de flexibilidad.

El análisis de la vulnerabilidad consiste en expresar la vulnerabilidad como fracción de la rigidez (1/índice de flexibilidad) y de la resistencia (1/índice de sobreesfuerzo). Estos parámetros indican el porcentaje de rigidez y de resistencia respectivas que tendría la edificación

que se está evaluando en relación con una construcción nueva y para el sismo de diseño. Los criterios de aceptación son favorables cuando estos cocientes son mayores que 1.

Fase 3 (Evaluación detallada)

Es posible evaluar únicamente los elementos que presentaron deficiencias en las evaluaciones de fase 1 o 2, o en su defecto toda la edificación. El diseñador tendrá el juicio de realizar una evaluación más detallada cuando encuentre que las evaluaciones de la fase 1 o 2 son conservadoras (debido a los factores simplificadores que usan) y habría una ventaja económica de uno o de otro tipo con respecto a una evaluación más detallada.

Se debe tener un cuidado especial en la aplicación de los procedimientos disponibles para efectuar una evaluación detallada porque se utilizan disposiciones que no están hechas para la evaluación sísmica, como las del ASCE 41-06 o del ATC-40, que son normas para el diseño de la rehabilitación sísmica. Además, se pueden emplear métodos de análisis sísmico no lineal.

La ASCE 31-03 indica que los niveles de fuerza se reducen por un factor de 0,75 por las siguientes razones: a) la resistencia real de los elementos será mayor que la utilizada en la evaluación; b) en un edificio existente no es necesario tener el mismo nivel de factor de seguridad como en un edificio nuevo porque la vida útil puede ser inferior.

El NSR-10 señala, en su apéndice A.3, que se puede utilizar el método estático no lineal (*push-over*) y establece su procedimiento. Dicho apéndice no es de carácter obligatorio y se ha incluido con el fin de que se estudie preliminarmente, para adoptarlo en ediciones futuras del reglamento si se considera conveniente.

Por último, debido a que en Colombia la disponibilidad de información existente para realizar evaluación sísmica y su posterior procedimiento de rehabilitación no proporciona una orientación prescriptiva para la evaluación de las construcciones existentes, se hace necesario promover una propuesta basada en el documento ASCE/SEI 31-03, con miras a enriquecer los elementos que contiene el reglamento NSR-10, que le permitan al ingeniero estructural contar con una mayor variedad de herramientas (criterios - procedimientos) de orientación acerca de los detalles, deficiencias y comportamientos usuales de los tipos de edificaciones comunes observa-

dos ante sismos pasados para los niveles de desempeño de preservación de la vida y ocupación inmediata.

Adoptar la metodología de la evaluación sísmica de construcciones existentes contribuye al avance del país en la promoción de soluciones para la rehabilitación estructural en todos los niveles de amenaza sísmica. No debemos olvidar que el primer reglamento sismorresistente se puso en vigencia en Colombia en 1984, por lo que muchas de las construcciones anteriores a ese año, no cumplen con requisitos de sismorresistencia.

CONCLUSIONES

Según la norma ASCE/SEI 31-03, la metodología de evaluación sísmica es adecuada para su uso en los edificios de Colombia porque proporcionan un procedimiento ordenado, pedagógico y exhaustivo. La evaluación sísmica contiene varios niveles de evaluación con diferentes grados de complejidad, aplicados para una variedad de tipos de estructuras y de materiales. El análisis sísmico tiene en cuenta la ductilidad diferenciada en toda la edificación para cada elemento y en función del material del tipo de acción.

De igual manera, la metodología ASCE/SEI 31-03 tiene en cuenta procedimientos para elementos no estructurales, cimentaciones y riesgos geológicos. Sin embargo, requiere un mayor grado de comprensión por parte de los profesionales del diseño y a veces puede ser confusa por la falta de datos específicos.

Cabe destacar la importancia que le da a la evaluación de elementos no estructurales (ecuaciones para criterios de aceptación), que son los más vulnerables bajo un sismo, y en el país no se les presta la atención necesaria.

Los criterios de aceptación de la metodología ASCE/SEI 31-03 permiten estudiar de una manera más precisa el comportamiento de la edificación en el rango inelástico. Da herramientas para la toma de decisiones de un óptimo sistema de rehabilitación sísmica, traducidas en ahorro (costos en la reconstrucción). Además, es compatible con el ASCE/SEI 41-06, "Seismic Rehabilitation of Existing Buildings".

El procedimiento de la NSR-10 para la evaluación y rehabilitación sísmica utiliza principios elementales en metodología aplicable al diseño de nuevos edificios, como el uso del factor de disipación de energía asumido uniforme para toda la edificación. La aplicación de la metodología NSR-10 carece de medidas específicas de

evaluación y rehabilitación, por lo que el procedimiento queda a juicio del diseñador. En este procedimiento sólo se considera un nivel de excitación (BSE-1 (10 %/50 años), por lo que se deben definir espectros de diseño que tengan la siguiente probabilidad de excedencia: 50 %/50 años, 20 %/50 años y el 2 %/50 años.

La futura actualización de la NSR deberá incluir un apéndice que contenga una adaptación de las metodologías ASCE/SEI 31-03 y 41-06, para que los diseñadores del país las estudien preliminarmente, con el fin de adoptarlas en ediciones futuras del reglamento si se considera conveniente.

Esta metodología contribuye a la ingeniería del país para que se mejoren las prácticas constructivas y los estudios de evaluación sísmica (vulnerabilidad).

REFERENCIAS

- American Society of Civil Engineers (ASCE) (2004). Seismic Evaluation of Existing Buildings. Reston, Va: ASCE/SEI 31-03.
- American Society of Civil Engineers (ASCE) (2007). Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. Reston, Va: ASCE/SEI 41-06.
- Bertero, V.V. (2000). Seismic engineering: conventional vs. innovative approach. 12WCEE. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California.
- López, P. (2014). Traducción del documento ASCE/SEI31-03, "Evaluación sísmica de edificaciones existentes" y comparación metodológica con el NSR-10. Trabajo de grado de maestría. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Olejua, F. (2012). Propuesta de traducción y adaptación a Colombia de la norma ASCE/SEI 41-06, "Seismic Rehabilitation of Existing Buildings". Trabajo de grado de maestría. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Portland Public Schools (PPS) (2009). Seismic Study of Existing School Facilities. KPFF Project N.º 209193.
- Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente, NSR-10 (2010). Ley 400 de 1997 (modificada Ley 1229 de 2008). Decreto 926 del 19 de marzo de 2010. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- Ruiz, D.M. (2012). Edificios de concreto reforzado siguiendo la NSR-10 vs. sismo de Quetame registrado en Bogotá, D.C. *Ingeniería y Ciencia - ing.cienc.*, [S.l.], vol. 8, N.º 16, pp. 129-189, nov. 2012.

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