

JORNADAS DE INVESTIGACIÓN Y ACTUALIZACIÓN EN INGENIERÍA CIVIL

Volumen 1 • No 1 • Julio 2015 • ISSN 2462-8247



Programa de Ingeniería Civil



UNIAGRARIA
Fundación Universitaria Agraria de Colombia

LA U VERDE
DE COLOMBIA

JORNADAS DE
INVESTIGACIÓN Y
ACTUALIZACIÓN
EN INGENIERÍA CIVIL



UNIAGRARIA
Fundación Universitaria Agraria de Colombia

LA U VERDE DE COLOMBIA

JORNADAS DE INVESTIGACIÓN Y ACTUALIZACIÓN EN INGENIERÍA CIVIL

© Fundación Universitaria Agraria de Colombia - UNIAGRARIA

ASAMBLEA GENERAL

Teresa Escobar de Torres

Presidenta

CONSEJO SUPERIOR

Álvaro Zúñiga García

Presidente

Teresa Arévalo Ramírez

Teresa Escobar de Torres

Jorge Orlando Gaitán Arciniegas

Héctor Jairo Guarín Avellaneda

Emiro Martínez Jiménez

Álvaro Ramírez Rubiano

Rector

Jorge Orlando Gaitán Arciniegas

Director Unidad de Investigaciones

Alvaro Mauricio Zuñiga Morales

Decano Facultad de Ingenierías

Mary Luz Olivares Tenorio

Director del Programa de Ingeniería Civil

Carlos Javier Obando Gamboa

Director de Investigación - Programa de Ingeniería civil

Edgar Ricardo Monroy Vargas

Dirección Editorial

Sandra Edith Nossa M.

Corrección de textos

Alejandra Muñoz

Concepto Gráfico

Diseño, Composición e Impresión

Entrelibros e-book solutions

www.entrelibros.co

Diseño gráfico

Diana Murcia

Diseño de portada

Gladys Carolina Chavez Caballero

ISSN: 2462-8247

Jornadas de Investigación y Actualización en Ingeniería Civil by Universidad Agraria de Colombia -UNIAGRARIA is licensed under a Creative Commons Reconocimiento-NoComercialCompartirIgual 3.0 Unported License.

La publicación 'Jornadas de Investigación y Actualización en Ingeniería Civil' es producto del área de investigación jurídica de la Universidad Agraria de Colombia -UNIAGRARIA- impreso bajo el ISSN: 2462-8247, en idioma Español. Es un producto editorial protegido por el Copyright © y cuenta con una política de acceso abierto para su consulta, sus condiciones de uso y distribución están definidas por el licenciamiento Creative Commons (CC).



JORNADAS DE INVESTIGACIÓN Y ACTUALIZACIÓN EN INGENIERÍA CIVIL

- 7 **Caracterización físico-mecánica de la palma y fibras de pupunha. Palma de chontaduro**
NELSON VARGAS ORTIZ · Programa de Ingeniería Civil, Fundación Universitaria Agraria de Colombia.
- 11 **Caucho, un potencializador de las mezclas asfálticas**
JUAN DIEGO BARRAGÁN, DAVID MEDINA, ANDRÉS GUTIÉRREZ.
- 17 **Reforzamiento estructural externo de casas de uno y dos pisos por medio de fibras vegetales y maderables**
OSCAR RUIZ SUÁREZ · Fundación Universitaria Agraria de Colombia.
- 23 **Investigación experimental del comportamiento de vigas altas reforzadas con tiras de bambú**
R. AMADO , K. GHAVAMI · PUC-Río, Brasil
- 31 **Estudio de procesos de tratamiento en macizos rocosos mediante inyecciones de lechada hidráulica en la atagüía-Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso**
OLGA PACHECO A., MAURICIO SÁENZ C., ANDRÉS GUTIÉRREZ B. · Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil.
- 35 **Modelo hidrogeológico conceptual de acuíferos**
ING. ESP. PH. D. EDGAR RICARDO MONROY VARGAS · Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil.
- 41 **Aplicaciones de la inteligencia artificial para el cálculo de los indicadores de calidad del agua**
JUNIEL ALMEIDA, JULIO FERRER, MARIO CASTRO, DAISSY DÍAZ · Universidad Cooperativa de Colombia
- 45 **Revisión del estado del arte de los efectos ambientales de la estimulación hidráulica (*fracking*)**
SHAREL CHARRY-OCAMPO
- 53 **Cambio climático y sostenibilidad**
FRANCISCO A. ORJUELA C. · Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Facultad de Ingenierías, Programa de Ingeniería Civil.
- 57 **Efectos de los impactos de asteroides en la Tierra**
MARCELA BERNAL PALACIO

Caracterización físico-mecánica de la palma y fibras de pupunha. Palma de chontaduro

Nelson Vargas Ortiz

Programa de Ingeniería Civil

Fundación Universitaria Agraria de Colombia

Resumen

Con el objetivo de adaptarse a una existencia menos impactante para el medio ambiente en medio de la sociedad de consumo, la búsqueda de materiales procedentes de fuentes renovables y la capacidad de biodegradación están creciendo. Sin embargo, para que este cambio sea efectivo es necesario cambiar no solo los materiales que se producen, sino también la logística y los procesos de producción utilizados, teniendo en cuenta que lo que se está buscando es una buena opción como el uso de la palma de pupunha.

Introducción

La pupunha (*Bactris gasipaes*) es una palma nativa de la región amazónica, conocida en Colombia como *palma de chontaduro*, de la cual se extrae palma de excelente calidad. Los agronegocios basados en su explotación son muy recientes, pero la cultura de la pupunha es antigua en la región y su domesticación tiene orígenes antiguos, cuando los nativos comenzaron las actividades agrícolas.

La enorme demanda de la producción de palma comestible existente en Brasil, hoy en día, no se cumple plenamente. Se estima que esta demanda está en el orden de cien mil toneladas por año, de los cuales solo la mitad se produce actualmente. La extracción depredadora de palma de açai, juçara y otras palmas nativas, ha llevado a prohibir la destrucción de las especies y a fomentar el cultivo de otras alternativas. Entre estas, una de las más atractivas ha sido la pupunha que, a diferencia de otras especies que tardan años en desarrollar y producir una sola pieza, la palma pupunha crece en dos años y medio.

Para fomentar este mercado los agricultores dedican grandes áreas de la cultura de plantación de pupunhas adultas, con miras a la producción de frutos y semillas. Estas palmas comienzan su producción hacia los 8 años de edad. Debido a las grandes alturas que dificultan la cosecha y la considerable disminución de la productividad para llegar a entre 12 y 15 años, los productores se ven obligados a manejar el grupo para dar paso al tronco en fructificación. Este proceso genera como subproducto un alto volumen de madera del tallo, con características similares a la madera de las especies arbóreas.

Este material se utiliza desde hace muchos años en forma de artesanía y manufactura indígena de artículos, tales como el arco y la flecha, que en la cultura popular dan fe de sus excelentes propiedades mecánicas y su resistencia a la intemperie. Sin embargo, aún no existe un estudio científico dirigido a la obtención y normalización de estas propiedades.

Objetivos

- Estudiar las propiedades físico-mecánicas de las fibras del tronco de la palma de pupunha.
- Hacer una caracterización para identificar y clasificar las propiedades del material.
- Determinar si la palma de pupunha puede aprovecharse como material alternativo en la construcción de estructuras no convencionales.

Marco teórico

La palmera pupunheira, originaria de las selvas tropicales de América Central y del Sur y que tiene como nombre botánico el temible sonido de *Bactris gasipaes*, es una de estas plantas portadoras de alimentos doble-golpe que ofrecen más de un producto alimenticio en la planta. Es un árbol bastante grande con un fruto agradable, originario de la Amazonía sudamericana, conocido en el Perú como pijuayo, tembe.

Tiene un alto contenido de calcio y fósforo, por lo que es bueno tanto para los huesos como para la actividad cerebral. Está considerada como una de las superfrutas de la Amazonía. En Bolivia se conoce como pupunha; en Brasil como pirijao; chontaduro o cachipay en Colombia; chontaduro en Ecuador; gachipaes en Venezuela y *peach palm* en inglés. Este fruto pertenece a la familia de las Ericáceas.

Esta planta es una palmera con varios tallos o estípites, que llegan a crecer hasta 25 m de altura; sus tallos son cilíndricos, con diámetros de 15 a 30 cm y entrenudos de 20 a 30 cm,

dotados de espinas negras descontando mutaciones sin espinas. Sus hojas son compuestas y están agrupadas en el terminal del tallo; los folíolos llegan a medir hasta 60 por 30 cm.

Es una planta de clima fluvial cálido y una especie de heliofilia que se desarrolla muy bien en terrenos no inundables y con buen drenaje; de preferencia en suelos fértiles, ricos en materia orgánica y de textura variada desde moderadamente arenosos a muy arcillosos. Sus flores son unisexuales, femeninas o masculinas, sésiles y de color blanco amarillento.

Para la agroindustria de palma, la pupunha se destaca como una gran alternativa, dada su buena adaptación a suelos pobres, excelente respuesta a la gestión, la precocidad, el macollaje y la excelente calidad de la palma. Incluso en suelos pobres, que son comunes en la Amazonía, se puede cortar para extraer su palma alrededor de dos años. Cuando la palma de durazno se fertiliza, este plazo podrá reducirse a un año. Cada palma pesa entre 100 y 250 g y el sabor es más dulce que las otras palmeras que se venden en las ferias naturales porque no se oscurece después del corte.

Fruto pijuayo

Los frutos son drupas de coloración diversa, verduscos, amarillos, anaranjados, rojos y de colores intermedios; sus formas son diversas así como su tamaño; el peso es variable y su fruto se clasifica en:

- Microcarpa de 4 a 20 g.
- Mesocarpa de 20 a 70 cm.
- Macrocarpa de 70 a 250 g.

La parte madura del fruto (mesocarpo) es comestible. El fruto se somete a cocción en agua con sal unos 30 a 60 minutos, tiempo que favorece su sabor, elimina sustancias irritantes y desactiva enzimas antialimentarias. El fruto cocinado y se consume en forma variada. El ápice estípite sostiene una corona de 15 a 25 hojas tipo de pinadas, puesta en diferentes ángulos. La oferta no deja ampliado, que se encuentra en el centro de la corona, forman el corazón de palma, un producto económico importante.

La inflorescencia aparece en las axilas de las hojas senescentes. Después de la polinización, los grupos pueden contener entre 50 y 1.000 frutas. Varios factores, como la nutrición o la mala polinización, la sequía, la competencia y el ataque de insectos y enfermedades pueden causar aborto y contribuir un promedio bajo en el peso del grupo.

La planta se adapta a una amplia gama de condiciones ecológicas en las zonas tropicales. Originaria de las áreas tropicales con alta precipitación y suelos pobres, crece mejor cuando la lluvia es abundante y se puede cultivar desde el nivel del mar hasta los 800 m de altitud.

Florece casi todo el año, pero con mayor intensidad durante agosto y diciembre. La maduración de sus frutos se produce principalmente en los meses de diciembre a julio. Actualmente, su importancia como alimento y su potencial tecnológico han sido alentados por estudios realizados en Brasil, Colombia, Perú y Costa Rica.

La palma de pupunha se puede utilizar plenamente en jardinería; sus raíces como vermicida; su tronco como madera para la construcción de casas, fortificaciones, arcos, flechas, lanzas y cañas de pescar; sus flores masculinas, se pueden usar como condimento cuando se caen; sus hojas como cubiertas para viviendas, para tejer cestas y otros objetos; sus frutos, que son la razón principal de cultivo entre los indios, se consumen cocidos. Además del consumo directo de las frutas, después de la cocción en agua salada, pueden generar una serie de subproductos industriales.

Después de cocinar los frutos se puede obtener una harina seca, similar a la harina de yuca, maíz y trigo. Este producto puede ser consumido junto con otros alimentos en

la preparación de tortas y pizzas. También se puede utilizar en el pan, en pasteles y otros alimentos a base de harina. La masa procedente de la fruta también produce un helado muy sabroso. Además, la apariencia de la fruta inferior puede ser utilizada en la fabricación de piensos para animales. Los tallos secundarios son de alto valor también y se pueden comer como palma. Actualmente la palma se extrae principalmente de açai, que se produce en la región norte, y otros árboles de palma nativa de la Mata Atlántica. Esta última, antes abundante, se ha diezmado por la explotación depredadora. Por lo tanto, la palma se produce ahora en grandes concentraciones naturales de açazeiros el estuario del Amazonas.

Al mismo tiempo que tiene una desaceleración en los últimos años, el proceso de explotación de açai nativa ha utilizado los mismos métodos que llevaron a la destrucción cerca de las palmeras de la Mata Atlántica. En este contexto, se plantea como una alternativa complementaria a los años de explotación el cultivo de pejibaye, dirigido a la producción de palma. Hay muchas plantaciones en la región amazónica de pupunha sin espinas, que ofrecen condiciones de corte en el segundo año de vida, con mayor diámetro que el açai, con excelente calidad de palma.

Costa Rica es el país latinoamericano más temprano en el desarrollo de la producción agroforestal y agroindustrial a base de la palma de pupunha. En la actualidad, existe un gran interés en el cultivo de pejibaye en estados como São Paulo, Río de Janeiro, Espírito Santo, Bahia, Mato Grosso y Goiás, con muchos proyectos implementados y en proceso.

La palma pupunha está lista para la cosecha entre 2 y 10 años por su multitallo característica importante de los brotes, lo que permite cosechas escalonadas. En la planta de más de 10 años se reduce la producción de frutas y es de difícil cosecha. Actualmente, la madera se ha utilizado en la industria del mueble, ya que tiene alta resistencia, tres veces más que la caoba, más su costo que llega al 40% menos que otras maderas.

Experimentación

Las fibras se obtuvieron utilizando una trituradora eléctrica. Las fibras obtenidas variaron de pocos milímetros a unos 10 a 20 mm de largo. Estas fibras se pueden utilizar fácilmente para producir tableros de aglomerado (Temer, 2010). Las fibras largas se obtuvieron utilizando un molino de melaza manual. Este dispositivo simple elimina de manera muy eficiente la savia de los residuos y produce fibras siempre y cuando el residuo dé procesado. Fibras tan largas como de 70 cm fueron obtenidas en este trabajo.

Las fibras obtenidas de ambas condiciones de tratamiento fueron probadas. Se realizaron los ensayos de tracción siguiendo los procedimientos recomendados por la norma ASTM D-3379 usando un equipo de prueba de accionamiento mecánico equipado con mordazas de acción neumática. La velocidad de la prueba utilizada fue 1,25 mm por minuto; asimismo, 40 ejemplares con una longitud de calibre de 12,5 mm fueron probados por condición de procesamiento de fibra (picadas o fibras largas).

Una sección transversal promedio de las fibras probada se infiere asumiendo que estas tienen una sección transversal circular y midiendo su diámetro nominal dentro de $\pm 0,001$ mm con un calibrador de precisión. Con el fin de ver la manera como el crudo se aproximó, la sección transversal real de las fibras se analizó por microscopía óptica. Las muestras para este análisis se obtuvieron usando el procedimiento común de fibras de montaje en una base de epoxi, seguido por la molienda usual y el pulido. Se usó un microscopio óptico motorizado, equipado con una cámara digital para capturar y observar las imágenes.

La superficie de la picada y de las fibras largas se caracterizó por microscopía electrónica de barrido. Se utilizó el modo de electrones de imagen secundaria, con una tensión de aceleración del haz de 10-15 kV.

Equipos

Básicamente, los equipos utilizados para el estudio de la palma de pupunha fueron:

- Microscopio óptico (MO).
- Cámara digital acoplada (Zeiss AxioCam HR (1.300 x 1.030 pixeles).
- Platina motorizada x-y-z.
- Control microscópico.
- Herramientas menores.

Conclusiones y recomendaciones

Los resultados experimentales obtenidos muestran que las fibras se pueden obtener convenientemente usando equipos de bajo coste. Las fibras cortas se obtienen más fácilmente

utilizando una trituradora eléctrica, mientras que las fibras largas se pueden obtener usando un molino de melaza. El análisis mostró, sin embargo, que el uso de la trituradora eléctrica para extraer las fibras puede dañar la pared de las fibras en un grado más alto que el molino de melaza.

El uso de la distribución estadística de Weibull para analizar los resultados de la resistencia a la tracción de las fibras extraídas, utilizando el molino de la melaza o la trituradora eléctrica fue capaz de describir cuantitativamente el grado de daño introducido por la ruta de extracción utilizado y dio apoyo para el análisis.

En lo que respecta a las propiedades de tracción, las fibras de Pupunha tienen bajas resistencias a la tracción cuando se comparan con fibras lignocelulósicas tradicionales, tales como yute o sisal. Sin embargo, tienen resistencias a la tracción comparables a los valores mostrados por otras fibras que se extraen de las palmas, como fibra de coco y piassava. Por el contrario, el módulo de tracción de las fibras de peijibaye es bastante alta y similar a los módulos de ambos yute y sisal.

A partir de estos resultados experimentales se puede decir que las fibras de pupunha tienen un gran potencial para ser utilizadas con el fin de reforzar materiales compuestos de matriz polimérica y también para producir paneles aglomerados con buenas propiedades mecánicas. Por último, hay que destacar que estas fibras se obtienen de los residuos sobrantes del corazón de las plantaciones de palma y que durante el ciclo de cultivo de las palmas, fijan el carbono en el proceso de eliminación de dióxido de carbono de la atmósfera. Por lo tanto, el uso del residuo de las fibras puede agregar valor a toda la agroindustria de esta palma.

Referencias

- horabuena.blogspot.com/2011/08/el-pijuayo-pupunha-tembe-fruto-pijuayo.html
- jardimdeflores.com.br/pupunha.htm
- Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia- DCMMEstudo das Propriedades físico mecânicas do material lenhoso da palmeira Pupunha (Bactris gasipaes)
- Ramiah, M. V., J. Appl. Polym. Sci., 14 (1970) 1323. Órfão, J. J. M., Antunes, F. J. A., Figueiredo, J. L., Fuel, 78 (1999) 349.

Caucho, un potencializador de las mezclas asfálticas

Juan Diego Barragán, David Medina, Andrés Gutiérrez

Resumen

El crecimiento notorio del tránsito automotor en Colombia ha aumentado el nivel de exigencia con respecto a factores tales como durabilidad y resistencia a deformaciones por cambios de clima y de tránsito, ya que en el momento de realizar los diseños de las vías existentes no se tuvieron en cuenta volúmenes de tránsito como los que tenemos hoy en día y, por consiguiente, no se tenía previsto su gran deterioro.

Introducción

Colombia ha implementado el uso de grano de caucho reciclado (GCR) como un recurso para optimizar el desempeño de las mezclas asfálticas, pues con este se busca aumentar parámetros como durabilidad, rigidez, viscosidad, elasticidad, entre otros, aprovechando así la oportunidad de reducir el impacto ambiental que producen casi todas las obras civiles por medio de la reutilización de las llantas usadas. Basándose en el transcurso de los años y en la manera como, a lo largo del tiempo, por condiciones adversas tales como zonas de frenado, paradas de autobuses, altos volúmenes de tránsito canalizado, tránsito pesado, etc., se reduce notablemente la vida útil de la rodadura existente, el presente estudio busca sintetizar las ventajas mecánicas del uso de GCR como agente modificador de mezclas asfálticas, con la implementación del aparato Marshall. El estudio logra así un análisis comparativo en cuanto al aumento de la estabilidad Marshall, el flujo, peso unitario, porcentaje de vacíos de la mezcla y de los agregados minerales (VAM), con respecto a una mezcla convencional.

Asfalto

El asfalto es un material viscoso y de color negro derivado del petróleo crudo, el cual se usa mezclado con arena y grava para la fabricación del pavimento. Esta mezcla asfáltica es usada para la construcción de vías, autopistas y carreteras. Es el componente natural de la mayor parte de los petróleos, en los que existe en disolución y que se obtiene como residuo de la destilación al vacío del crudo pesado (Alberto y Duarte, 2005).

Propiedades físicas

Es un material resistente, aglomerante, altamente impermeable y adhesivo, el cual logra resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo acción de calor o cargas permanentes. Es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se le combina (Alberto y Duarte, 2005).

Composición química

Al igual que el petróleo en crudo, el asfalto es una mezcla que presenta aromáticos, compuestos heterocíclicos e hidrocarburos parafínicos. La mayoría de los hidrocarburos livianos se pierden durante el proceso de refinación, quedando los más pesados y de moléculas complejas. Los hidrocarburos que constituyen el asfalto hacen parte de una transición existente entre un grupo de moléculas de hidrocarburos pesados (asfaltenos) que están en un medio aceitoso más ligero (maltenos) que se compone por aromáticos, hidrocarburos y saturados resinas (Alberto y Duarte, 2005).

Clasificación de asfaltos

Los asfaltos se pueden clasificar de diversas formas como riegos, tratamientos y lechadas, sin embargo, para el objeto de estudio presentado aquí, solo será de interés la pavimentación (Alberto y Duarte, 2005).

Clasificación del asfalto para pavimentación

Este tipo de asfalto podría subdividirse de la siguiente forma:

- Cemento asfáltico.
- Asfaltos líquidos.
- Emulsiones asfálticas.

Modificación de mezclas asfálticas

La modificación de mezclas asfálticas tiene como objeto mejorar las características iniciales de una mezcla base, las cuales pueden ser la reducción del fisuramiento, deformaciones permanentes y demás patologías que sufren las capas de rodadura, causadas principalmente por fatiga o por cambios fuertes de temperatura (Gonzales, 2012).

Para la modificación de mezclas asfálticas, los productos más comúnmente utilizados son los polímeros, ya sean de origen natural, artificial y sintético (López y Veloz, 2013).

Polímeros naturales

Como su nombre lo indica provienen directamente del reino animal o vegetal, pueden ser la celulosa, el caucho natural, entre otros (López y Veloz, 2013).

Polímeros artificiales

Se generan por medio de modificaciones químicas de polímeros naturales, como nitrocelulosa, etonita, etc. (López y Veloz, 2013).

Polímeros sintéticos

Son aquellos que a partir de materias primas de bajo peso molecular se producen por procesos de polimerización como el polietileno, polimetano, nailon, entre otros.

Existen dos métodos de modificaciones de las mezclas asfálticas:

Por vía húmeda.

Este método se basa en modificar el ligante asfáltico mezclándolo a altas temperaturas, generando un cambio en sus propiedades químicas.

Los polímeros más utilizados en la modificación de asfaltos son los de tipo elastómero, como el látex, el hule natural y el SBS. La adición de estos al asfalto da un aumento en su punto de ablandamiento y a su intervalo de plasticidad. Tiene menor penetración a mayores temperaturas, además de otros beneficios (López y Veloz, 2013).

Por vía seca.

Este método consiste en realizar un cambio físico en la mezcla asfáltica, pues el polímero se usa como un agregado más, haciendo parte de esta.

Para este método el polímero más utilizado es el GCR, incorporado a la mezcla, dándole un aumento de la estabilidad, el flujo, porcentaje de vacíos, entre otros beneficios (López y Veloz, 2013).

Para efectos del presente estudio se realizará la modificación de la mezcla asfáltica por vía seca.

Grano de caucho reciclado (GCR)

El GCR se obtiene de llantas ya usadas de automotores, las cuales de otra manera, no tendrían otro destino diferente al de ser parte de un proceso de residuos sólidos o como combustible para producción de energía. Las llantas se componen principalmente de tres productos: caucho (natural y sintético), un encordado de acero y fibra textil. El contacto con el aire causa la oxidación del material, lo cual impide que la goma usada alcance los niveles de calidad que presenta

una nueva, por tal motivo no es posible reciclar neumáticos para utilizarlos como materia prima para producir nuevos (Angulo y Duarte, 2005).

Producción del GCR

Con el fin de producir GCR, se debe garantizar una cantidad suficiente de llantas en desuso que estén libres de acero, fibras y otros materiales que afecten de alguna forma la calidad del producto y por ende sus características. Existen varios métodos para la producción de GCR, como son:

- Obtención por molienda ambiental.
- Obtención por reencauche de llantas.
- Obtención por molienda criogénica.
- Obtención por molienda húmeda (Angulo y Duarte, 2005).

Para efectos del presente estudio el método utilizado es el de “obtención por molienda ambiental”, pues es el de más bajo costo y consiste en utilizar molinos de martillo, los cuales trabajan a temperatura ambiente y en donde por acciones de desgarrar, rasgado o aplanamiento se obtienen partículas de caucho con tamaños no inferiores al tamiz 40 y por medio de un separador magnético se retiran las fibras de acero presentes; además es necesario contar con un sistema que elimine los demás tejidos contaminantes que contenga el material.

Uso del caucho reciclado

Es importante saber que para cualquier adición o modificación, el incremento de costos será notable y tendrá que analizarse con respecto a su beneficio con el fin de determinar su viabilidad. Desde hace algún tiempo, todo el campo de la ingeniería vial está en busca de llegar a una conciliación con aspectos ambientales, procurando que las obras produzcan el menor impacto sobre el medio ambiente (Botasso y Segura, s. f.).

Metodología propuesta

Con el fin de comparar el efecto producido por la modificación de la mezcla asfáltica por vía seca, con respecto a una convencional, se genera un marco comparativo de acuerdo con el ensayo Marshall (INV E- 748-13) y todos los parámetros implícitos.

Como primera instancia es de suma importancia realizar la caracterización de los agregados de la mezcla (arenas, gravas y ligante asfáltico), elaborando los ensayos de laboratorio pertinentes a partir de las normas Inviás vigentes.

Para obtener la proporción óptima de asfalto se realizarán varias briquetas con diferentes proporciones (5,5%; 6%; 6,5%; 7%; 7,5%), para posteriormente ser falladas con el aparato Marshall y comparar sus resultados determinando así el porcentaje óptimo.

Conociendo la cantidad de asfalto necesaria para una mezcla adecuada, se determinará el porcentaje óptimo de GCR, haciendo nuevamente el ensayo Marshall y obteniendo los nuevos datos de diseño

Una vez tengamos estos dos resultados (ensayo Marshall con mezcla convencional y mezcla modificada), realizamos una comparación detallada de los datos obtenidos, logrando así demostrar cuantitativamente la mejoría de la mezcla modificada con GCR basado en los factores esperados a lo largo de este estudio.

Caracterización del ligante asfáltico

A continuación se presenta la caracterización del ligante asfáltico 60/70 usado en la experiencia; con este asfalto se hará la mezcla asfáltica. Este ligante fue suministrado por la planta Paviobras S. A. S., proveniente de Ecopetrol.

Tabla 1. Caracterización del ligante asfáltico.

Ensayo	Unidad	C.A.
Penetración	1/10 mm	4,1
Punto de ablandamiento	°C	49

Caracterización de los áridos

En la siguiente página se presenta un resumen de los ensayos realizados a los materiales pétreos, los cuales van a ser utilizados en la elaboración de la mezcla asfáltica; todos los materiales fueron suministrados por la planta Paviobras S. A. S., el cual es proveniente de Cemex Cantera de Apulo.

Discusión

Con esta investigación se obtuvieron los resultados necesarios para clasificar, de acuerdo con los parámetros establecidos por las normas INV-E, los diferentes agregados pétreos que se utilizarán para la mezcla asfáltica. Se puede observar que los agregados pétreos y el ligante asfáltico son de muy buena calidad y son apropiados para la preparación de mezclas asfálticas. Con la adición de GCR al asfalto original como un agregado más, se comprobará la mejora de algunas de sus propiedades como la duración, la cual se demostrará por el ensayo Marshall; esto indicará sus diferentes parámetros y las características correspondientes.

Los resultados de los ensayos dados en la tabla resumen con su respectiva normativa, permiten el análisis detenido de las características de los agregados pétreos y permitirán realizar el diseño de la mezcla asfáltica de forma adecuada. No habría mejor forma de comprobar que los resultados que arrojan los ensayos de laboratorio son verdaderos, que realizando la pavimentación de un tramo experimental empleando la mezcla óptima obtenida para verificar las propiedades mejoradas. Frente al mejoramiento y potencializador de mezclas asfálticas, se deben probar nuevos compatibilizantes o aditivos para la mezcla asfalto; el uso de llanta reciclada es el agregado potencializador, pues reutilizándolo se logra hacer una acción amigable con el medio ambiente.

Tabla 2. Resultados de ensayo de los agregados pétreos.

Resultados de ensayo				
Propiedad	Normas Invías	Muestra	Unidad	Valor
Máquina de los Ángeles	E-218	Gravas	%	15,74
Índice de aplanamiento	E-230	Gravas	%	37,1
Índice de alargamiento				27,2
SH densidad relativa (gravedad específica)		Arena de peña		2,623
SH densidad relativa (gravedad específica)	E-222	Arena de río	N/A	2,542
SH densidad relativa (gravedad específica)		Gravas		2,7475
Densidad Bulk		Arena de peña		1.616,515
Densidad Bulk		Arena de río	Kg/m3	1.749,4752
Densidad Bulk	E-217	Gravas		1.637,6514
Porcentaje de vacíos		Arena de peña		38,247826
Porcentaje de vacíos		Arena de río	%	31,039104
Porcentaje de vacíos		Gravas		40,221061
Porcentaje de caras fracturadas	E-227	Gravas	%	68,54
Determinación de límite líquido	E-125	Arena de peña	N/A	NL
Determinación de límite líquido		Arena de río		NL
Límite plástico e índice de plasticidad	E-126	Arena de peña	N/A	NP
Límite plástico e índice de plasticidad		Arena de río		NP
Equivalente de arena	E-133	Arena de peña	%	68,564817
Equivalente de arena		Arena de río		98,947133
Azul de metileno	E-235	Arena de peña	ppm	5.750
Azul de metileno		Arena de río		6.250

Referencias

- Angulo, R. y Duarte, J. (2005). *Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos*. 1-79. Recuperado de <http://repositorio.ui.s.edu.co/jspui/bitstream/123456789/6916/2/118188.pdf>.
- Botasso, G. y Segura, A. *Concreto asfáltico en caliente denso con asfalto modificado con caucho reciclado de NFU*. 28-33. Recuperado de http://lemac.frlp.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2012/10/2012_Asf-modif-con-NFU_Construyendo-Caminos-4_Peru.pdf.
- Gonzales, C. (2012). *Ingenio en infraestructura*. Recuperado de http://portalweb.ucatolica.edu.co/easyWeb2/files/111_11891_ingenioeninfraestructurav1t1.pdf.
- López, S. y Veloz, Y. (2013). *Análisis comparativo de mezclas asfálticas modificadas con polímeros SBR y SBS, con agregados provenientes de la carrera de Guayllabamba*. 1-161. Recuperado de <file:///C:/Users/ASUS/Downloads/T-ESPE-47105.pdf>.

Reforzamiento estructural externo de casas de uno y dos pisos por medio de fibras vegetales y maderables

Oscar Ruiz Suárez*

Fundación Universitaria Agraria de Colombia.

Resumen

Por medio de este trabajo de investigación se busca encontrar por lo menos una nueva alternativa de reforzamiento estructural de este tipo de edificaciones por medio de materiales sustentables y sostenibles de origen vegetal.

La metodología propuesta consiste en la recopilación de información sobre el estado del arte, marco teórico e inventario de vegetación y tipología de vivienda predominante en la zona de estudio (por ahora, Viotá), así como ensayos de laboratorio de diferentes materiales de origen vegetal, como tensión axial entre otros, propuestas de prototipos para reforzamiento y luego ensayos de laboratorio a los muretes reforzados pero con las características predominantes de la zona.

Se espera al finalizar este proyecto de investigación, encontrar una nueva alternativa de reforzamiento con materiales no convencionales de origen vegetal, con el cual gran parte de la población rural se pueda beneficiar, de tal forma que se disminuya la vulnerabilidad sísmica ante la que se encuentra la gran mayoría de estas personas a un bajo costo, utilizando materiales propios de la región.

Por ahora se presentará el avance de la información recopilada en cuanto al estado del arte y el marco teórico. De lo primero se han encontrado investigaciones que fortalecen el objetivo de esta investigación, presentando una gran viabilidad, así como lo concerniente al marco teórico.

* Ingeniero Civil UGC-2001 M.Sc. Estructuras ECI-2014 Asp. Esp. Pedagogía y Docencia Universitaria. Docente de Tiempo Completo Uniagraria. Docente Cátedra UD, UGC y ESING. ruiz.oscarvl@uniagraria.edu.co

Introducción

Desde octubre de 2014, junto con el ingeniero Nelson Vargas y estudiantes de semilleros de investigación, se ha venido adelantando la presente investigación. A continuación se presenta el resumen general de la información encontrada.

Marco teórico

Muros estructurales o de corte

Para resistir las fuerzas horizontales actuantes sobre un muro portante, por ejemplo las fuerzas eólicas y sísmicas, se pueden tener en cuenta diferentes caminos. Un pórtico rígido puede aumentar su resistencia con ayuda de muros portantes y particiones de mampostería que absorben parte de las cargas eólicas horizontales; para cargas mayores como las sísmicas, se utilizan muros estructurales de concreto reforzado, conocidos como muros de cortante, solo con el propósito de resistir fuerzas horizontales. Los muros perimetrales de ascensores y escaleras también tienen esta función.

Las superficies horizontales trabajan como vigas de gran altura que transmiten cargas a los elementos verticales A y B. Los muros actúan como vigas en voladizo empotradas en la base para transmitir cargas a la cimentación. Los elementos sometidos a este proceso son:

- Fuerza cortante variable que alcanza un máximo en la base.
- Momento flector que tiende a producir tensión vertical en la zona cercana al borde cargado y compresión en el borde lejano.
- Compresión vertical debido a la carga de gravedad.

Los muros C y D actúan en dirección de la carga de la estructura.

El cortante puede ser crítico para muros con relación entre altura y longitud relativamente bajo. Se controlan por flexión si solo se utiliza acero de refuerzo uniformemente distribuido.

Por ejemplo se puede ver cómo un muro común de cortante con altura h_w , longitud l_w y espesor h , empotrado en la base y cargado horizontalmente a lo largo del borde izquierdo, se refuerza a flexión vertical con un área A_s en el borde izquierdo con su centroide ubicado a una distancia de la cara de compresión extrema. Se logra el refuerzo cortante horizontal con un área A_v en un espaciamiento S_2 . El acero distribuido se coloca normalmente en dos capas paralelas a las caras del muro.

Las bases de diseño tienen la misma forma general que las del diseño para vigas corrientes

$$V_u \leq \Phi V_n$$

$$V_n = V_c + V_s$$

$$\text{También } V_n \leq 10 \sqrt{f' c h d}$$

En esta y las demás ecuaciones d puede ser igual a $0,81 l_w$.

V_c es la resistencia nominal al cortante que proporciona el concreto. Para muros sometidos a compresión vertical.

$$V_c = 2 \sqrt{f' c h d}$$

Y para muros sometidos a tensión vertical N_u

$$V_c = 2 \left(1 + \frac{N_u}{500 A_g} \sqrt{f' c h d} \right) \text{ donde } N_u \text{ es la carga axial mayorada}$$

Cuando la fuerza cortante V_u no excede $\Phi V_n/2$, el muro puede reforzarse según requisitos mínimos; cuando $V_u > \Phi V_n/2$ debe proporcionarse refuerzo a cortante.

La resistencia nominal a cortante V_s que proporciona el acero horizontal del muro se determina con los mismos principios de las vigas corrientes.

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{S_2}$$

Donde

A_v = área del refuerzo horizontal a cortante dentro de una distancia vertical S_2 .

S_2 = distancia vertical entre el refuerzo horizontal.

F_y = resistencia de fluencia del refuerzo.

Los resultados de ensayos indican que para muros de cortante bajo se requiere refuerzo vertical distribuido al igual que el refuerzo horizontal.

Los muros se pueden someter a tensión por flexión que ocasionan los momentos de volcamiento aunque se superponga la compresión vertical producida por las cargas de gravedad. En muchos casos, pero no todos, se proporciona acero vertical concentrado cerca de los bordes del muro. El área requerida de acero puede calcularse como una viga normal.

Los pisos y cubiertas tienen una función doble con muros de cortante; además de resistir las cargas de gravedad,

actúan como vigas de gran altura que se extienden entre elementos de resistencia al cortante. Debido a sus proporciones los esfuerzos a cortante y a flexión son bastante bajos. Se permite una reducción del 25% en el coeficiente de carga global cuando se combinan los efectos de viento o sísmicos con los de las cargas gravitacionales. Por tanto, el refuerzo de pisos y cubiertas, diseñados para cargas gravitacionales, por lo general puede utilizarse como refuerzo para la acción de viga horizontal también sin necesidad de incrementar el área de las barras.

Expresión de fuerza de corte a presión ajustada normal para muros estructurales de mampostería reforzados de lechada completamente

Comportamiento a cortante del concreto reforzado en el macronivel

El estado de fuerza y tensión en cualquier punto dado dentro del cortante de un muro variará con las condiciones de carga en el muro y la localización del punto de interés dentro del muro. Macroelementos o paneles que pueden ser teóricamente aislados para análisis o construidos físicamente para ensayos, representan regiones de grandísimos elementos estructurales, tanto como un muro, aquellos pueden ser modelados y analizados para obtener un mejor entendimiento del comportamiento del material compuesto. Los macroelementos de concreto físico (paneles) están compuestos de los mismos materiales como una gran escala de muro estructural de interés pero son construidos con pequeñas dimensiones y ensayados bajo una buena definición y controlados puntualmente en condiciones de tensión.

Basados en pruebas de concreto reforzado (RC) macroelementos de la Universidad de Toronto, Canadá, Vecchio y Collins (1982, 1986) desarrollaron un modelo de fisura distribuida que podría predecir con precisión el comportamiento de cizalla de refuerzo de hormigón. Ellos modificaron la teoría del campo de la compresión (MCFT), utilizaron unas series de materiales relacionados con su constitución, ecuaciones de compatibilidad tensión-presión y expresiones de equilibrio de fuerzas para cuantificar la fuerza cortante de los elementos de concreto reforzado. La teoría del campo de la compresión fue desarrollada para incluir un amplio rango de diseño de detalles y condiciones de cargas de ese campo de la teoría del campo de la compresión bien llevadas al análisis de elementos finitos (FEA) de muy grandes estructuras.

Los lectores interesados se dirigen a Vecchio, Collins y Mitchell (1991) para las ecuaciones de equilibrio completos necesarios para analizar los elementos de hormigón sometidos a un estado general de tensión. Asimismo, seguir trabajando en la teoría del campo de compresión modificado, facilitó un enfoque simplificado apropiado para aplicaciones de diseño y cálculos de envolvente, donde típicamente solo se requiere la resistencia al corte pico. Finalmente, Benz (2006) propuso la teoría del campo de compresión modificado simplificado (SMCFT) como relativamente simple, pero los medios precisos para estimar la resistencia al corte máximo en elementos de hormigón de refuerzo con simples cálculos manuales e iteración mínima. Este método ha sido adoptado por el diseño concreto de Canadá como el método general para el diseño de cizallamiento. La teoría del campo de compresión modificado simplificado (SMCFT) proporciona un medio racional para estimar el ángulo de fisura que se refiere a la resistencia ofrecida por el refuerzo de corte y el parámetro de resistencia del hormigón. En la sección posterior se destacará el trabajo experimental relacionado con mampostería que se utilizará para desarrollar un conjunto similar de ecuaciones constitutivas a la del hormigón de refuerzo como se describe anteriormente.

Comportamiento al cortante de mampostería en el nivel macro

Solo un número limitado de pruebas en bloques de hormigón macroelementos son reportados en la literatura revisada por los escritores, incluso con menos resultados que el refuerzo de acero incluido. Sin embargo, en un programa experimental integral, Khattab (1993) y Drysdale (1995) probaron 36 bloques de concreto reforzados y no reforzados, macroelementos en virtud de diversos estados de tensión biaxial en la Universidad de McMaster, Canadá. Los elementos macro se construyeron como paneles cuadrados de medición (1200 * 1200 * 190 mm). Los parámetros de ensayo incluyeron la variación de los siguientes parámetros: el ángulo entre la tensión de compresión principal y de la orientación de la junta, la relación de área y relativo entre la vertical y la horizontal de refuerzo, la presencia de conductos de humos de lechada que se ejecutan normal y paralelas a las juntas horizontales, y la relación de las tensiones principales aplicadas. Estos resultados experimentales fueron utilizados para obtener las propiedades constitutivas necesarias para desarrollar un elemento macro modelo (FEA),

que fue presentado por El-Dakhkhni (2006). Se concluyó que la anisotropía de mampostería fue más pronunciada en los paneles sin refuerzo, con conductos de crecimiento que corrieron solo normalmente de las juntas horizontales. Dentro de estos paneles, la distribución de las grietas y los mecanismos de fallo en última instancia dependían fuertemente de la orientación de los esfuerzos principales promedio a las juntas horizontales. La falla de todos los macroelementos no reforzados estaba generalmente supeditada a la existencia de los planos de mampostería inherentes de debilidad. Era típico de tener insuficiencia dominada por las grietas que se forman en un camino en línea recta escalonada a lo largo de las juntas horizontales o de las articulaciones. En comparación, el grado de anisotropía en el comportamiento de mampostería macroelemento se ha reducido notablemente mediante el mantenimiento de conductos de lechada continuos en ambas direcciones ortogonales, con la presencia de refuerzo vertical y horizontal incrustado dentro.

Tikalsky probó ocho paneles de hormigón reforzado bajo un esfuerzo de compresión axial aplicada simultánea normal de las articulaciones de la cama y un esfuerzo de tracción lateral paralelo aplicado a las juntas horizontales. Se observó que con el aumento de la tensión lateral, el esfuerzo de compresión pico y la tensión correspondiente se redujeron en la mampostería.

Liu (2006) también probó paneles cuadrados. Los paneles fueron cada uno probados en diversas principales relaciones de esfuerzo y diferentes ángulos; Liu desarrolló modelos de material para las fuerzas de compresión y tracción de mampostería uniaxiales que dan cuenta de sus características anisotrópicas.

Estado del arte

1. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS)

Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada. Fondo para la Reconstrucción y Desarrollo Social del Eje Cafetero (Forec)

Las edificaciones construidas en adobe y tapia pisada presentan alta vulnerabilidad sísmica lo que ha generado un gran número de pérdidas de vidas humanas y pérdidas económicas. En Colombia existe un gran número de viviendas construidas en adobe y tapia pisada y por lo general no incluyen elementos de refuerzo adecuados y no están construidas con requisitos de diseño sismorresistente. La AIS se encargó de realizar un estudio que estima la vulnerabilidad sísmica

de las edificaciones construidas con técnicas tradicionales y proponer medidas de rehabilitación y reforzamiento sísmico en edificaciones existentes de adobe y tapia pisada; este manual presenta los principales efectos de los sismos en las construcciones de adobe y tapia pisada, las técnicas constructivas tradicionales y el proceso constructivo, las vulnerabilidades sísmicas de las edificaciones de adobe y tapia pisada, las fallas típicas y las alternativas de rehabilitación.

Un documento donde la AIS con el apoyo del Forec y la Red de Solidaridad Social desarrolló un estudio experimental y analítico con el fin de estimar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones construidas con técnicas tradicionales y proponer medidas de rehabilitación y reforzamiento sísmico. Estos estudios permitieron caracterizar estos sistemas constructivos y obtener información necesaria acerca de las propiedades de los materiales y de los principales elementos que componen las estructuras de este tipo de viviendas; adicionalmente, se realizan ensayos experimentales en laboratorios de estructuras de varias universidades para proponer técnicas de reforzamiento y rehabilitación de edificaciones existentes en adobe y tapia pisada.

2. Carrillo Trujillo, 2008

Comparación de la respuesta sísmica incorporando y desacoplando la mampostería y técnicas de reforzamiento.

Capítulo 5. Técnicas de reforzamiento de mampostería.

Ya que la fisuración por tensiones de la mampostería es uno de los problemas más frecuentes durante los sismos y es lo que causa pérdidas humanas, en este documento se proponen cinco alternativas de reforzamiento de la mampostería.

Se presentan las principales ventajas constructivas y mecánicas de cada una de las técnicas y se hace referencia a varias investigaciones internacionales realizadas sobre el tema; finalmente, se hace una aplicación de las técnicas de reforzamiento en Ecuador y se determina cuál de ellas es la que mejor se adapta a las técnicas constructivas de ese país.

Uno de los daños más comunes en las estructuras durante los sismos es la fracturación o falla de la mampostería, pues constituye un elemento muy vulnerable ante las cargas sísmicas coplanares y fuera del plano lo que ocasiona, la mayoría de veces, es el colapso total de la estructura, pues por lo general la mampostería está trabajando como parte del sistema portante de la edificación.

Debido a esto se han desarrollado estrategias con técnicas preventivas de reforzamiento de la mampostería para edificaciones ya construidas; estas técnicas aportan mayor capacidad de carga a la estructura y disminuyen su vulnerabilidad sísmica y se caracterizan por dar ductilidad a la mampostería,

mantener la resistencia de la unidad estructural y reducir casi por completo las fallas frágiles o súbitas que se presentan comúnmente en estos elementos durante un sismo.

3. Yamin, Phillips, Reyes Ruiz. 2007

Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada.

Este artículo presenta los principales resultados de los proyectos de investigación “Estudio de vulnerabilidad sísmica de las edificaciones construidas en técnicas tradicionales de adobe y tapia pisada”, realizado por el Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles, Cimoc, de la Universidad de los Andes y financiado por la Corporación Barrio La Candelaria; y “Estudio de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas de adobe y tapia pisada a nivel nacional”, realizado por el Centro de Estudios de Desastres y Riesgos, Cederi, de la Universidad de los Andes y financiado por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica y el Fondo para la Reconstrucción Social del Eje Cafetero.

Aproximadamente un quinto de la población mundial y alrededor de 35 millones de personas en Suramérica habitan en edificaciones de adobe y tapia pisada. Este tipo de edificaciones han demostrado un pobre comportamiento sísmico en los terremotos ocurridos en los últimos cincuenta años alrededor del mundo generando miles de muertes. Adicionalmente, en Colombia, una gran cantidad de construcciones históricas y culturales en tierra están localizadas en zonas de alta sismicidad. Con estos antecedentes, se desarrolló una investigación orientada a conocer el comportamiento de esta tipología constructiva en su estado actual y proponer alternativas de rehabilitación sísmica viables desde el punto de vista técnico. Las dos alternativas propuestas, refuerzo con malla y pañete y refuerzo con maderas de confinamiento, prueban ser factibles, presentando la segunda un mejor comportamiento sísmico relativo.

3. Igarashi Hasegawa. 2009

Reforzamiento estructural de muros de adobe, tesis, Lima Perú, Universidad Nacional de Ingeniería.

En este documento se estudian dos alternativas para reforzar muros de adobe existentes, una contempla el uso de estera como elemento de confinamiento y la otra costalillo plástico. Estos elementos de confinamiento van anclados a un par de listones de madera que se encuentran amarrados al muro de adobe. En esta investigación se ensayaron cuatro muros de adobe que fueron fabricados con condiciones desfavorables; dos de estos muros fueron reforzados emplean-

do costalillo y otros dos, usando estera, fueron ensayados y se obtuvieron resultados favorables en ambos casos. En los muros reforzados con estera, la resistencia al corte solo aumentó en forma proporcional al aumento geométrico de la sección transversal del muro, y se pudo observar que la distorsión alcanzada por el muro fue cuatro veces mayor que la obtenida en un muro convencional. En el caso de los muros reforzados con costalillo, el esfuerzo cortante máximo aumentó en un 13%. Asimismo, la distorsión aumentó un 400% en comparación con un muro convencional y en forma similar a la alternativa de refuerzo con estera. Se determina que la mejor alternativa de refuerzo es la que emplea costalillos, por tener mejor comportamiento, por ser más económica y haber mayor disponibilidad del material a nivel nacional.

Conclusiones

De acuerdo con la experiencia del director de esta investigación, como docente del curso de diseño de edificios de muros portantes en la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital durante seis semestres seguidos, más lo encontrado en el estado del arte de otras investigaciones similares realizadas en nuestro país y otros países, no queda duda de que el presente proyecto es muy prometedor y posibilita la obtención de resultados muy satisfactorios, en especial, en lo relacionado con el gran aporte que se le puede ofrecer a las comunidades rurales menos favorecidas de nuestro país.

Entendido el comportamiento de estas edificaciones con alto grado de vulnerabilidad sísmica, se pueden plantear prototipos de reforzamiento estructural que realmente pueden llegar a ser aplicados en las comunidades a un muy bajo costo y sin necesidad de mano de obra calificada.

El objetivo final será desarrollar una cartilla que sirva como manual, que se difunda y pueda ser de gran utilidad para varias familias de escasos recursos.

Referencias

- Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Building, T. Paulay M.J.N. Priestley. WILEY. 2009.
- Reinforced Masonry Design, R.R. Schneider W.L. Dickey. Hardcover. 3ª Edición. 1993.
- Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente 2010, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica-AIS. *Journal of Structural Engineering*. 2013.
- Diseño de estructuras de concreto. G. Winter, A. Nilson. McGraw Hill. 12ª Edición. 2003.

Investigación experimental del comportamiento de vigas altas reforzadas con tiras de bambú

R. Amado*
K. Ghavami**
PUC-Río, Brasil

Resumen

El continuo y variado uso de vigas altas como elementos con función estructural en diferentes tipos de proyecto tales como silos, reservorios, fachadas de edificio entre otros, además de la importancia del bambú como material no convencional en la práctica de la ingeniería sustentable son hechos que justifican esta investigación, cuyo objetivo es entender el comportamiento de vigas altas de concreto reforzado con bambú (tipo *Dendrocalamus Giganteus*). Nueve vigas altas con relación geométrica luz-altura (l/h) igual a 1,5, simplemente apoyadas y reforzadas con bambú fueron sometidas a una carga superior puntual central. Además, con el fin de mejorar la adherencia entre el concreto y el refuerzo de bambú se trataron con una mezcla de epóxico-arena. Los resultados experimentales (desplazamientos, abertura de fisuras, deformaciones y cargas últimas) se compararon con resultados de las investigaciones llevadas a cabo en vigas altas de concreto reforzadas con barras de acero.

Palabras clave: refuerzo de bambú, vigas altas, carga máxima, desviación, fisuración.

* ing.amado@gmail.com

** ghavami@puc-rio.br

Definición

Una viga alta es un elemento estructural plano vertical, solicitado por cargas actuantes en su propio plano, se pueden definir en virtud de la relación (l/h) presentada entre la luz (l) y la altura (h), y que varía dependiendo de la norma estructural usada.

Objetivo de la investigación

El objetivo principal del presente estudio es estudiar el comportamiento general de las vigas altas reforzadas con tiras de bambú, identificando y comparando con normas y estudios experimentales realizados en vigas altas de concreto reforzadas con barras de acero, los mecanismos de falla, patrón de fisuración, deflexiones y desplazamientos al igual que las cargas últimas. Para eso fueron testadas nueve vigas altas re-

forzadas con bambú y una reforzada con acero, simplemente apoyadas, geoméricamente iguales, sometidas a una carga puntual central sobre la cara superior y distribuidas en cuatro grupos diferenciados por la tasa geométrica de armadura de refuerzo.

Análisis experimental

Bambú

Se seleccionó el bambú de la especie *Dendrocalamus giganteus*, cultivado en la PUC-Río y cortado en el rango de edad de tres a seis años después del nacimiento. Posteriormente, se realizó un tratamiento de impermeabilización de la superficie del bambú, para luego fabricar las armaduras de refuerzo de cada una de las vigas estudiadas. En las tablas 1 y 2 se muestra la resistencia a tracción del bambú usado.

Tabla 1. Resistencia a la tracción del bambú con nodo de la especie *Dendrocalamus*

	Corpo de prova	σ máx.	Def. máx.	E
	ID	(Mpa)	(μ strain)	Gpa
COM nó	1 CN	118,54	7.231,69	16,30
	2 CN	82,95	10.810,00	8,30
	3 CN	116,28	6.546,19	17,67
	4 CN	105,11	6.210,00	19,44
	5 CN	154,89	9.080,00	17,64
	Media	105,72	7.975,58	17,76
	Padrão estándar	16,27	2.116,82	1,29
	Coef. Variação	15,39%	26,54%	7,25%

Tabla 2. Resistencia a la tracción del bambú sin nodo de la especie *Dendrocalamus giganteus*

	Corpo de prova	σ máx.	Def. máx.	E
	ID	(Mpa)	(μ strain)	Gpa
SEM nó	1 SN	96,89	5.227,60	18,64
	2 SN	139,45	7.600,00	19,00
	3 SN	148,65	6.990,00	20,12
	4 SN	124,64	8.510,86	14,92
	5 SN	153,17	8.227,00	17,72
	Media	132,56	7.311,09	18,08
	Padrão estándar	22,73	1.304,40	1,96
	Coef. Variação	17,14%	17,84%	10,87%

Concreto

El concreto usado fue fabricado *in situ*, cuyas características de diseño de mezcla tales como resistencia a la compresión, relación agua-cemento y asentamiento fueron de 25 MPa, 0,45 y 10 cm respectivamente.

En la tabla 3 se muestran la resistencias a la compresión (f_c) y a la tracción por compresión diametral (f_{ct}) del concreto usado para cada una de las vigas testadas

Análisis experimental

Se ensayaron diez vigas altas de concreto, de las cuales nueve fueron reforzadas con tiras de bambú y una reforzada con barras de acero. En la tabla 4 se muestran los grupos de las vigas testadas de acuerdo con el plan de ensayos planteado para el presente estudio.

Descripción del grupo de vigas V1

Las tres vigas del grupo V1 fueron reforzadas a flexión con cuatro tiras de bambú distribuidas en dos niveles, Las áreas transversales de las tiras de bambú en cada uno de los niveles de refuerzo se muestran en la tabla 5.

Además de los 13,2 cm² de área promedio suministrada para el refuerzo principal en cada viga de este grupo, se usó una armadura secundaria formada por estribos de bambú.

Tabla 3. Resultados de los ensayos de compresión simple y los ensayos de compresión diametral del concreto

Viga	Idade (días)	f_c	f_{ct}
		(N/mm ²)	(N/mm ²)
V1-1	120	37,3	3,13
V1-2	120	37,51	3,08
V1-3	145	39,25	3,22
V2-1	125	36,21	3,25
V2-2	120	34,01	3,03
V2-3	120	32,13	2,92
V3-1	120	37,2	3,40
V3-2	120	39,24	3,59
V3-3	120	36,19	3,31

Tabla 4. Grupos de vigas altas testadas

Grupo	Área média de	Taxa de	Material de
	reforço (cm ²)	reforço principal ρ (%)	
V1	13,2	1,0	Bambu
V2	16,2	1,2	Bambu
V3	25,1	1,9	Bambu
V4	8	0,6	Aço

Tabla 5. Área y distribución de refuerzo principal en las vigas V1

V1-1			V1-2			V1-3		
Dimensões da seção (mm)	Área da seção (cm ²)	Camada	Dimensões da seção (mm)	Área da seção (cm ²)	Camada	Dimensões da seção (mm)	Área da seção (cm ²)	Camada
31 x 15	4,7	1	32 x 10	3,2	1	27 x 17	4,6	1
23 x 17	3,9	1	30 x 18	5,4	1	27 x 16	4,3	1
25 x 8	2,0	2	25 x 10	2,5	2	25 x 9	2,3	2
28 x 10	2,8	2	25 x 8	2,0	2	25 x 8	2,0	2
Σ (cm ²) =	13,4		Σ (cm ²) =	13,1		Σ (cm ²) =	13,2	
Média (cm ²) = 13,2								

Descripción del grupo de vigas V2

Para las vigas de este grupo, la tasa de refuerzo principal suministrado fue de (ρ) de 1,2% que corresponde a 16,2 cm² distribuidos, como se ve en la tabla 6. Nótese que para las vigas de este grupo no se usaron estribos verticales.

Descripción del grupo de vigas V3

El área promedio del refuerzo principal suministrado en las vigas del presente grupo fue de 25,1 cm² (tabla 7).

Descripción del grupo V4

La viga V4 fue reforzada en su totalidad con barras de acero, se usaron 8 cm² de refuerzo principal distribuidos en dos niveles, además se usó armadura secundaria formada por barras de 6,3 mm.

En la tabla 8 se indica el resumen de las tasas geométricas de refuerzo (ρ) suministrado para las vigas de los grupos V1, V2, V3 y V4.

Tabla 6. Área y distribución de refuerzo principal en las vigas V2

V2-1			V2-2			V2-3		
Dimensões da seção (mm)	Área da seção (cm2)	Camada	Dimensões da seção (mm)	Área da seção (cm2)	Camada	Dimensões da seção (mm)	Área da seção (cm2)	Camada
34 x 12	4,1	1	32 x 10	3,2	1	30 x 18	5,4	1
33 x 17	5,6	1	30 x 17	5,1	1	32 x 13	4,2	1
31 x 11	3,4	2	31 x 14	4,3	2	33 x 10	3,3	2
30 x 10	3,0	2	30 x 12	3,6	2	33 x 10	3,3	2
Σ (cm2) =	16,1		Σ (cm2) =	16,2		Σ (cm2) =	16,2	
Média (cm2) = 16,2								

Tabla 7. Área y distribución de refuerzo principal en las vigas V3

V3-1			V3-2			V3-3		
Dimensões da seção (mm)	Área da seção (cm2)	Camada	Dimensões da seção (mm)	Área da seção (cm2)	Camada	Dimensões da seção (mm)	Área da seção (cm2)	Camada
30 x 19	5,7	1	31 x 16	5	1	32 x 19	6,1	1
30 x 19	5,7	1	32 x 13	4,2	1	30 x 15	4,5	1
32 x 11	3,5	2	31 x 15	4,7	2	32 x 13	4,2	2
33 x 11	3,6	2	32 x 12	4	2	33 x 11	3,6	2
31 x 11	3,4	3	32 x 12	3,8	3	32 x 11	3,5	3
31 x 10	3,1	3	32 x 11	3,5	3	31 x 10	3,1	3
Σ (cm2) =	25		Σ (cm2) =	25,2		Σ (cm2) =	25	
Média (cm2) = 25,1								

Tabla 8. Tasa geométrica de refuerzo de las vigas V1, V2, V3 y V4

Vigas	Armadura principal		Armadura alma			
	As (cm ²)	ρ (%)	Horizontal		Vertical	
			Awh (cm ²)	ρ_h (%)	Aww	ρ_v (%)
V1-1	13,4	1,0	8,0	0,6	40,0	1,9
V1-2	13,1	1,0	8,0	0,6	40,0	1,9
V1-3	13,2	1,0	8,0	0,6	40,0	1,9
V2-1	16,1	1,2	-	-	-	-
V2-2	16,2	1,2	-	-	-	-
V2-3	16,2	1,2	-	-	-	-
V3-1	25,1	1,9	8,0	0,6	40,0	1,9
V3-2	25,1	1,9	8,0	0,6	40,0	1,9
V3-3	25,0	1,9	8,0	0,6	40,0	1,9
V4	8,0	0,6	2,5	0,2	49,9	2,3

Montaje del ensayo

Las vigas testadas fueron solicitadas en la cara superior por una carga central concentrada generada por la acción de dos gatos hidráulicos con capacidad de 500 KN cada uno.

donde el cortante tiene mayor influencia, que nace en los apoyos de la viga y se propaga en dirección al punto de aplicación de la carga. Luego, surge una segunda fisura diagonal paralela, que evidencia las zonas diagonales de esfuerzos de compresión llamadas bielas comprimidas.

Resultados

Mecanismos de falla y configuración de fisuras

Cuando la resistencia a la tracción del concreto es alcanzada, surgen en la parte inferior, en la zona central de cada una de las vigas, las primeras fisuras, casi verticales. Con el incremento de carga estas fisuras aumentan en su longitud y abertura. Posteriormente, el proceso de fisuración continúa con la aparición de fisuras cada vez más próximas a los apoyos y con dirección al punto de la aplicación de carga, implicando una mayor inclinación de las fisuras a medida que estas se alejan del centro de la viga testada. Si la resistencia del refuerzo es superior a los esfuerzos de tracción generados por la flexión, aparece una fisura inclinada en las zonas

Conclusiones

El uso de la armadura de alma contribuyó en el control de la abertura de la fisura y permitió que las vigas altas con este tipo de refuerzo soportaran mayores cargas. Para las condiciones particulares de este estudio, tales como dimensiones geométricas de las vigas, uso de bambú tratado e impermeabilizado, resistencia a la tracción del bambú, la aplicación de una carga central, se encontró la relación entre tasas de armadura principal de las vigas reforzadas con acero y las vigas reforzadas con tiras de bambúes próxima a tres (1: 3.2). La secuencia de fisuración y los mecanismos de falla en las vigas reforzadas con bambú, son similares a los presentados en vigas de paredes reforzadas con acero.

Referencias

- Achá, E. H. Bamboo: high tech material for concrete reinforcement. 2011. Tese doutorado – Faculdade de engenharia Civil, PUC-Río, Río de Janeiro, 2011.
- Achá, E. H. Estudo teórico experimental a flexão de lajes de concreto reforçadas com bambú. 2002. Dissertação de Mestrado–Faculdade de engenharia Civil, PUC-Río, Río de Janeiro, 2002.
- Chow, H. K. Bamboo as material for reinforcing concrete, 1914. Tesis de doctorado, Massachusetts Institute of Technology, 1914, 121 pp.
- Comité Euro-international du Beton/Federation Internationale de la Precontrainte. International. CEB-FIP: recommendations for the design and construction of concrete structures. Deep beams. Information bulletin n.73 - Appendix 3, p.17-24. París, junio de 1970.
- Crist, R. A. Shear behavior of deep reinforced concrete beams: Proc.Int. Symposium on Repeated Loading of Materials and Structures. México, 1966.
- Crist, R. A. Shear behavior of deep reinforced concrete beams: Static tests, AFWL-TR-67-61, Kirtland Air Force Base, 1967.
- Ghavami, K. y Zielinski, Z. A. Permanent shutter bamboo reinforced concrete slab.BRCS1, Civil Eng. Dept., Concordia University, Montreal, Canadá, 1988.
- Glenn, H. E. Bamboo reinforcement in Portland cement concrete. Engineering Experiment Station, Clemson University, v. 4, 1950, 171 pp.
- Guimarães, G. B. Análise experimental de vigas parede de concreto armado enrijecidas por pilares laterais. 1980. Dissertação de Mestrado–Faculdade de Río de Janeiro, 1980.
- Hidalgo, O. Study of Mechanical Properties of Bamboo and its Use as Concrete Reinforcement: Problems and Solutions, 1992. Centro Interamericano del Bambú (Cinba). Proceedings of the Vth International Bamboo Workshop and the IV International Bamboo, Bali-Indonesia, 1995, pp. 76-91.
- Kameswara Rao, C. V. S. y Dayaratnam, E. Effect of reinforcement on ultimate strength of deep beams. International Symposium on Bearing Walls, Warsaw. Junio de 1969, Paper No. 15.
- Kong, F. K. y Wong, H. H. A. Stability and strength of slender concrete deep beams. en capítulo 10, Reinforced concrete deep beams. K. K. Kong (ed.). Glasgow y Londres, Blackie y Son, 1990, pp. 238-283.
- Kong, F. K.; García, R. C.; Paine, J. M.; Wong, H. M. A.; Tang, C. W. J. y Chemrouk, M. Strength and stability of slender concrete deep beams. *The Structural Engineer*, v. 64B, n.3, septiembre de 1986, pp. 49-56.
- Kong, E K. y Singh, A. Diagonal cracking and ultimate loads of lightweight concrete deep beams. *Journal of the American Concrete Institute*, v. 69, n. 8, agosto de 1972, pp. 513-21.
- Kong, F. K; Robins, P. J y Cole, D. F. Web reinforcement effects on deep beams. *Journal of the American Concrete Institute*, v. 67, n. 12, diciembre de 1970. pp. 1010-1017.
- Kotsovos, M. D. Compressive force path concept:basis for ultimate limit state reinforced concrete design. *Journal of the American Concrete Institute*, v. 85, n. 1, enero de 1988, pp. 68-75.
- Kumar, R. Short term deflections of deep beams. *Journal of the American Concrete Institute*, v. 75, n. 8, agosto de 1978, pp. 381-3.
- Kumar, P. Collapse load of deep reinforced concrete beams. *Magazine of Concrete Research*, v. 28. n. 94, marzo de 1976, pp. 30-36.
- Leonhardt, F. Poutres-Cloisons: Estructures planes charges parallèlement à leur plan moyen. Comité Européen du Béto. *Bulletin D'information* n. 65, pp. 1-113. París, 1968.
- Mau. S. T. y Hsu, T. T. C. Shear strength prediction for deep beams with web reinforcement. *Journal of the American Concrete Institute*, v. 84, n. 6, noviembre-diciembre de 1987, pp. 513-523.
- Moreira, L. E. Aspectos singulares das treliças de bambú: Flambagem e conexões bambú. 1998. Tese de doutorado–Faculdade de engenharia Civil, PUC-Río, Río de Janeiro, 1998.
- Moreira, L. E. Desenvolvimento de estruturas treliçadas espaciais de bambú. 1991. Dissertação de Mestrado–Faculdade de engenharia Civil, PUC-Río, Río de Janeiro, 1991.
- Pereira Da Rosa, S. Análise teórica e experimental de colunas de concreto armado com bambú. 2002. Dissertação de Mestrado–Faculdade de engenharia Civil, PUC-Río, Río de Janeiro, 2002.
- Portland Cement Association. PCA. Concrete Information ST66: Design of deep girders. Chicago, 1946.
- Rawdon de Paiva, H. A y Siess, C. P. Strength and behavior of deep beams in shear. *Journal of the Structural Division*. v. 91, n. ST5, octubre de 1965, pp. 19-41.
- Ramakrishnan, V. y Ananthanarayana, Y. Ultimate strength of deep beams in shear. *Journal of the American Concrete Institute*, v. 65, n. 2, febrero de 1968, pp. 87-98.
- Subedi, N. K.; Vardy, A. E. y Kubota, N. Reinforced concrete deep beams – some test results. *Magazine of Concrete Research*, v. 38, n. 137, diciembre de 1986, pp. 206-219.
- Tan, K. H.; Weng, L. W. y Teng, S. A Strut and tie model for deep beams subjected to combined top and bottom loading. *Journal of the American Concrete Institute*, v. 75, n. 13, Julio de 1997, pp. 215-225.

Tan, K.H.; Lu, H.Y. y Teng, S. Shear behavior of large reinforced concrete deep beams and code comparisons. *Journal of the American Concrete Institute*, v. 96, n. 5, 1999, pp. 836-845.

Wang, W. Jiang, D. H. y Hsu, C. T. T. Shear strength of reinforced concrete deep beams. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, v. 119, n. 8, agosto de 1993, pp. 2294-2312.

Estudio de procesos de tratamiento en macizos rocosos mediante inyecciones de lechada hidráulica en la ataguía-Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso

Olga Pacheco A., Mauricio Sáenz C., Andrés Gutiérrez B.

Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil

Resumen

Por condiciones de oportunidad y accesibilidad a información del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso, el cual se estima que genere alrededor del 10% de la energía eléctrica de Colombia, se realiza el presente trabajo el cual tuvo como finalidad evaluar la viabilidad de utilizar cementantes hidráulicos como relleno de poros del macizo rocoso determinando, mediante pruebas de campo de inyección de lechada hidráulica, el consumo para alcanzar bajas condiciones de permeabilidad y evaluar su correspondencia con ensayos de permeabilidad en macizos rocosos en campo. El anterior análisis se realiza para la cortina triple de inyecciones en la ataguía con una longitud de 190 m y una altura de 170 m del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso.

Palabras clave: ataguía, inyección, lechada hidráulica, permeabilidad lugeón, macizo rocoso.

Introducción

El Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso tiene como principal objetivo el aprovechamiento de las aguas del río Sogamoso, para la generación de energía eléctrica mediante la construcción de una presa de gravas con cara de concreto y la instalación de tres unidades de generación ubicadas en una central subterránea.

Para garantizar la estanqueidad del futuro embalse y proteger la fundación rocosa de potenciales efectos dañinos ocasionados por flujos de agua, fue necesario el diseño y la construcción de una cortina triple de inyecciones en la ataguía que tiene una longitud de 190 m y a una diferencia de nivel de 170 m. Para esto fue necesario realizar diversas pruebas de inyectabilidad de lechada hidráulica y pruebas de permeabilidad en macizos rocosos, a fin de mejorar las propiedades mecánicas y de flujo del macizo rocoso.

Conceptos generales

Inyección de impermeabilización

Consiste en la impermeabilización de la roca mediante inyecciones a través de perforaciones, sellando fracturas o discontinuidades geológicas (fallas, diques) existentes, con el propósito de reducir la permeabilidad del terreno al formar una barrera lo suficientemente profunda para garantizar la estanqueidad de la obra.

Cortina profunda de inyecciones

Corresponde a la perforación de una o más líneas de huecos, cada uno a la profundidad y dirección especificada y la inyección de mezcla en tales huecos para conformar un plano de baja permeabilidad.

Huecos de chequeo

Perforación de huecos ejecutados utilizando el sistema de rotación y con recobro de núcleos para verificar la efectividad de las inyecciones ejecutadas.

Inyecciones empleando el método de engrosamiento sucesivo

Las inyecciones de la fundación de la presa se harán con una mezcla de lechada única rica en cemento, para lograr el grado de impermeabilidad de diseño de la fundación de la presa y garantizar la durabilidad a largo plazo de las cortinas de inyección. El método especificado para las inyecciones será el método de engrosamiento sucesivo de la mezcla hasta obtener rechazo.

Ensayos lugeón

Consiste en anotar los caudales absorbidos a presiones crecientes y decrecientes, manteniendo cada caudal durante 5 minutos. El resultado viene expresado por la medida de agua absorbida en litros por minuto, y metro, para una presión de inyección de 10 kg/cm², siendo cada tramo de son-

deo ensayado de 5 m de longitud. Actualmente todas estas condiciones se conocen con el nombre de unidad lugeón (UL). Con cantidades inferiores a una unidad lugeón, podemos considerar que la inyección resulta innecesaria.

Condiciones generales del estudio

Geología

Morfológicamente el sitio de presa se localiza en un estrecho cañón con paredes de altas pendientes, formado por el río Sogamoso en la Cuchilla La Paz, la cual está constituida básicamente por areniscas y arcillolitas de la Formación La Paz.

La ataguía tiene unos 200 m de longitud, hace parte del cuerpo de la presa. En este sector el río tiene un ancho de 50 m y la lámina de agua es de unos 5 m de altura. La ladera izquierda presenta inclinaciones de 55°, la ladera varía entre 8° y 25°.

La ladera de la margen izquierda se encuentra cubierta por coluvión, de 2 a 4 m de espesor, con bloques y fragmentos de arenisca en matriz areno-arcillosa. Se prevé presencia de agua en el contacto coluvión-roca. El coluvión de la ladera izquierda cubre rocas del miembro inferior de la Formación La Paz, conformadas por arenisca de dureza media a friable con intercalaciones de arcillolita blanda de 0,50 m y limolita hasta de 2 m de espesor. De acuerdo con los estudios realizados en el área, las rocas se presentan fracturadas hasta unos 9 m de profundidad, con un RQD menor del 70%. A partir de esta profundidad se presenta de mejor calidad.

El rumbo de los estratos es perpendicular a la inclinación de la ladera, con buzamientos de 30° hacia aguas abajo. En los taludes de corte, del costado izquierdo, los estratos presentarán inclinaciones de 8° a favor de la pendiente del terreno, que junto con el sistema 2 de diaclasas (N₅₅°W/65°NE, N₆₅°W/70°NE) delimitan bloques con inclinación desfavorable para los cortes.

El lecho del río, en el sector de la atagüa, está conformado por bloques subredondeados hasta de 1 m de diámetro, cantos, gravas, fragmentos, gravilla, arena, conglomerados, limolita, caliza, algunas rocas ígneas, como granodiorita, el depósito se encuentra poco consolidado a suelto y su espesor varía entre 8 y 15 m.

Procedimiento de campo

- a. Perforación: las perforaciones en los puntos a intervenir, siguieron los lineamientos indicados en los planos de construcción, teniendo en cuenta profundidad, diámetro (mínimo 50 mm), inclinación y rumbo de los huecos a ejecutar; o como instruido por interventoría, las perforaciones serán ejecutadas con maquinaria eléctrica Altas Copco modelo Diamec 262 o similar, apta para perforar hasta una longitud máxima de 130 m con cualquier inclinación. Las perforaciones fueron ejecutadas con el método a rotación o rotopercusión garantizando un corte uniforme y el diámetro mínimo en toda la longitud. Todos los agujeros para inyección de cortina se perforaron con agua como fluido de perforación, que con su circulación aseguró una continua expulsión de las rebabas o sedimentos producidos y un constante lavado de las paredes.
 - b. Pruebas de agua, lavado y limpieza para las inyecciones de cortina: para determinar la permeabilidad de la roca, se realizaron pruebas con agua a presión. Antes de empezar la prueba de agua, o la inyección, el hueco se limpió cuidadosamente con agua y aire a una presión no mayor a 1,0 MPa, con el fin de remover todos los sedimentos, rebabas de taladro, lodo y cualquier otra sustancia extraña. La operación de lavado se realizó por un tiempo entre 3 a 5 minutos o hasta cuando el agua retornó completamente limpia y se consideró que la perforación se encontraba libre de cualquier impuriedad.
 - c. Inyecciones: Lechada de inyección: se produce por un mezclador coloidal a altas revoluciones 1300 r. p. m., equipado con caudalímetro por la medición de agua y un sistema reciclo. Después de cumplir con el tiempo de mezclado, la lechada se envía a un agitador de bajas revoluciones donde permanecía en movimiento. En el caso de la bentonita, esta fue preparada en un mezclador de altas revoluciones con un tiempo de mezclado de 5 minutos, de donde fue enviada a agitación durante 24 horas; posteriormente se utilizó para preparar las mezclas de inyección.
- Inyección de cortina: la mezcla de inyección se realizó utilizando el método de engrosamiento sucesivo, disminuyendo el porcentaje de aditivos y bentonita, aumentando la viscosidad

y disminuyendo así la permeabilidad. Cada perforación tiene una profundidad de 60 m, las cuales iniciaron con presión y caudal de bombeo bajo para evitar el sellado repentino y se aumentó progresivamente.

Análisis de resultados

Conforme a los resultados de permeabilidad Lugeón realizados, se identificó el macizo rocoso en función de su profundidad y resultado de permeabilidad, ya sea impermeable (de 0,0 a 3,0 UL), permeable (de 3,0 a 6,0 UL) y muy permeable (de 0,6 UL, en adelante).

Con los resultados de consumo de lechada hidráulica, en kg/m, se sectorizó el macizo rocoso en función de su profundidad y resultado de consumo de lechada, ya sea consumo bajo (de 0,0 a 400,0 kg/m), consumo medio (de 400,0 a 800,0 kg/m) y consumo alto (mayores a 800,0 kg/m).

Se compararon los resultados relativos de cada una de las perforaciones en las que se hicieron ensayos de permeabilidad con el consumo de lechada hidráulica de la misma perforación, identificando las condiciones de representatividad de las actividades realizadas y las coherencias de los resultados.

Conclusiones

Con el seguimiento hecho durante el proceso constructivo de la cortina triple de inyección se determinó que se presentaron zonas muy marcadas de falla principalmente hacia el centro del plano de construcción de la atagüa.

Del mismo modo se notó un considerable consumo de lechada durante la primera fase de construcción, es decir, durante la inyección de las perforaciones primarias siendo que se estaba tratando un macizo rocoso sin ningún tratamiento previo.

De acuerdo con los resultados obtenidos, durante las inyecciones de segundo orden (inyecciones secundarias), y al dar inicio a la fila de perforaciones aguas abajo, en determinados tramos, se notó una disminución del consumo en más de un 50%, lo que determina que la primera lechada inyectada afectó de manera positiva una cantidad importante de fallas dentro de la roca.

Al hacer un análisis comparativo a las perforaciones a las cuales se les realizó el ensayo lugeón contra los consumos de lechada, no fue posible determinar un parámetro de estado del macizo rocoso, siendo que los resultados lugeón no fueron afines con los consumos de las mismas perforaciones,

por lo tanto podemos concluir que los ensayos lugeón no son un dato determinante para tener una idea del plano de falla dentro de las perforaciones.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos al ingeniero Andrés Giovanni Gutiérrez, docente del Departamento de Ingeniería Civil de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia, quien fue el director del presente trabajo, bajo la modalidad de opción de grado.

Al jefe de área del Departamento de Perforaciones e Inyecciones del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso, quien autorizó el libre ingreso a la zona del proyecto y el uso libre de los datos para el desarrollo del presente trabajo.

Referencias

Chacín, María Gabriela. Optimización de los criterios utilizados para la construcción de la cortina de inyección en la presa de

- enrocamiento izquierda con pantalla de concreto del Proyecto Hidroeléctrico Manuel Piar (Tocoma), Bolívar, Venezuela. Universidad de Oriente Núcleo Bolívar Escuela de Ciencias de la Tierra Departamento de Geotecnia. 2010
- Chaves, Carlos y Vargas, Asdrúbal. Criterios utilizados para el diseño de la cortina de Impermeabilización del Proyecto hidroeléctrico Pirrís, Costa Rica, Centro de Servicio Exploración Subterránea, Área de Perforación y Servicios Conexos, Instituto Costarricense de Electricidad. 2005.
- Consorcio Integral-VQ Ingeniería. Grupo ICT II S. A. S. Conalvías. "Procedimiento Técnico de Inyección y Cortina". Betulia. Santander, Colombia, 2011.
- De Giordano. Pablo. Tratamiento de Fundaciones-Inyecciones Recopilación de "Grouting technology" del U. S. Army Corps of Engineers, reportes del Bureau of Reclamation, "Construction and design of cement grouting" de A. C. Houlsby, artículos de Lombardi y Deere, y otras publicaciones, p. 15.
- Empresa Misicuni. Especificaciones técnicas. Construcción presa y obras anexas. Capítulo 10. Inyecciones a Presión y Huecos de Drenaje.
- Ewert, F.K. (1992) "The individual groutability of rocks". Water Power & Dam Construction, v. 44, n. 1, enero de 1992.

Modelo hidrogeológico conceptual de acuíferos

Ing. Esp. Ph. D. Edgar Ricardo Monroy Vargas*

Programa de Ingeniería Civil

Resumen

Las aguas subterráneas desde siempre se han venido utilizando como alternativa a las aguas superficiales. Normalmente, el volumen de agua almacenado en los acuíferos es muy grande, comparado con el flujo de recarga, esto implica que el tiempo de residencia de las aguas subterráneas de los acuíferos sea muy superior al de las aguas superficiales en su reservorio (ríos y lagos). El objetivo de este artículo es el de incorporar una serie de estudios en donde se involucran aspectos geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos, geotécnicos, sociales, económicos y culturales, apoyados por la cartografía del SIG. También, con la finalidad de dar a conocer un diagnóstico general, real y veraz del estado actual del acuífero de la ciudad de Duitama, (Boyacá, Colombia), que permita a su vez, proponer las técnicas necesarias para su correcto manejo, conservación en el tiempo y prevenir su contaminación. Hace parte del alcance de este estudio, el desarrollo de un modelo hidrológico conceptual, evaluación de volúmenes de extracción anual, evaluación de reservas y de recarga del acuífero en explotación, determinación del rendimiento del acuífero en explotación, priorización del uso de las aguas subterráneas y elaboración de un plan de manejo ambiental, que permitan la implementación de medidas de protección de las aguas subterráneas.

Palabras clave: acuífero, recursos hídricos, modelo hidrogeológico, recarga y descarga.

* monroy.edgar@uniagraria.edu.co

Introducción

En la actualidad el municipio de Duitama no conoce la extensión del acuífero que se encuentra hoy por hoy bajo explotación, las zonas de recarga, volúmenes de agua, volúmenes de extracción, volúmenes de recarga, fuentes superficiales que apoyan su recarga y posibles fuentes y puntos de vulnerabilidad a la contaminación; con base en esto este estudio pretende diagnosticar el estado actual del acuífero que permita a su vez, proyectar las estrategias necesarias para su manejo y conservación futura. Hacen parte del alcance de este estudio, el planteamiento de un modelo hidrológico conceptual, evaluación de volúmenes de extracción anual; evaluación de reservas y de recarga del acuífero. Al encontrar estas variables desconocidas se puede establecer el modelo hidrogeológico conceptual.

Metodología

Localización área de estudio

La ciudad de Duitama se localiza en Colombia, departamento de Boyacá, en la región andina ubicada en el altiplano cundiboyacense; esta ciudad se localiza en el plano geográfico delimitado al norte por la cadena montañosa en el Alto Lamadero en la coordenada norte 1.149.000, al sur por el municipio de Tibasosa en la coordenada norte 1.130.000, al oriente por el municipio de Santa Rosa de Viterbo en la coordenada este 1.125.000, y al occidente por el municipio de Paipa en la coordenada este 1.103.800. La ciudad de Duitama limita por el norte con el departamento de Santander, y los municipios de Charalá y Encino; por el sur con los municipios de Tibasosa y Paipa; por el oriente con los municipios de Santa Rosa de Viterbo y Belén; y por el occidente con el municipio de Paipa.

Geología municipal

Para este estudio se recopiló información en campo y en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi sobre geología histórica del municipio, estratigrafía general (urbana y rural), estratigrafía local, geología estructural y tectónica.

Hidrología área de estudio

Diversos análisis fueron conducidos hacia la caracterización estadística del agua superficial en la cuenca en estudio, con el ánimo de entender las fuentes de admisión o de recarga del acuífero que subyace sobre el municipio de Duitama. La escala de análisis parte desde niveles medios mensuales y se resumen a la escala media anual multianual. El estudio hidrológico general parte desde la identificación de los componentes geomorfológicos de la cuenca, la caracterización de variables físicas (por ejemplo, precipitación, temperatura, escorrentía superficial) y la construcción del modelo de balance hídrico. Partiendo de la información de las precipitaciones totales mensuales, de la evapotranspiración mensual estimada y la escorrentía media mensual, se construyó

el balance de agua en el suelo a lo largo del periodo de estudio. Dos de los métodos de balance fueron empleados en el presente estudio para los propósitos que anteriormente se describieron; estos son: el método directo y el modelo de Thomas. Con estos modelos se describe el comportamiento hidrológico de las cuencas del río Chiticuy y Surba, asimismo, se establecen las bases para el análisis hidrogeológico.

Modelo hidrogeológico

Para desarrollar el modelo hidrogeológico conceptual se hizo una caracterización hidrogeológica de las formaciones geológicas presentes en el área, se estableció su distribución lateral y en profundidad, se identificó su interrelación con los principales cuerpos de agua superficial y se evaluó la información hidrológica e hidrogeológica disponible.

Resultados y discusión

Geología estructural

Las rocas aflorantes en la zona de estudio pertenecen a la cordillera Oriental, la cual fue depositada en un miogeosinclinal con sedimentos que van desde el Paleozoico hasta depósitos recientes, a lo largo del cual se desarrollaron cuencas y subcuencas, cada una de las cuales tiene características definidas. Durante el Paleozoico, el mar ingresó dando origen a la formación Cuche, la cual fue interrumpida por la orogénesis paleoandina que al final del Pérmico e inicios del Triásico dio lugar a depósitos continentales de la formación Montebel y la Rusia, que fueron posteriormente levantadas y plegadas junto a los sedimentos del Cretáceo. En el Cretáceo hasta el Plioceno se sucedieron varias fases orogénicas que dieron origen a la Falla de Boyacá, que pone en contacto las formaciones de las cuencas Arcabuco, Villa de Leyva y Duitama, Tunja. En el Cretáceo, los sedimentos depositados después de un gran periodo de erosión, dan lugar a las formaciones Tibasosa y Belencito. Durante el Albiano Cenomaniano se depositó la formación Une. Luego de

transgresiones y regresiones, se depositaron las formaciones Churuvita y Conejo. En el Santoniano se dio la sedimentación de la formación Plaeners. Posterior a esta, se depositaron las areniscas de la formación Labor y Tierna indicando el retiro del mar, debido al continuo levantamiento del territorio, creando condiciones para la depositación de la formación Guaduas. En el Terciario, la sedimentación tiene lugar en cuencas heredadas del miogeosinclinal, que están en subsidencia. En el Oligoceno superior se inició la formación de la Cordillera Oriental, que duró probablemente hasta el Plioceno. Los materiales levantados se erosionaron rápidamente, y se acumularon en las depresiones de la región, en cuencas sedimentarias. Estos depósitos posandinos dieron lugar a cuaternarios mixtos tales como abanicos aluviales y depósitos fluvioalacustres.

Evolución tectónica

Con base en estudios realizados por Reyes (1984) y Escobar (1979), la secuencia estratigráfica en la región del Alto Chicamocha se divide en cinco conjuntos principales: basamento cristalino, serie del Paleozoico superior, serie molásica Mesozoica, serie Cretácico Terciaria y depósitos posandinos.

Estudio hidrológico

Climatología general

La cuenca del río Chiticuy se localiza a una altura media sobre el nivel del mar de 2.844 m y la cuenca del río Surba a una altura de 3.371 m. La clasificación climática se realizó aplicando el criterio de Thornthwaite, el cual establece dos índices para la precipitación y la temperatura efectiva. De acuerdo con lo anterior y a partir de la información climatológica disponible de registros históricos de precipitación y temperatura media anual multianual, se establece en la zona de estudio un clima húmedo ($PE = 92,1$) con una temperatura media anual de $15^{\circ}C$ y una precipitación media anual de 1.218 mm en la parte alta de las subcuencas Chiticuy y Surba, y de 879 mm hacia la parte baja de estas subcuencas.

Entre otras variables climáticas, la humedad relativa adopta un valor medio mensual de 78,3%, el número de total de horas de brillo solar anual es de 1.802 con un promedio mensual de 152. La presión de vapor del aire húmedo es de 12,8 Mb. La velocidad media del viento es de 1,9 m/s para un recorrido del viento en 24 horas de 160 km.

Modelo hidrológico

Los modelos hidroclimatológicos describen la interacción entre la superficie terrestre y los procesos atmosféricos

a diferentes escalas espaciales y temporales. El modelo hidroclimatológico más simple, el cual ha sido validado en diferentes escalas temporales y espaciales, es la forma agregada de la ecuación de continuidad aplicada a una cuenca hidrográfica. (Sankarasubramanian y Vogel, 2002).

Método directo de balance hídrico

Los resultados que se presentan, dan a conocer una fuerte disparidad climática entre los sectores, infiriéndose que la parte baja de las cuencas de estudio se ve afectada por mayores temperaturas que traen como efecto, mayor evapotranspiración, superando los niveles observados en la parte alta de las subcuencas, en más de 100 mm. Para efectos de aplicación de los modelos de balance, se adoptan los valores producidos por la estación Andalucía (2403535), por su cercanía a las estaciones hidrométricas empleadas en el estudio. De los resultados que se derivan de la aplicación del método directo del modelo de balance, se puede distinguir que la cuenca del río Chiticuy posee potencialmente gran capacidad de almacenamiento o retención de flujo por detenciones temporales (*i. e.* por almacenamiento en depresiones y por infiltración efectiva), tal condición puede evidenciarse por la mayor magnitud de área de cuenca (respecto a la cuenca del río Surba) y sus bajos caudales que drenan hacia la estación hidrométrica Chiticuy (2403727). Estos valores preliminares estimados son cuantías puntuales para la estación climatológica Andalucía (2403535), la cual se ha valorado como representativa del sector de estudio, dado su cercanía a los centroides de cada una de las subcuencas de análisis.

Modelo de balance de Thomas

El modelo "abcd" es un modelo de cuenca no lineal el cual acepta la precipitación y la evapotranspiración potencial como entradas de modelo, produciendo la magnitud del flujo en la corriente hídrica de estudio. Internamente el modelo también representa la humedad almacenada en el suelo, el almacenamiento subterráneo, la escorrentía superficial, las descargas de flujo procedente de acuíferos a las corrientes y la evapotranspiración actual. Este modelo originalmente introducido por Thomas (1981) y Thomas *et al.* (1983), es una adecuada estructura matemática que permite evaluar el rendimiento regional del recurso hídrico empleando una escala temporal mensual. Este modelo ha sido sometido a diversas comparaciones con modelos mensuales de balance hídrico, llevando los resultados a distinguirse por su estructura no lineal de respuesta hidrológica. Dada la discontinuidad en los registros hidrométricos en el periodo de estudio, el procedimiento de calibración se ha realizado con dos series de datos definidos por diferentes intervalos de tiempo. Para la

cuenca del río Chiticuy el primer escenario de calibración se define en el horizonte temporal que parte desde enero de 1999 a diciembre de 2001, y el segundo escenario desde enero de 2003 a diciembre de 2005. Para la cuenca del río Surba, el primer escenario de calibración se define en el horizonte temporal que parte desde enero de 1997 a diciembre de 2001, y el segundo escenario desde enero de 2003 a diciembre de 2005. Los resultados de la modelación son moderadamente aceptables en su generalidad. El parámetro “a” del modelo de Thomas indica la alta susceptibilidad de la cuenca a procesos de escorrentía, que deberá entenderse en función de las características geomorfológicas de la cuenca y la cobertura vegetal que impide el desarrollo de procesos de infiltración. Como se expuso anteriormente, la cuenca del río Chiticuy guarda un alto grado de detención temporal del agua superficial, que evidentemente se indica en el parámetro “b” de Thomas, valor representativo de la capacidad de la cuenca para mantener agua dentro del horizonte superior del suelo (*i. e.* en la zona no saturada). Para la cuenca del río Chiticuy el parámetro “b” adopta un valor de 800 mm, mientras que para la cuenca del río Surba, un valor de 400 mm. El parámetro “c” identifica la proporción de los aportes de agua subterránea hacia la escorrentía superficial, el cual se establece en 0,56 para la cuenca del río Chiticuy y en 0,36 para la cuenca del río Surba. El parámetro “d” muestra que los tiempos de residencia del agua subterránea en la cuenca son muy altos, lo que conduce a pensar que existe un aporte de flujo muy lento de agua subterránea hacia la corriente principal.

Modelo hidrogeológico conceptual

Para desarrollar el modelo hidrogeológico conceptual se hizo una caracterización hidrogeológica de las formaciones geológicas presentes en el área, se estableció su distribución lateral y en profundidad, se identificó su interrelación con los principales cuerpos de agua superficial, se evaluó la información hidrológica e hidrogeológica disponible.

Caracterización hidrogeológica de las rocas

A partir de la información geológica, presentada en el estudio (geología), se hizo una caracterización de las formaciones geológicas existentes en la zona de estudio (desde el punto de vista de su capacidad para almacenar y permitir el flujo de agua subterránea), con el fin de identificar la presencia de acuíferos y diferenciarlos de las rocas impermeables.

Principales acuíferos

Los principales acuíferos presentes en el área de estudio están representados por las siguientes formaciones; formación Cuche (Cc), formación Montebel (Jim), formación

La Rusia (Jru), formación Tibasosa (Kit), formación Une (Kv2), formación Conejo (Kscn), formación Plaeners (Kg2), formación Labor y Tierna (Kg1), formación Guaduas (Ktg), depósitos aluviales (Qa), depósito fluvioacustre (Qpl).

Acuitardos

Las formaciones que almacenan agua pero no permiten flujo de ella en cantidades significativas, identificadas en la cuenca como acuitardos, son las siguientes: formación Conejo (Kscn), formación Plaeners (Kg2), formación Guaduas (Ktg).

Acuífugas

Son rocas que, por no poseer espacios intergranulares, no almacenan ni permiten el flujo de agua; no se identificaron formaciones que en su totalidad puedan clasificarse como acuífugas ya que aunque existen las rocas compactas y bien cementadas, en algunos sectores se hallan fracturadas y pueden constituir acuíferos de porosidad secundaria.

Infiltración y recarga

Con el fin de caracterizar la infiltración y recarga del acuífero actualmente bajo explotación se aprovechó la información relacionada con las características geológicas y el balance hídrico.

Características geológicas

Las zonas de recarga coinciden con las zonas de afloramiento de los acuíferos identificadas y delimitadas; gran parte de la cuenca está cubierta por acuíferos de porosidad secundaria por lo que la infiltración no es homogénea y está limitada por la presencia de niveles arcillosos impermeables (acuitardos), lo cual impide la infiltración y recarga hacia los acuíferos que se hallan en profundidad. El área de afloramiento del acuífero principal, actualmente bajo explotación (depósitos fluvioacustres Qpl), no es muy favorable para la infiltración y recarga directa del acuífero, dado que en la mayor parte de la región se encuentra integrada por arcillas que tienen un espesor del orden de 20 m, por lo cual el acuífero subyacente se halla confinado por materiales impermeables. La recarga de este acuífero se debe producir lateralmente a partir del río Chiticuy o de otros cauces superficiales que se hallan en continuidad hidráulica con las gravas y arenas del acuífero principal (Qpl).

Balance hídrico

La infiltración y recarga para la cuenca del río Chiticuy, en la cual se halla casi en la totalidad de los pozos profundos que poseen concesión, es del orden de 33,84 m³/año.

Cuantificación de la recarga actual

El cálculo de la infiltración efectiva obtenido del balance hídrico permite calcular que el volumen anual de recarga hacia el principal acuífero captado en la actualidad, por los pozos que extraen agua de los depósitos cuaternarios fluvio-lacustres (Qpl), en la cuenca del río Chiticuy, es del orden de $33,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ anuales.

Espesor y profundidad del acuífero

El espesor del acuífero principal varía ampliamente pero se considera que tiene un promedio de 100 m. De este espesor promedio que está integrado por un sello superior impermeable (de arcillas), de 20 m de espesor, gravas y arenas con intercalaciones arcillosas; se puede promediar un espesor neto del acuífero (gravas y arenas), del orden de 50 m.

Reservas

El cálculo de reservas de agua subterránea para el municipio de Duitama se hizo teniendo en cuenta el espesor, el área y la porosidad efectiva del acuífero. Los valores obtenidos se resumen a continuación: volumen de reservas del Cacho = $R_s = \text{área} \times \text{espesor} \times \text{porosidad efectiva}$. No se tienen valores de porosidad efectiva medidas en campo, en la cuenca. Para el cálculo se toman valores mínimos dados en la literatura para gravas y arenas (material no consolidado), del orden del 10%, el volumen de reservas del acuífero principal (Qpl) = $90 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Descarga del acuífero

La principal descarga del acuífero ocurre a través de los pozos profundos que actualmente extraen agua subterránea de la cuenca. La posible salida de agua subterránea a través de las formaciones en profundidad hacia zonas adyacentes se considera despreciable debido a la estructura geológica de la cuenca, según la cual los acuíferos se profundizan en dirección occidental, por lo cual no tienen zona de afluencia; la descarga actual del acuífero es de $9,59 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$.

Rendimiento seguro de los acuíferos en explotación

A partir de los análisis realizados con base en los balances hídricos (de explotación y de recarga) se puede inferir que el volumen de explotación anual es menor que la recarga, de acuerdo con los valores presentados, es del orden de $33,84 \text{ m}^3/\text{año}$. Según estas cifras se calcula el “rendimiento seguro”, entendido como el volumen de agua que puede ser extraído del acuífero sin generar condiciones indeseables que lo puedan afectar como fuente sostenible de abastecimiento de agua, el rendimiento seguro para los niveles acuíferos ac-

tualmente bajo explotación correspondería entonces, para la cuenca del río Chiticuy, al volumen que se recarga anualmente $33,84 \text{ m}^3/\text{año}$.

Recursos de agua subterránea del municipio de Duitama

El acuífero más importante, actualmente bajo explotación, en la cuenca del río Chiticuy corresponde a los depósitos fluvio-lacustres (Qpl), a mayor profundidad se encuentran las formaciones identificadas como acuíferos de porosidad secundaria, que poseen importantes reservas y las áreas de recarga son más grandes que las del acuífero que se capta en la actualidad. Sin embargo, su porosidad efectiva es desconocida, así como sus parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento). Los estudios realizados en los acuíferos de porosidad secundaria son muy escasos y, por lo tanto, se hace necesario realizar una evaluación hidrogeológica detallada que permita establecer las posibilidades de los acuíferos de porosidad secundaria, como fuente de agua potable para la ciudad de Duitama.

Cálculo del índice de escasez para agua subterránea (Ies)

Para calcular el índice de escasez para el agua subterránea se aplicó la metodología establecida por el MAVDT, en la Resolución 872 del 12 de mayo del 2006, $I_{es} = \text{caudal captado}/\text{caudal explotable}$, $I_{es} = 0,28$, que expresado en porcentaje sería el 28%; de acuerdo con la escala de valoración dada por el Ideam (1988), para las diferentes categorías del índice de escasez, la presión sobre el recurso de aguas subterráneas es media. Ello indica que es urgente reordenar la demanda y la oferta para prevenir futuras crisis en el suministro de agua potable para la ciudad de Duitama. Ello se puede hacer con una gestión integral del recurso, aplicando estrategias de protección de la oferta o de expansión de esta, aprovechando otros acuíferos que se hallen en el área.

Plan de monitoreo y seguimiento

El monitoreo y seguimiento del acuífero debe iniciarse de inmediato y debe cumplir con los siguientes parámetros mínimos, niveles estáticos y dinámicos, mínimo una vez al mes, en todos y cada uno de los pozos existentes, caudales de explotación. Debe obtenerse un registro continuo de caudales en todos y cada uno de los pozos; muestreo para análisis físico-químico, mínimo una vez al año; muestreo para análisis isotópico; deben tomarse muestras mensuales en todos y cada uno de los pozos y de agua lluvia de la cuenca del río Chiticuy y de cuencas aledañas (río Surba), durante un año; el muestreo debe hacerse con criterio técnico y científico y deben ordenarse análisis de oxígeno 18 y de hidrógeno -2.

Conclusiones y recomendaciones

Se espera un progresivo crecimiento de los niveles de almacenamiento de agua superficial si persisten los efectos de variabilidad climática tipo ENSO en su fase húmeda.

El principal acuífero que se halla bajo explotación en la actualidad corresponde a los niveles de arenas y gravas de los depósitos fluviolacustres (Qpl) aprovechados por la mayoría de los pozos profundos, que actualmente extraen agua subterránea en el municipio de Duitama. Existen otros acuíferos susceptibles de aprovechamiento, en varias de las formaciones que poseen porosidad secundaria, destacándose por su gran extensión y zona de recarga el acuífero de la formación La Rusia.

El balance hídrico lleva a la conclusión de que la recarga es del orden de 33,8 x 10⁶ m³ anuales. El índice de escasez calculado señala que existe una presión media sobre los recursos de agua subterránea. Por lo tanto, es necesario reordenar la demanda y la oferta para prevenir futuras crisis en el suministro de agua potable para la ciudad de Duitama.

La formación La Rusia constituye un acuífero de importancia hidrogeológica. En la actualidad no se está aprovechando dado que, hasta el momento, no se ha considerado como tal. Este acuífero debe ser materia de evaluación, ya que puede constituir una fuente importante de aguas subterráneas para cubrir las futuras necesidades de la ciudad.

Referencias

- Botero R. (1946). *Yacimiento de plomo de coromoro*.
- Chow, Ven T., Maidment, David R. y Mays. Larry W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw Hill. Bogotá. 584 pp.
- Escobar, P. (1979). *Estudio de amenaza y microzonificación sísmica, vulnerabilidad estructural y evaluación de escenarios de daño*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). *Atlas climatológico nacional. Distribución espacio-temporal de las variables del clima*.
- Reyes. (1984). *Generalidades históricas, localización, extensión y división política, dimensión ambiental*; tomo I.
- Reyes, I. (1982). *Características petrográficas y geoquímicas de las rocas*.
- Sankarasubramanian y Vogel. (2002). *Climate elasticity of stream flow in the United States*.
- Thomas, H. A. (1982). Improved Methods for National Water Assessment. Report, Contract WR 15249270, US Water Resources Council, Washington D.C. USA.
- Thomas, H. A., Marin, C. M., Brown, M.J. y Fiering, M. B. (1983). *Methodology for Water Resources Assessment*. Report NTIS 84-124163, US Geological Survey, National. Springfield, Virginia, USA.
- Trumphy. (1943). *Pre-cretaceous of Colombia*, vol. 54.
- Vogel, R. M. & Kroll, C.N. (2002). Regional Geohydrologic-geomorphic relationships for estimation of low-flow statistics. *Water Resources Res.* 28(9), 1992, 2451-2458.

Aplicaciones de la inteligencia artificial para el cálculo de los indicadores de calidad del agua

Juniel Almeida, Julio Ferrer, Mario Castro, Daissy Díaz*
Universidad Cooperativa de Colombia

Resumen

En este artículo se esboza la posibilidad de utilizar algunas técnicas de inteligencia artificial aplicables al cálculo de los indicadores de calidad del agua y a la gestión del recurso hídrico mediante el diseño y construcción de soluciones computacionales de bajo costo.

Las alternativas propuestas forman parte de los resultados del proyecto de investigación “Variables de mayor impacto sobre los indicadores de calidad del agua”, formulado por integrantes del grupo de investigación Inteligencias Artificial y Computación Adaptativa (IACA) de la Universidad Cooperativa de Colombia, con el propósito de ofrecer soluciones viables en campos de alto impacto social.

Al describir la posible aplicación de diversa técnicas de la inteligencia artificial para la gestión del recurso hídrico surgen múltiples alternativas para el desarrollo de *software* relacionado con un recurso de vital importancia a nivel global.

Palabras clave: inteligencia artificial, calidad del agua, *software*, indicadores de calidad.

* juniel.almeida@campusucc.edu.co, julio.ferrer@campusucc.edu.co,
mariof.castro@campusucc.edu.co, daissymdiaz@gmail.com

Introducción

A lo largo de la historia, el hombre se ha preocupado por reproducir su entorno con la máxima fidelidad posible, desde los primeros grabados sobre piedra pasando por diferentes tipos de escultura, producción de herramientas de trabajo, objetos ornamentales y lúdicos hasta desembocar en la construcción de modernos androides cada vez más parecidos, en aspecto y desempeño, al ser humano. Durante este proceso se ha tratado de incorporar en los artefactos atributos como la capacidad de trabajo y aprendizaje autónomo, adaptación al entorno y búsqueda de soluciones a situaciones novedosas, aspectos que se relacionan con la capacidad conocida como inteligencia. El notable avance de la ciencia y la tecnología ha propiciado el desarrollo de la llamada inteligencia artificial (IA), cuyas aplicaciones permean prácticamente todas las actividades de la sociedad [1].

El impacto de las aplicaciones de la IA en la sociedad es inobjetable, incluso existe una gran cantidad de máquinas, tangibles y virtuales, que presentan elementos de inteligencia artificial sin ni siquiera hacer mención a ello. “Mucha IA se ha filtrado en aplicaciones generales, comúnmente sin ser llamadas IA porque una vez que algo se vuelve suficientemente útil y común deja de ser considerado IA” [2].

En este caso se propone el uso de determinadas técnicas de IA en el diseño y construcción de aplicaciones relacionadas con la gestión del recurso hídrico y particularmente con el cálculo de indicadores de calidad del agua.

Específicamente se abordan los sistemas basados en conocimiento (SBC), los algoritmos genéticos (AG) y las redes neuronales artificiales (RNA).

La gestión del recurso hídrico y el cálculo del ICA

La gestión del recurso hídrico se realiza generalmente a través de las autoridades ambientales de cada país o región. En el caso de Colombia esta responsabilidad la ejerce el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) con el apoyo de las Corporaciones Autónomas Regionales.

Para cumplir con este propósito se cuenta con el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH) que integra y estandariza el acopio, registro, manejo y consulta de datos, bases de datos, estadísticas, modelos, información documental y bibliográfica, reglamentos y protocolos que facilitan la gestión integral del recurso hídrico. (Decreto 1323, 2007) [3]. Las Corporaciones Autónomas Regionales deben brindar Información que alimente de forma continua este sistema.

Este trabajo se realiza de forma “tradicional” sin aprovechar las oportunidades que ofrecen las tecnologías de la información y las comunicaciones. Las corporaciones brindan reportes periódicos al sistema; la forma artesanal de recopilar y compartir la información impide su gestión inteligente y afecta los procesos relacionados con la oportuna toma de decisiones.

Por otro lado, el índice de calidad del agua (ICA) es una herramienta matemática para evaluar la calidad que permite transformar grandes cantidades de datos sobre la calidad del agua en una escala de medición única. La calidad del agua se puede clasificar como excelente, buena, pobre, muy pobre y no apta en función del valor ICA [4].

Sin embargo, dependiendo de la metodología utilizada, este cálculo puede reflejar términos de “calidad” que en muchas ocasiones no están directamente relacionados con el uso para el cual se dispone el recurso, por lo que en este aspecto, el tratamiento “inteligente” para este indicador sería un aporte destacado a la hora de utilizar de forma práctica un resultado concreto de la medición.

Algoritmos genéticos

Una explicación sencilla de qué es un algoritmo genético (AG) sería el intento de imitar la evolución desde el punto de vista biológico a la hora de resolver problemas. Si nos enfrentamos a un problema específico como el cálculo del ICA teniendo en cuenta el uso que se le dará al agua, la entrada del AG sería un conjunto de soluciones potenciales codificadas, de alguna manera, y una función de aptitud o evaluación (función *fitness*) para determinar de forma cuantitativa la calidad de esta respuesta. [5]

Luego el AG debe evaluar cada solución candidata de acuerdo con la función *fitness*. Las soluciones menos acertadas serán eliminadas del proceso y las mejores serán “recombinadas” con otras en busca de nuevos y mejores resultados. El proceso es iterativo y se generan sucesivas “generaciones” de soluciones las cuales deben converger hacia una solución óptima.

Aunque el proceso puede parecer complejo, los algoritmos genéticos han demostrado ser una estrategia muy poderosa y exitosa para resolver problemas cuya solución es difícil de obtener por métodos tradicionales. Esta técnica

podría introducir resultados muy interesantes en el cálculo del ICA teniendo como insumo la evaluación de la calidad del agua en diferentes puntos de monitoreo, sumada a la valoración de expertos que incluyeran en su opinión los determinados usos que se le pudiera dar al recurso.

El *software* obtenido como resultado del proyecto de investigación citado anteriormente, permite generar una serie de soluciones específicas para cada punto de monitoreo, atendiendo a las características de la zona, uso y demás elementos que se quieran incluir para el cálculo; de esta manera el producto ofrece las funcionalidades necesarias para determinar la función de adaptación de un algoritmo genético potente y versátil en una etapa posterior de la investigación.

La implementación de un AG aportaría ventajas tales como la posibilidad de evaluar implícitamente muchos esquemas a la vez (el procesamiento de un AG es intrínsecamente paralelo) y su habilidad para manipular muchos parámetros simultáneamente, sin embargo se deben valorar algunas desventajas que se derivan de su uso, como la complejidad para definir la función *fitness* y el tiempo de procesamiento que por lo general es mayor que el de un algoritmo tradicional. [6]

Aquí es necesario resaltar que el *software* desarrollado elimina la primera desventaja al proporcionar un módulo que permite calcular el ICA de acuerdo con diferentes requerimientos.

Redes neuronales artificiales

La posibilidad de “aprendizaje” de una RNA es el aspecto fundamental que se puede aprovechar para llegar al objetivo de calcular indicadores de calidad del agua para la gestión del recurso hídrico de forma más general. Las RNA pueden ser muy útiles para la generación de reportes que puedan adaptarse a unos objetivos específicos bien definidos y que se puedan generar de forma dinámica e “inteligente” a partir de reportes históricos solicitados por las entidades competentes.

El módulo de generación de reportes y el módulo de captación y almacenamiento de datos del *software* desarrollado, ofrecen la posibilidad de implementar una nueva versión basada en el funcionamiento de una RNA con relativa facilidad.

Sistemas basados en conocimiento (SBC)

Uno de los bienes mejor valuados es el conocimiento humano, más aún el conocimiento experto. En la actualidad existe la posibilidad de crear sistemas que capturan ese co-

nocimiento y que simulan el razonamiento humano en áreas específicas. Los sistemas basados en conocimientos (SBC) realizan estas tareas; cuando se trata de conocimiento experto a estos programas se le denominan sistemas expertos (SE).

Un sistema basado en conocimiento (SBC) es una aplicación que intenta simular el comportamiento de un experto humano en una determinada área de desempeño. El objetivo del desarrollo de sistemas de este tipo no es el de sustituir al propio experto sino servir de ayuda a este o liberarle de algunas tareas repetitivas.

El poder de los SBC es el conocimiento de un dominio específico codificado por un especialista en inteligencia artificial que se suele llamar “ingeniero del conocimiento”.

El área del conocimiento intelectual humano para ser capturado en un sistema experto se llama el dominio de la tarea. La tarea se refiere a una cierta meta orientada a solucionar el problema. El dominio se refiere al área dentro de la cual se está realizando la tarea [7].

El ingeniero del conocimiento debe cerciorarse de que el sistema tenga todo el conocimiento necesario para solucionar un problema específico. También debe elegir una o más formas en las cuales representar el conocimiento requerido. Asimismo, asegurarse que se pueda utilizar eficientemente este conocimiento.

Para que un sistema experto sea una herramienta efectiva, se debe poder interactuar con él de una forma fácil, brindar la manera de explicar sus razonamientos o base del conocimiento y ser capaz de adquirir nuevos conocimientos e integrarlos a la base del conocimiento del sistema.

Los SBC se aplican, por lo general, en problemas que implican procedimientos basados en heurística, es decir un procedimiento de solución que utiliza estructuras que contienen conocimiento y experiencia de los expertos humanos, deducción lógica de conclusiones, capacidad de interpretar información ambigua y manipulación del conocimiento afectado por datos de poca fiabilidad y eventos probabilísticos.

El *software* generado a partir del proyecto de investigación “Variables de mayor impacto sobre los indicadores de calidad del agua”, en su primera versión, incluye algunos elementos de esta estructura, pero su diseño modular facilita la incorporación de nuevas funcionalidades para implementar técnicas como las que se describen a continuación.

Resultados esperados

En una primera etapa del proyecto “Variables de mayor impacto sobre los Indicadores de Calidad del Agua” se obtiene

un *software* que facilita la gestión del recurso hídrico: almacena información de forma estructurada, genera informes, calcula indicadores de Calidad. El *software* se diseñó de forma que la incorporación de los diferentes elementos de un SBC se puede llevar a cabo con relativa facilidad respondiendo a un modelo de prototipo incremental.

Referencias

- [1] Ferrer, Julio. Almeida, Juniel. Tutores inteligentes, una aplicación de la inteligencia artificial. *Revista Elipse*. 2013.
- [2] AI set to exceed human brain power CNN.com. Recuperado el 26 de julio de 2006.
- [3] Varios autores, Evolución de los indicadores de calidad del agua. *Revista Ingeniería Solidaria*. 2015.
- [4] Sharma, S. & Chhipa, R. C. (2012). Evaluación and Optimization of Water Quality Index for Ground Water Source of North West Jaipur and Agglomerates. *International Journal of Chemical Sciences*, 10(4), 2297 - 2305.
- [5] Adaptive Learning: Fly the Brainy Skies. *Wired*, v. 10, n. 3, marzo de 2002.
- [6] Mitchell, Melanie. *An Introduction to Genetic Algorithms*. MIT Press, 1996.
- [7] Joseph C. Giarratano & Gary D. Riley: Expert Systems: Principles and Programming, Thomson, 4.^a ed., 2005.

Revisión del estado del arte de los efectos ambientales de la estimulación hidráulica (*fracking*)

Sharel Charry-Ocampo (S. Charry-Ocampo)

Resumen

El gran avance tecnológico en los procesos de estimulación hidráulica y la perforación direccionada han hecho viable la extracción del gas de la roca de lutita encontrada en la corteza terrestre. Sin embargo, a pesar de los grandes beneficios que ha generado esta práctica en términos de seguridad energética, se han vinculado muchos de sus procesos principales a perturbaciones ambientales en diferentes lugares del mundo. En este trabajo, se presenta una revisión bibliográfica del estado del arte de los efectos sobre el ambiente de la extracción de gas no convencional. En particular, se analizan, a la luz de las investigaciones que se han realizado a nivel mundial y regional, las diferentes problemáticas reportadas en la literatura durante los procesos de exploración y explotación de gas de lutita, con un énfasis especial en los impactos ambientales de la estimulación hidráulica (*fracking*). A partir de la revisión realizada se hacen una serie de recomendaciones de áreas de investigación y de acciones encaminadas a enfrentar los retos ambientales que se presentan en el contexto colombiano de cara a la puesta en marcha de proyectos de explotación de gas de lutita.

Palabras clave: estimulación hidráulica (*fracking*), recurso hídrico, efectos ambientales.

Introducción

El mejoramiento de los estándares de vida ha traído consigo el incremento de la demanda energética. Esta demanda ha sido enmendada principalmente con energía proveniente de recursos energéticos no renovables como los hidrocarburos. A su vez se han producido inevitables perturbaciones ambientales que han derivado en contaminación.

A mediados de los años cuarenta en Estados Unidos se empezaron a agotar los recursos energéticos no renovables, esto produjo una crisis de carácter energético que creó la necesidad de investigar e implementar otras alternativas para la obtención de hidrocarburos. Como consecuencia de las investigaciones se descubrieron altos volúmenes de hidrocarburos en yacimientos no convencionales, de los cuales el más común fue el gas natural generado en las rocas sedimentarias lutitas conocido como *shale gas*.

El presente artículo expone una revisión bibliográfica realizada a documentos científicos, relacionados con los efectos ambientales la explotación de *shale gas* por estimulación hidráulica (*fracking*).

Metodología

Como propósito de este trabajo se realizó una revisión sistemática del estado del arte de los efectos ambientales de la estimulación hidráulica que incluye las siguientes etapas:

- Búsqueda e identificación de artículos por palabras claves.
- Clasificación de la información.
- Análisis y catalogación del material bibliográfico.

Generalidades

Las *shales* son las rocas más abundantes en la corteza terrestre, son rocas sedimentarias compuestas de partículas de arcilla consolidadas (Arthur *et al.*, 2008), generadas como consecuencia de la deposición lenta y continua de sedimentos principalmente marinos, encontradas a cientos de miles de metros debajo de la superficie de la tierra (Eaton, 2013). Contienen aproximadamente un 95% de materia orgánica, además absorben y liberan gran cantidad de humedad (Ybáñez, 2012). En estas formaciones geológicas se encuentra contenido gas natural seco conocido comúnmente como *shale gas* (Arthur *et al.*, 2008). Este se forma cuando los materiales orgánicos en los depósitos de esquisto se degradan bajo condiciones anóxicas (Kargbo, Wilhelm y Campbell, 2010). El *shale gas* es una mezcla natural de gases orgánicos, principalmente de metano y menores proporciones de dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, radón radiactivo, propano y otros gases.

Este gas se caracteriza por ser de tipo termogénico y por encontrarse entre los espacios de los poros de la roca, dentro de las fracturas naturales o en la materia orgánica dentro del esquisto (Arthur, Bohm y Layne, 2009), es decir, en sedimentos de baja y muy baja permeabilidad.

Los yacimientos de gas de esquisto son considerados no convencionales debido a la poca factibilidad económica de su explotación ya que esta implica la estimulación de la roca donde se encuentra inmerso el recurso (Groat y Grimshaw, 2012).

En los yacimientos convencionales se pueden diferenciar claramente la fuente, el depósito y la trampa ya que son independientes; por el contrario, en los depósitos no convencionales estos se encuentran combinados en una sola zona discreta. La fuente se refiere a las rocas ricas en materia orgánica que bajo condiciones de alta temperatura y presión generan gas, el depósito es la roca donde se almacena el gas; esta posee suficiente porosidad para transmitir el fluido y la trampa es la roca impermeable que restringe el movimiento de hidrocarburos (Caputo, 2011).

Este hecho conlleva a algunas diferencias en la explotación: en el caso de los yacimientos convencionales la explotación se hace directa, mientras que en el caso de los no convencionales se requiere estimulación posperforación (Caputo, 2011).

Los problemas más notorios asociados al *fracking* son los relacionados con los efectos ambientales que se producen en cada etapa del proceso como se describe a continuación:

Efectos ambientales en etapas del proceso de extracción de gas lutita

Exploración.

Las explosiones sísmicas usadas típicamente durante las fases de exploración pueden producir fracturación en la roca conectando acuíferos locales con acuíferos regionales que se encontraban previamente desconectados (Jenner y Lama-drid, 2013). También por la conexión entre aguas subterráneas y superficiales se puede afectar las aguas superficiales como arroyos, humedales y áreas ribereñas.

Por otra parte, si los agujeros perforados para las mediciones sísmicas no son apropiadamente sellados pueden convertirse en caminos preferenciales para el transporte de contaminantes (Jenner y Lamadrid, 2013). Finalmente, las explosiones son asociadas a movimientos del suelo que podrían contribuir a acelerar procesos de remoción en masa a nivel local y regional.

Construcción.

En la construcción de la densa infraestructura se pueden producir efectos ambientales relacionados con la alteración del paisaje en extensas áreas. Particularmente, se pueden presentar cambios en la cobertura del suelo y transformaciones morfológicas que desequilibran la recarga de aguas subterráneas, los regímenes de flujo superficial, los patrones de drenaje, las tasas de escorrentía y la calidad del recurso hídrico (Soeder *et al.*, 2014), (Belvalkar y Oyewole, 2010), (Peduzzi y Harding Rohr Reis, 2013) (Jenner y Lamadrid, 2013). Adicionalmente, con respecto al suelo, en algunas ocasiones las actividades no respetan los lineamientos dados de las políticas de planeación en lo referente a uso del suelo (Guarnone *et al.*, 2012), (Blohm *et al.*, 2012).

En general, se han observado casos severos de erosión durante las fases de construcción de la infraestructura debido a la falta de control y disposición adecuada de los sedimentos que son transportados a cuerpos de agua, amenazando el proceso normal de la escorrentía durante las precipitaciones y afectando las dinámicas morfológicas (Brantley *et al.*, 2014), (Peduzzi y Harding Rohr Reis, 2013), (Ybáñez y Vivas, 2010), (Lechtenböhrmer *et al.*, 2011), (Groat y Grimshaw, 2012).

La construcción en áreas de protección afecta directamente a los hábitats naturales de los ecosistemas y especies autóctonas, amenaza la pérdida de biodiversidad biológica y cuando se involucra el recurso hídrico las poblaciones acuáticas también son repercutidas (Brantley *et al.*, 2014), (Peduzzi y Harding Rohr Reis, 2013), (Soeder *et al.*, 2014), (Jenner y Lamadrid, 2013), (Guarnone *et al.*, 2012), (Vidic, Brantley, Vandebossche, Yoxtheimer y Abad, 2013a). En particular, la necesidad de despejar el área escogida para la extracción de *shale gas*, afectan directamente la riqueza forestal ya que la vegetación *arbórea, arbustiva y herbácea* es removida (Haluszczak, Rose y Kump, 2013), (Groat y Grimshaw, 2012).

Además de ocasionar compactación del suelo, el tráfico del gran número de vehículos pesados aumenta las concentraciones de gases en la atmosfera deteriorando tanto la calidad del aire como el clima (Kovats *et al.*, 2013), (Soeder *et al.*, 2014), (McKenzie *et al.*, 2012), (Guarnone *et al.*, 2012), (Lechtenböhrmer *et al.*, 2011).

Perforación.

En la fase de perforación se pueden presentar riesgos asociados a la calidad y alteración de las condiciones hidrológicas de los acuíferos de agua dulce, cuando se perfora a través de ellos (Soeder *et al.*, 2014), (Ratner y Tiemann, 2014). También pueden ocurrir vertimientos accidentales de contaminantes o del lodo de perforación que pueden afectar la calidad del recurso hídrico (Warner *et al.*, 2013), (Brantley *et al.*, 2014), (Lechtenböhrmer *et al.*, 2011).

Adicionalmente, la cementación defectuosa de la carcasa de revestimiento o problemas de integridad de esta puede derivar en la migración de gas metano termogénico a los suministros de agua. La integridad de la carcasa se puede ver comprometida también cuando en las formaciones se encuentra gas a altas presiones y cuando la presión hidrostática de la columna de cemento es más alta que la presión de la formación. Además, si el lodo de perforación no se limpia adecuadamente se crean canales por los que pueden aparecer migraciones. Esta situación puede presentarse durante todo el ciclo de vida del pozo y puede agravarse por las pulsaciones y vibraciones durante el proceso de perforación (Vidic *et al.*, 2013a) (Soeder *et al.*, 2014), (Kargbo *et al.*, 2010), (Groat y Grimshaw, 2012), (Brantley *et al.*, 2014), (Ratner y Tiemann, 2014), (Jenner y Lamadrid, 2013), (Howarth, Santoro, y Ingraffea, 2011), (Lechtenböhrmer *et al.*, 2011), (Myers, 2012). Por otra parte, las fugas de metano en la perforación pueden generar explosiones imprevistas en el subsuelo (Groat y Grimshaw, 2012).

Otros efectos importantes por mencionar son los efectos sobre la salud humana debido al manejo inadecuado de los recortes de perforación puesto que la roca perforada contiene compuestos radiactivos y metales tóxicos naturales (Eaton, 2013), (Soeder *et al.*, 2014), (Brantley *et al.*, 2014). Adicionalmente, los recortes de perforación son una fuente de salmuera que pueden comprometer la calidad de los recursos hídricos debido a su composición tóxica (Brantley *et al.*, 2014), (Vengosh, Warner, Jackson y Darrah, 2013).

La contaminación acústica en el *fracking* es asociada a la perforación como consecuencia de las vibraciones mientras se atraviesa el subsuelo y el ruido correspondiente al tráfico vehicular (Peduzzi y Harding Rohr Reis, 2013), (Lechtenböhrmer *et al.*, 2011).

Fracturación.

El uso del recurso hídrico es uno de los aspectos más debatidos del *fracking* (Matesanz Caparroz, 2013). Las elevadas necesidades de volúmenes de agua para fracturar son subsanadas con caudales de arroyos, lagos, ríos y fuentes subterráneas. Esto trae como consecuencias la reducción del caudal

estacional, la degradación en la calidad del agua regional y la reducción del nivel freático (Vidic *et al.*, 2013a), (Jenner y Lamadrid, 2013), (Soeder y Kappel, 2009), (Soeder *et al.*, 2014), (Eaton, 2013), (Guarnone *et al.*, 2012), (Ybáñez y Vivas, 2010), (Barnes *et al.*, 2002), (Soeder *et al.*, 2014), (Ratner y Tiemann, 2014), además genera conflictos ligados a la competencia del recurso como la agricultura, ganadería y suministro de agua potable (Peduzzi y Harding Rohr Reis, 2013), (Ratner y Tiemann, 2014).

Algunos autores afirman que se deben mantener caudales mínimos en los cuerpos hídricos superficiales para garantizar la biota acuática (Soeder *et al.*, 2014), (Ratner y Tiemann, 2014), y así minimizar los impactos a largo plazo sobre los entornos ecológicos (Brantley *et al.*, 2014).

El proceso de fracturación puede liberar directamente a la atmosfera cantidades sustanciales de metano y de otros contaminantes (Ratner y Tiemann, 2014).

Otra preocupación de la etapa de fracturación surge de la posibilidad de que una fractura hidráulica se conecte con la superficie debido a la propagación de fracturas inducidas por fuera de la zona del *shale* (Groat y Grimshaw, 2012), (Refunjol *et al.*, 2011), (Vengosh *et al.*, 2013). Por ejemplo, puede ocurrir que una fractura hidráulica intercepte y active una fractura natural o una falla geológica, creando vías hidrodinámicas conductoras de los compuestos del fluido de *fracking* a acuíferos poco profundos conectados a la red doméstica del suministro de agua potable (Myers, 2012), (Refunjol *et al.*, 2011), (Groat y Grimshaw, 2012), (Warner *et al.*, 2012), (Vidic *et al.*, 2013a), (Myers, 2012), (Chuprakov y Zhubayev, 2010), (Soeder *et al.*, 2014), (Gale *et al.*, 2007), (Brantley *et al.*, 2014), (Arthur *et al.*, 2008), (Bocora, 2012).

Existe el riesgo además de que al fracturar el esquisto se facilite la migración de sustancias tóxicas presentes en el subsuelo, como el mercurio, el plomo y el arsénico (Lechtenböhmer *et al.*, 2011), (Peduzzi y Harding Rohr Reis, 2013).

Los fluidos de fracturación también pueden liberarse por sobrecarga hidrogeológica o por sobrepresurización de los acuíferos más bajos (Myers, 2012). El ingreso del fluido de fracturación a las formaciones puede aumentar la ocurrencia de reacciones químicas y la creación de nuevas sustancias que también pueden llegar potencialmente al recurso hídrico (Lechtenböhmer *et al.*, 2011).

Producción y distribución.

Existen grandes preocupaciones públicas respecto a los aditivos químicos del fluido de fracturación inyectado y la probabilidad de la contaminación de acuíferos, la cual aumenta dramáticamente con la disminución de la distancia vertical entre el pozo de gas y el acuífero (Vidic *et al.*, 2013a),

(Ratner y Tiemann, 2014), (D. Rahm, 2011). Asimismo otras preocupaciones asociadas a la gestión de los fluidos de retorno resultantes (Blohm *et al.*, 2012), (Warner *et al.*, 2012), (Plukas, 2014).

La contaminación hídrica puede responder a varias razones: prácticas incorrectas, daños en la estructura del pozo, derrames accidentales y fugas, entre otros (Lechtenböhmer *et al.*, 2011), (Jenner y Lamadrid, 2013), (Ratner y Tiemann, 2014).

Según Guarnone (2012) la comisión europea catalogó 270 sustancias químicas usadas en el *fracking* de las cuales 58 presentan riesgos prioritarios de acuerdo con la toxicidad, índice de bioacumulación y capacidad de desarrollar cáncer. Entre las más riesgosas están la acrilamida, el benceno, el etilbenceno, el isopropilbenceno, el naftaleno, el tertrasodiuo, el ácido etilendiaminotetraacético, el hidrocloreto de hidroxilamina, el queroseno, el tolueno, el xileno, el formaldehído, el diesel (D. Rahm, 2011), el glutaraldehído, el ácido clorhídrico, el ácido bórico, el alcohol isopropílico, así como otras sustancias nocivas usados como productos de limpieza (Lauver, 2012).

Aunque no se han comprobado las fuentes exactas que están contaminando los acuíferos, algunos estudios de variaciones geoquímicas e isotópicas en las aguas subterráneas demuestran la degradación de la calidad del recurso hídrico (Warner *et al.*, 2013), (D. Rahm, 2011). Sin embargo, en algunas ocasiones las concentraciones de los fluidos son diluidos naturalmente y esto ha afectado las mediciones (Brantley *et al.*, 2014).

Respecto a los efectos ambientales causados por el fluido de retorno está la contaminación hídrica. Estos fluidos pueden llegar por derrames a aguas superficiales, o mediante fugas migrar a acuíferos poco profundos. Además de los aditivos químicos ya contenidos en el fluido de fracturación, el fluido de retorno contiene altos niveles de salinidad, materiales radiactivos naturales (NORM), metales pesados, compuestos orgánicos volátiles, entre otros (Jenner y Lamadrid, 2013), (Haluszczak *et al.*, 2013), (Warner *et al.*, 2013), (Warner *et al.*, 2012), (Groat y Grimshaw, 2012), (Vidic *et al.*, 2013a), (B. G. Rahm *et al.*, 2013), (Peduzzi y Harding Rohr Reis, 2013), (Matesanz Caparroz, 2013), (Wang, Chen, Jha y Rogers, 2014), (Brantley *et al.*, 2014).

El contenido de altos niveles de sólidos totales disueltos (STD) corresponden a la disolución de minerales como la halita, que tienen sales de salmueras de origen natural (Kargbo *et al.*, 2010), (Ding *et al.*, 2012), (Engle y Rowan, 2013), (Brantley *et al.*, 2014). Existe evidencia geológica importante que comprueba que el flujo natural vertical impulsa los contaminantes como la salmuera hacia las formaciones acuíferas y además la salmuera puede concen-

trarse en fallas o zonas anticlinales (Myers, 2012), (Soeder *et al.*, 1986), (Guarnone *et al.*, 2012), (Warner *et al.*, 2012), (Vidic *et al.*, 2013a), (Eaton, 2013), (Jiang, Rentschler, Perrone y Liu, 2013).

Por otra parte, el agua salina puede inhibir la germinación y el crecimiento de las plantas, mientras que el exceso de sodio puede cambiar las propiedades físicas del suelo, dar lugar a un mal drenaje, contribuir a la formación de costras y afectar el rendimiento normal de cultivos (IEA, 2012), (Peduzzi y Harding Rohr Reis, 2013).

Las *shales* son ricas en NORM que son transportados a la superficie con el fluido *fracking* (Fortson *et al.*, 2011), (Soeder *et al.*, 2014), (Lechtenböhrmer *et al.*, 2011), contienen cantidades isotoporradiactivas de Torio, potasio (40 k), uranio (238 U) y sus derivados degradados como el radio (226 Ra y 228 Ra), gas radón (222 Rn) que decae a polonio (210 Po), luego se transforma en bismuto (210 Bi) y se establece como plomo (206 Pb) (Arthur *et al.*, 2008), (Soeder *et al.*, 2014). Los NORM adicionalmente pueden quedar adheridos como una fina película dentro de los equipos de perforación, transporte y tratamiento del gas natural. La cantidad de sustancias radiactivas difieren de un pozo a otro (Lechtenböhrmer *et al.*, 2011), (Kargbo *et al.*, 2010).

Los impactos sobre la salud humana se derivan de la ingestión de agua contaminada, de procesos respiratorios o por contacto dérmico (Lauver, 2012). Por ejemplo el benceno, la acrilamida y el óxido de hierro son carcinógenos, mutagénicos y teratogénicos (McKenzie *et al.*, 2012), (Wang *et al.*, 2014), (Lechtenböhrmer *et al.*, 2011). El benceno puede causar anemia, leucemia mielóide aguda, leucemia linfocítica crónica, trastornos en la sangre e inmunológicos. El xileno tiene efectos en los ojos, nariz, garganta, dificultad para respirar, deterioro de la función pulmonar, deterioro del sistema nervioso, y problemas neurológicos (McKenzie *et al.*, 2012). El 2-butoxetanol es tóxico a niveles relativamente bajos de exposición, tiene una vida media de 7 y 28 días, y una tasa de biodegradación lenta aeróbica, y puede ocasionar trastornos al sistema nervioso y convulsiones (D. Rahm, 2011), (Lechtenböhrmer *et al.*, 2011). Los trihalometanos bromados (THM) generados por la reacción del bromo y la materia orgánica son asociados a cánceres y otras enfermedades (Brantley *et al.*, 2014).

Asimismo, es natural que se encuentre metano presente en las aguas subterráneas debido a la maduración de la materia orgánica y las altas temperaturas (Brantley *et al.*, 2014). Estudios geoquímicos isotópicos han demostrado que las concentraciones de metano termogénico ($\delta^{13}\text{C-CH}_4$; $\delta^2\text{H-CH}_4$) han aumentado en las aguas subterráneas y superficiales por las actividades de producción de *shale gas* (Vidic *et al.*, 2013a), (Jenner y Lamadrid, 2013), (Warner *et al.*, 2013), (Vengosh *et al.*, 2013), (Myers, 2012). Esto ha ocasionado explosiones en pozos de agua potable y explosiones en el subsuelo (Groat y Grimshaw, 2012), (Vidic *et al.*, 2013a), (Myers, 2012), (Peduzzi y Harding Rohr Reis, 2013), (D. Rahm, 2011), (Brantley *et al.*, 2014). Además, las concentraciones de metano en el recurso hídrico puede causar turbidez cuando este se desgasifica (Vidic *et al.*, 2013a).

Existen otras emisiones durante el *fracking* como las emisiones indirectas que permiten la formación de smog. Es decir, las emisiones de gases como el dióxido de carbono procedente de los combustibles fósiles utilizados para extraer, explotar y transportar el gas (Howarth *et al.*, 2011), la emisión de compuestos orgánicos volátiles, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y material particulado (Peduzzi y Harding Rohr Reis, 2013), (Ratner y Tiemann, 2014), (Soeder *et al.*, 2014). Asimismo, las emisiones de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), compuestos heterocíclicos, fenoles alquilo, aminas aromáticas, compuestos aromáticos de alquilo (alquilbencenos, bifenilos alquilo) e hidrocarburos alifáticos (Orem *et al.*, 2014), (Brantley *et al.*, 2014), (McKenzie *et al.*, 2012), (D. Rahm, 2011).

La exposición e inhalación de hidrocarburos de petróleo en lugares de trabajo como los mencionados anteriormente, puede producir irritación en los ojos, dolores de cabeza, síntomas de asma, leucemia infantil aguda, leucemia mielógena aguda, mieloma múltiple, además, puede aumentar los índices de riesgo de cáncer (McKenzie *et al.*, 2012). Un contaminante como el mercurio neurotóxico puede causar cáncer de pulmón (Jenner y Lamadrid, 2013).

Los animales también sufren las consecuencias del *fracking*, por ejemplo, un estudio demostró que animales que habitan cerca de pozos perforados en donde se extrae *shale gas* tienen efectos en los ciclos reproductivos, además hay registros de muertes por consumo de agua contaminada (Jenner y Lamadrid, 2013). Algunos compuestos genotóxicos en el medio acuático han atraído la atención regulatoria en diferentes partes del mundo, incluyendo la unión europea.

A pesar que en la perforación también existen la probabilidad de eventos sísmicos a pequeña escala (1 a 3 grados en escala de Richter), en la etapa de fracturación se altera la sismicidad local que ocurre por la inyección y extracción de fluidos que alteran las tensiones y presiones de la corteza terrestre (Vidic *et al.*, 2013a), (Peduzzi y Harding Rohr Reis, 2013), (Kargbo *et al.*, 2010), (Ybáñez y Vivas, 2010).

Finalización del pozo.

Después del desmantelado del *fracking* los trabajadores que retiran elementos sólidos de perforación en depósitos

y pozos pueden sufrir afectaciones en la salud, puesto que los desechos son sumamente radiactivos (Lechtenböhrmer *et al.*, 2011). Durante la finalización del pozo se emite constantemente CO₂ y CH₄ lo que repercute a largo plazo la calidad del aire (Lechtenböhrmer *et al.*, 2011), (Howarth *et al.*, 2011).

En esta etapa también se debe considerar que a menudo el suelo se encuentra con niveles altos de acidez y salinidad, lo que dificulta la recuperación y revegetalización del suelo (Cook y Johnson, 2002), (Pедуzzi y Harding Rohr Reis, 2013).

Por último, los sistemas de producción de *shale gas* requieren de 3 a 6 años para llegar a un nuevo equilibrio, esto

implica que los cambios significativos causados por el *fracking* permitan transporte advectivo en los acuíferos por lo menos por 10 años más (Myers, 2012).

En este tipo de prácticas encontramos gran variedad de efectos significativos, no obstante, el tema más debatido del *fracking* está relacionado con el elevado consumo de agua (Matesanz Caparroz, 2013), que es adquirido de fuentes superficiales, subterráneas y fuentes municipales privadas. Estudios preliminares demuestran que la extracción de gas no convencional requiere entre 50 a 100 veces más agua que la a extracción de gas convencional (tabla 1).

Tabla 1. Consumo hídrico por pozos

Autor	Año	Consumo recurso hídrico/pozo (metros cúbicos)
Jackson	2014	7.570 a 75.708
Brantley <i>et al.</i>	2014	15.142 a 18.927
Vidic <i>et al.</i>	2013	7.570 a 26.498
Peduzzi y Harding	2013	7.570 a 30.283
Eaton	2013	7.570 a 37.854
Rivard <i>et al.</i>	2013	7.500 a 15.000
Freeman	2013	22.712
Myres	2012	17.034
Groat y Grimshaw	2012	15.142 a 23.091
Bocora	2012	18.927
Weijermars <i>et al.</i>	2011	4.542,5 a 13.249
D. Rahm y Jiang <i>et al.</i>	2011-2012	7.570,8 a 18.927
Harper	2008	15.141,6

Fuente: el autor.

Conclusión

Como se puede observar en la presente revisión, la explotación de gas de lutita ha hecho importantes contribuciones hacia el mejoramiento de la seguridad energética en diferentes países en los continentes americano y europeo. Sin embargo, en el contexto mundial existen múltiples investigaciones que han sugerido impactos ambientales y sociales relevantes durante los procesos de exploración y explotación

de gas de lutita. Esto último impone un reto importante en términos de sostenibilidad global y local.

Aspectos como la falta de información e identificación de los aditivos químicos en el fluido de fracturación se deben cubrir, como también se debería evaluar la sustitución de las sustancias potencialmente peligrosas por otras con potenciales de riesgo más bajas.

Como recomendación resulta fundamental el desarrollo de modelos numéricos durante la fase de solicitud de

licencias, principalmente en los lugares donde la vulnerabilidad es mayor. Esto permitiría dimensionar los verdaderos riesgos asociados a la explotación de gas de lutita e incluir en la ecuación los impactos ambientales derivados de esta. Desde esta perspectiva, con el fin de contar con información suficiente para calibrar y validar los modelos, es indispensable exigir la construcción de sistemas robustos de monitoreo de variables de estado y ambientales a los operadores que pretendan realizar actividades de exploración y explotación de gas de lutita.

Esta tendencia mundial debe ser tenida en cuenta en el contexto colombiano ya que deben evaluarse otras técnicas para la explotación de gas en yacimientos no convencionales que no afecten el recurso hídrico tan significativamente.

Referencias

- Arthur, J. D., Bohm, B., Coughlin, B. J., Layne, M. y Cornue, D. (2008). Evaluating the environmental implications of hydraulic fracturing in shale gas reservoirs. *ALL Consulting*. <http://www.all-llc.com/publicdownloads/ArthurHydrFracPaperFINAL.pdf>. Recuperado de <http://energy.wilkes.edu/PDFFiles/Issues/EvaluatingTheEnvironmentalImplicationsOfHydraulicFracturingInShaleGasReservoirs.pdf>
- Blohm, A., Peichel, J., Smith, C. y Kougentakis, A. (2012). The significance of regulation and land use patterns on natural gas resource estimates in the Marcellus shale. *Energy Policy*, 50, 358-369.
- Brantley, S. L., Yoxtheimer, D., Arjmand, S., Grieve, P., Vidic, R., Pollak, J. y Simon, C. (2014). Water Resource Impacts during Unconventional Shale Gas Development: the Pennsylvania Experience. *International Journal of Coal Geology*. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016651621300284X>
- Caputo, J. (2011). *Shale Plays: Basic Geologic and Engineering Concepts*. Seminario. Recuperado de http://landman.org/docs/white-papers/03-caputo_aapl_shale_play_seminar_part1_final.pdf
- Groat, C. G. y Grimshaw, T. W. (2012). Fact-based regulation for environmental protection in shale gas development. The Energy Institute. University of Texas at Austin. Austin, Texas.
- Guarnone, M., Rossi, F., Negri, E., Grassi, C., Genazzi, D. y Zennaro, R. (2012). An unconventional mindset for shale gas surface facilities. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 6, 14-23.
- Haluszczak, L. O., Rose, A. W. y Kump, L. R. (2013). Geochemical evaluation of flowback brine from Marcellus gas wells in Pennsylvania, USA. *Applied Geochemistry*, 28, 55-61.
- Jenner, S. y Lamadrid, A. J. (2013). Shale gas vs. coal: Policy implications from environmental impact comparisons of shale gas, conventional gas, and coal on air, water, and land in the United States. *Energy Policy*, 53, 442-453.
- Kargbo, D. M., Wilhelm, R. G., y Campbell, D. J. (2010). Natural gas plays in the Marcellus shale: Challenges and potential opportunities. *Environmental Science y Technology*, 44 (15), 5679-5684.
- Lechtenböhmer, S., Atmann, M., Capito, S., Matra, Z., Windrorf, W. y Zittel, W. (2011). *Repercusiones de la extracción de gas y petróleo de esquisto en el medio ambiente y la salud humana*. Parlamento Europeo, Departamento de Política Económica y Científica, Comisión de Medio Ambiente, Salud Pública y Seguridad Alimentaria. Recuperado de <http://www.europarl.europa.eu/activities/committees/studies.do>
- McKenzie, L. M., Witter, R. Z., Newman, L. S. y Adgate, J. L. (2012a). Human health risk assessment of air emissions from development of unconventional natural gas resources. *Science of the Total Environment*, 424, 79-87.
- Myers, T. (2012). Potential contaminant pathways from hydraulically fractured shale to aquifers. *Groundwater*, 50 (6), 872-882.
- Peduzzi, P. y Harding Rohr Reis, R. (2013). Gas fracking: can we safely squeeze the rocks? *Environmental Development*, 6, 86-99.
- Ratner, M., y Tiemann, M. (2014). *An overview of unconventional oil and natural gas: resources and federal actions*. Congressional Research Service, Washington, D. C. Recuperado de http://mercury.ethz.ch/serviceengine/Files/ISN/168259/ipublicationdocument_singledocument/fadecb2d-59d2-4547-9f39-3b953c6a86bf/en/221258.pdf
- Soeder, D. J., Sharma, S., Pekney, N., Hopkinson, L., Dilmore, R., Kutchko, B. y Capo, R. (2014). An approach for assessing engineering risk from shale gas wells in the United States. *International Journal of Coal Geology*. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166516214000068>
- Vidic, R. D., Brantley, S. L., Vandenbossche, J. M., Yoxtheimer, D. y Abad, J. D. (2013). Impact of shale gas development on regional water quality. *Science*, 340 (6134). Recuperado de <http://www.sciencemag.org/content/340/6134/1235009.short>
- Warner, N. R., Kresse, T. M., Hays, P. D., Down, A., Karr, J. D., Jackson, R. B. y Vengosh, A. (2013). Geochemical and isotopic variations in shallow groundwater in areas of the Fayetteville shale development, north-central Arkansas. *Applied Geochemistry*, 35, 207-220.
- Weijermars, R., Drijkoningen, G., Heimovaara, T. J., Rudolph, E. S. J., Weltje, G. J. y Wolf, K. (2011). Unconventional gas research initiative for clean energy transition in Europe. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 3 (2), 402-412.

Cambio climático y sostenibilidad

Francisco A. Orjuela C.

Jornada de actualización en recursos hídricos y ambientales

Fundación Universitaria Agraria de Colombia

Facultad de Ingenierías, Programa de Ingeniería Civil

El clima y su evolución

Los cambios en el sistema climático, lo que a menudo denominamos calentamiento global, están muy relacionados con el Mauna Loa de Hawái, que es una montaña enorme y desde donde, a finales de la década de los cincuenta, Charles Keeling empezó a medir el dióxido de carbono que hay en la atmósfera. Sorprendentemente, observó dos cosas:

La primera es que hay una oscilación estacional: en otoño se descarga una gran cantidad de CO₂ a la atmósfera mientras que en primavera el CO₂ es absorbido por los árboles. Pero desde hace mucho tiempo hay una tendencia: está subiendo constantemente pudiéndose observar cómo en 2013 se sobrepasó el parámetro correspondiente a 400 partes por millón de CO₂ en la atmósfera.

Desde un punto de vista histórico un gran avance de la ciencia moderna se dio cuando se llevó a cabo la extracción de núcleos de hielo mediante perforación en la Antártida. Se extrajo un núcleo de hielo que estaba a varios kilómetros de profundidad para observar, a través de sus capas de hielo, cómo era la atmósfera primitiva. Fue un logro asombroso pues esta labor permitió determinar que en los últimos 800.000 años, aproximadamente, la concentración de CO₂ ha venido oscilando, subiendo y bajando, pero también se detectó algo, en los últimos 100 años existe un aumento extremo en los niveles de CO₂, (Earth System Research Laboratory Global Monitoring Division, 2015).

La revolución industrial

En la evolución del clima a lo largo de la historia del planeta, puede observarse cómo durante la Edad de Hielo hubo enormes fluctuaciones, de manera que la temperatura bajó 10 °C más o menos y finalmente, hace unos 11.000 años, se estabilizó mucho y casi no hubo fluctuaciones. A este fenómeno se le llama Revolución Neolítica, porque gracias a un clima estable el *Homo sapiens* comenzó a establecerse en regiones bien definidas.

Esta Revolución Neolítica trajo consigo la agricultura y esta a su vez la segunda gran revolución de la historia de la civilización, la Revolución Industrial, la invención de la máquina de vapor, la incorporación de constantes innovaciones técnicas y la consecuente construcción de fábricas, pero paralelamente a estos fenómenos la población comienza a crecer en forma alarmante, hace dos siglos éramos 500 millones de habitantes y hoy somos más de 7.400 millones.

El cambio climático

Los cambios tecnológicos en determinado momento comenzaron a tener efectos contrarios sobre la civilización del siglo XXI, además de otros de muy nueva creación. Recordemos que a mediados del siglo XIX, en 1872 el químico inglés Angus Smith descubrió la llamada lluvia ácida (Schoijet, 2008), producida por la combustión de carbón que contiene azufre y que Svante Arrhenius (1859-1927) fue el primero en divulgar en 1896 que los combustibles fósiles podrían dar lugar o acelerar el calentamiento de la Tierra, además de establecer una relación entre concentraciones de dióxido de carbono atmosférico y temperatura y, adicionalmente, determinar que la media de la temperatura superficial de la Tierra es de 15 °C debido a la capacidad de absorción de la radiación infrarroja del vapor de agua y el dióxido de carbono. Arrhenius sugirió que una concentración doble de gases de CO₂ provocaría un aumento de temperatura de 5 °C. Él junto con Thomas Chamberlin calcularon que las actividades humanas podrían provocar el aumento de la temperatura mediante la adición de dióxido de carbono a la atmósfera; posteriormente, y quizás el hallazgo más importante en términos de cambios en términos de cambio climático, fue probablemente el de los clorofluorocarbonos (CFC), utilizados en refrigeración desde 1930, y cuyos efectos sobre la capa de ozono de la alta atmósfera, a más de 10.000 km de las fuentes, fueron descubiertos por Sherwood Rowlands y Mario Molina en la década de 1970 (Lenntech, 2015).

Evidentemente el planeta se está calentando y se debe a la injerencia del ser humano, hoy en día existe un consenso que ratifica que la interferencia humana es, con una probabilidad muy grande, la causa principal de este cambio en el comportamiento de la atmósfera.

El efecto invernadero

La base de todo el problema es lo que designamos *efecto invernadero*. Tomamos nuestra energía principalmente del Sol, ahora bien, al ser absorbida por la superficie de la Tierra, la luz solar se transforma y es reemitida en forma de luz infrarroja, y esa luz infrarroja no puede traspasar la atmósfera tan fácilmente como la luz visible, así que es devuelta y dispersada por los gases de efecto invernadero, especialmente el CO₂.

La razón por la que tenemos que recapitular en eso ahora es muy importante. El CO₂ y otros gases de efecto invernadero continúan en la atmósfera durante mucho tiempo, a

diferencia del dióxido de azufre y de las partículas o la contaminación que regularmente nos perturban, estos gases pueden permanecer en el aire varios siglos.

Quizás la mejor manera de entender la diferencia entre concentraciones y emisiones es la “analogía de la bañera”, presentada Stermán, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y Booth Sweeney, de la Escuela de Graduados en Educación de Harvard. Ellos conceptualizan la atmósfera como una bañera: la llave abierta representa las emisiones de gases de efecto invernadero; el desagüe representa la absorción que hacen las plantas y el océano, y el agua en la bañera representa la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Con la tasa actual de emisiones de gases de efecto invernadero, la cantidad de agua que sale de la llave es más del doble de la que se va por el desagüe, luego el nivel de agua de la bañera va en aumento. Pero para empeorar las cosas, continuamos abriendo un poco más la llave, aumentando la cantidad de agua que entra a la bañera. Para impedir que la bañera se desborde no basta con dejar igual la abertura de la llave (el equivalente a estabilizar las emisiones): tenemos que cerrarla, de manera que entre menos agua a la bañera de la que sale por el desagüe (Seed, 2015).

Efectos del cambio climático

Pero la pregunta es: ¿a dónde va toda esa cantidad de energía? Paradójicamente a lo que pensamos no va a la atmósfera, va a parar a los océanos y esta produce el aumento de las temperaturas de los océanos. El 93% del incremento de la energía calorífica en las últimas décadas ha ocasionado el calentamiento de los océanos y solo el 3% ha provocado un aumento de las temperaturas de la superficie terrestre. Hay otro 3% del calor que ha producido derretimiento de la cobertura de nieve en el hemisferio norte, y solo el 1% ha originado el calentamiento de la atmósfera, así que los océanos se están calentando enormemente entre la superficie y los 2.000 m de profundidad. La temperatura media en los océanos, sobre todo desde 1990 aproximadamente, han experimentado un aumento importante; los océanos se calientan, se expanden y como resultado de esa expansión, el nivel del mar sube, pero hay otros factores como el derretimiento de los glaciares y de los mantos de hielo, específicamente los mantos de hielo de Groenlandia y la Antártida. La zona ártica de Groenlandia también ha aportado a la subida del nivel del mar, especialmente durante los últimos años, ya que el manto de hielo de Groenlandia, debido a las temperaturas más altas, se derrite más rápido que la nieve adicional acumulada durante el invierno.

Escenarios de emisiones

Actualmente conocemos bastante bien nuestra situación con respecto a los problemas climáticos generados por las emisiones de CO₂ y se tienen modelos muy aproximados de ellos, esto ha permitido generar escenarios de emisiones los cuales permiten “predecir” nuestra situación futura. Todo se ha sintetizado en unas pocas variables correlacionadas con cuatro proyecciones:

1. Crecimiento poblacional.
2. Selección de tipos de energía.
3. Crecimiento económico.
4. Innovación tecnológica.

En la medida en que haya más habitantes en la Tierra, mayor cantidad de energía consumirán. ¿Qué tipo de energía? ¿Acaso más combustibles de origen fósil? Si las poblaciones crecen las economías crecen y consumen energía. En resumen, los cuatro indicadores mencionados conforman los escenarios de emisiones. Se estima que la tendencia actual de emisiones nos llevará mucho más allá del límite considerado seguro, que es una temperatura media mundial de unos 2 °C, pero probablemente vamos a exceder un calentamiento medio global de 4 °C en un periodo comprendido entre los años 2060 y 2080, distante para nosotros, pero perjudicial para las generaciones futuras.

Nuestro desafío actual es la innovación e introducción progresiva de nuevas tecnologías, sin embargo, la innovación de estos factores es importante por otra razón y es que requieren mucho tiempo para su implementación, luego debemos actuar a tiempo ya que hay muchas iniciativas factibles, tecnológicamente probadas, comercialmente viables y rentables.

La sostenibilidad

El primer hito importante de la relación entre el ser humano y el medio ambiente, por su enorme eco mediático, fue la Cumbre de Estocolmo de 1972. Ella supuso constatar la crisis ambiental que ciertos sectores comenzaban a atisbar y dar los primeros pasos para paliar sus efectos.

Hasta entonces la trayectoria y las relaciones del ser humano con el medio ambiente han ido evolucionando desde situaciones en las que el contacto ser humano y naturaleza era absoluto hasta ir diluyéndose y alejándose, quizás, sin remedio. El ser humano se siente amo y señor del universo. Su lógica y su potencial transformador hacen que pueda argumentar y justificar toda acción sobre el medio. La ciencia y

la tecnología han sido los instrumentos utilizados para transformar el mundo a su arbitrariedad con el fin de resguardar sus necesidades y obtener beneficios. La metamorfosis ha acarreado una gran problemática medioambiental y es el momento de pensar en la sostenibilidad como un concepto holístico; es decir, un lugar donde el ser humano haga parte de la biósfera y la ciencia y la tecnología sean herramientas de resolución de problemas para la humanidad, con economías más equitativas y equilibradas con la naturaleza.

Por tanto, la sostenibilidad es un proceso de permanente cambio, aprendizaje y participación que, teniendo en cuenta los límites de la biosfera (capacidad de carga, renovación, etc.), busca recobrar el equilibrio ecosocial entre los seres humanos y la naturaleza. Esta búsqueda trae consigo efectos multidimensionales que afectan la ética de las personas,

las relaciones sociales (económicas, culturales, tecnológicas, etc.) y la relación entre el ser humano y el resto de seres vivos del planeta (Gutiérrez, 2011, p. 162).

Referencias

Earth System Research Laboratory Global monitoring division.

Recuperado de <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/>

Gutiérrez, J. (2011). *Sustener, sostenibilidad vs. mercadeo y tecnología*. Barcelona: Bubok.

Lenntech. Recuperado de <http://www.lenntech.es/efecto-invernadero/historia-calentamiento-global.htm#ixzz3jn3roq5s>

Seed. Recuperado de <http://www.lenntech.es/efecto-invernadero/historia-calentamiento-global.htm#ixzz3jn3roq5s>

Efectos de los impactos de asteroides en la Tierra

Marcela Bernal Palacio

Vivimos en un planeta en continuo movimiento. Los desastres naturales tales como inundaciones, sismos, huracanes, deslizamientos, erupciones volcánicas, impactos de asteroides y otros fenómenos geológicos son algunos de los componentes que hacen de nuestro planeta un cuerpo dinámico y susceptible a desastrosos efectos que pueden afectar su biosfera.

La Tierra ha recibido impactos de asteroides y cometas desde el mismo momento de su formación, poco después de esta hace unos 4.500 millones de años, nuestro planeta se convirtió en un blanco cósmico. Los asteroides y cometas trajeron a la Tierra primitiva la mayor parte del material orgánico y el agua que hizo posible el origen de la vida. Otras colisiones posteriores como la que acabó con los dinosaurios hace 65 millones de años influyeron en la evolución permitiendo que el *homo sapiens* alcanzara la cumbre de la cadena trófica.

Al entender cómo y dónde ocurren estos fenómenos, qué los causa y qué condiciones aumentan su severidad, es posible desarrollar estrategias para reducir y mitigar su impacto en el planeta. Los impactos de cuerpos estelares en la Tierra siempre ha sido algo que ha inquietado no solo a la comunidad científica sino a la población del planeta. Numerosas teorías hablan del meteorito que terminó con los dinosaurios o que en el futuro, la vida en la Tierra perecerá por la colisión de uno de estos cuerpos. Por el momento, no se puede confirmar ninguna teoría apocalíptica pero sí se pueden comprobar los impactos que han moldeado este planeta a lo largo de sus 4.600 millones de años.

El impacto de un asteroide cerca de la ciudad rusa de Chelyabinsk el 15 de febrero 2013 ha sido la mayor explosión por un impacto desde el evento de Tunguska en 1908 (Popova *et al.*, 2013). Este asteroide que mide de 18 a 20 m de diámetro y tuvo una velocidad de ingreso a la tierra de $19,16 \pm 0,5$ km/s (Galimov, 2013), pone de moda otra vez el tema siempre actual de los desastres y, en particular, el de los impactos.

Los asteroides con un gran potencial para causar catástrofes globales como cambios ambientales o extinciones masivas, como lo ocurrido en la península de Yucatán, suceden en un promedio de uno cada 50 o 100 millones de años (The Probability of Collisions with Earth, n. d.), mientras que otros eventos más pequeños, pero significativos ocurren a un escala de tiempo más corta y también pueden afectar de alguna forma el clima y la biosfera.

Cuando uno de ellos colisiona con la Tierra, deja otras evidencias aparte del cráter. En nuestro planeta, que ha sido bombardeado desde su formación, los cráteres son menos visibles que en otros cuerpos del sistema solar porque son

continuamente borrados por la erosión y la depositación, así como también por la actividad volcánica y tectónica; de manera pues que aquellas evidencias diferentes al cráter cobran importancia a la hora de estudiar este fenómeno extraterrestre (Bernal, 2003).

Uno de efectos más grandes que puede dejar la colisión de un meteorito con la Tierra es la extinción masiva, que no es un efecto directo sino que está asociado a consecuencias colaterales que dejan el mismo impacto, como calentamiento o enfriamiento global, pérdida de ecosistemas, sismos, bólidos, destrucción de la capa de ozono, lluvias ácidas y nubes de polvo (Norman H. Sleep, Kevin J. Zahnle, James F. Kasting, 1989). Estos cambios abruptos de condiciones ambientales en el planeta provocan la pérdida de biomasa y ecosistemas llevando a las extinciones masivas.

Una historia catastrófica

Los cráteres de impacto son estructuras geológicas formadas cuando un gran asteroide o cometa colisiona con un planeta o satélite (French, 1998). Todos los cuerpos en nuestro sistema solar han sido bombardeados por asteroides y los recuerdos de esos bombardeos se muestran claramente en la superficie de la Luna, Marte y Mercurio, en donde los procesos geológicos se detuvieron hace millones de años (Bernal, 2003). Durante los últimos 30 años ha habido un inmenso cuestionamiento sobre el modelamiento del planeta y su lugar en el sistema solar, pues lo que fue una vez un proceso astronómico sin trascendencia, se ha convertido en una rama importante de la geología. Los científicos y la gente en general se han dado cuenta de que las estructuras de impacto de meteorito son abundantes, grandes, antiguas y complejas en términos geológicos y, asimismo, se ha notado que son un factor biológico significativo para la evolución de nuestro planeta (Bernal, 2003).

Los impactos sobre la superficie terrestre han generado cambios en la corteza, han formado rocas, han hecho variar la temperatura del planeta y han participado en al menos una extinción biológica importante. En la Tierra se han encontrado más de 160 cráteres de impacto; la mayor parte de ellos están localizados en Norteamérica, Europa y Australia, pero se cree que quedan más estructuras por descubrir (Chapman y Morrison, 1994).

Los impactos de meteoritos son independientes de los procesos internos de la Tierra; sin embargo, las estructuras resultantes pueden ser alteradas por procesos tectónicos o volcánicos. La distribución de cráteres es aleatoria y su datación temporal es consistente con las tasas de producción de

cráteres calculada por las observaciones astronómicas de los asteroides cercanos la Tierra.

Hace 65 millones de años, los dinosaurios habitaban el planeta, pero en un abrir y cerrar de ojos estos gigantes desaparecieron. ¿Qué pudo causar esta extinción masiva en tan poco tiempo? Este final catastrófico en el Cretácico capturó la atención y la imaginación de muchos geólogos y actualmente es uno de los temas más discutidos en las ciencias de la Tierra, debido a que es uno de los eventos más severos y dramáticos de la historia de nuestro planeta (Bernal, 2003).

Los reportes de varios científicos muestran enriquecimiento en iridio y otros elementos dentro de las capas de sedimentos del límite Cretácico/Terciario, convirtiéndose esta en la primera evidencia de la relación entre el impacto de un meteorito y una extinción masiva (Grieve, 1982). El cráter que puede estar asociado con este evento, es el Chicxulub, en la península de Yucatán en México.

Este cráter tiene un diámetro de 180 km y una edad de 65 millones de años, justo el límite entre el Cretácico y Terciario. Diferentes estudios geofísicos sobre este cráter revelan un enriquecimiento en los elementos llamados siderófilos, aquellos tienden a combinarse con el hierro. El cráter de Chicxulub muestra características diagnósticas de metamorfismo de choque, principalmente por la presencia de granos de cuarzo con rasgos de deformación planar (PDF [*Planar deformation features*]) en algunas partes del manto de deyección del impacto. Además, se encontraron clastos cristalinos con evidencia de choque y partículas fundidas alteradas en otras partes del manto de deyección (Kenkmann y Schönián, 2006)

Así como este existen otros eventos de gran importancia histórica, aunque con efectos menos severos, que se pueden ejemplificar con los fragmentos del objeto extraterrestre que explotó en el aire sobre la cuenca del río Podkamennaya y cerca al lago Cheko en Tunguska, Siberia, el 30 de junio de 1908, con una fuerza de 10 a 15 megatones (mil veces la bomba de Hiroshima), que causó una sismicidad anómala, una onda resultante de alta temperatura y presión y devastó alrededor de unos 2.000 km² de bosque de taiga (Gasparini et al., 2009).

Los análisis geoquímicos, la datación por isótopos de ¹³⁷Cs y ²¹⁰Pb y el contenido de polen de los sedimentos del lago Cheko, realizados por un grupo de científicos, llevan a la hipótesis de que dicho lago es muy joven (unos 100 años) y cubre un cráter de impacto que pudo haber sido formado por el choque de un fragmento del asteroide del evento de Tunguska que sobrevivió a la explosión en la atmósfera (Gasparini et al., 2009).

También han ocurrido varios impactos que han llamado la atención no solo de los científicos, sino también de las personas que han sido testigos de estos bombardeos extraterrestres, entre ellos, se destacan los siguientes:

Manicouagan en Quebec, Canadá, un cráter de 65 km de diámetro sustentado por un horizonte de roca fundida con un espesor aparente de 230 m y una edad aproximada de 214±1 millones de años (Triásico tardío), es considerada una de las estructuras más grandes y mejor preservadas en la superficie terrestre. La textura estratificada de grano grueso de la capa fundida está marcada por la reducción de clastos derivados del impacto. Esta capa fundida recubre y se combina con brechas del Proterozoico. El efecto de metamorfismo de choque es muy abundante en las rocas del cráter. Este tipo de metamorfismo y las asociaciones morfológicas con otras estructuras indican que el impacto dejó un anillo de unos 65 km aproximadamente.

Vredefort, en Sudáfrica, es una de las estructuras de impacto más grandes y antiguas del planeta. Hace 2.000 millones de años (Proterozoico tardío), Un meteorito de varios kilómetros formó un cráter de 350 km de diámetro en la cuenca de Witwatersrand. El impacto ocasionó el plegamiento y fallas de la corteza.

Referencias

- Bernal, M. (2003). Impactos de meteoritos en la tierra. *Tribuna de Astronomía y Universo*, 52, 78–83.
- Chapman, C. R. y Morrison, D. (1994). Impacts on the Earth by asteroids and comets: assesing the hazard. *Nature*, 367(6), 33-40.
- French, B. M. (1998). *Traces of Catastrophe: A handbook of shock metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structure* (LPI Contri, p. 120). Houston.
- Galimov, E. M. (2013). Chelyabinsk meteorite—an LL₅ chondrite. *Solar System Research*, 47(4), 255–259.
- Gasparini, L., Bonatti, E., Albertazzi, S., Forlani, L., Accorsi, C. a., Longo, G. y Sacchetti, F. (2009). Sediments from lake Cheko (Siberia), a possible impact crater for the 1908 Tunguska event. *Terra Nova*, 21, 489-494.
- Grieve, R. A. F. (1982). The record of impact on Earth: Implications for a major Cretaceous/Tertiary impact event*. *Special Papers*. Recuperado de <http://specialpapers.gsapubs.org/content/190/25.abstract>
- Kenkmann, T. y Schönián, F. (2006). Ries and Chicxulub: Impact craters on Earth provide insights for Martian ejecta blankets. *Meteoritics & Planetary Science*, 41 (10), 1587-1603.
- Nelson, S. A. (2012). *Meteorites, Impacts, and Mass Extinction* (pp. 1-13).

Norman, H. Sleep, Kevin J. Zahnle, James F. Kasting, H. J. M. (1989). Annihilation of ecosystems by large asteroid impacts on the early Earth. *Nature*.

Popova, O. P., Jenniskens, P., Emel'yanenko, V., Kartashova, a., Biryukov, E., Khaibrakhmanov, S. y Mikouchi, T. (2013). Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization. *Science*, 342 (2013), 1069-1073.

Sharpton, V. L. y Grieve, R. A. (1990). Meteorite impact, cryptoexplosion, and shock metamorphism; A perspective on the evidence at the K/T boundary. *Special Papers*.

The Probability of Collisions with Earth. (n. d.). Recuperado de <http://www2.jpl.nasa.gov/sl9/back2.html>

JORNADAS DE
INVESTIGACIÓN Y
ACTUALIZACIÓN
EN INGENIERÍA CIVIL

Publicación de la Fundación Universitaria
Agraria de Colombia, UNIAGRARIA.
Se terminó de imprimir
en el mes de octubre del año 2015
en la ciudad de Bogotá.

Caracterización físico-mecánica de la palma y fibras de pupunha. Palma de chontaduro	5
Caucho, un potencializador de las mezclas asfálticas	9
Reforzamiento estructural externo de casas de uno y dos pisos por medio de fibras vegetales y maderables	15
Investigación experimental del comportamiento de vigas altas reforzadas con tiras de bambú	21
Estudio de procesos de tratamiento en macizos rocosos mediante inyecciones de lechada hidráulica en la ataguía-Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso	29
Modelo hidrogeológico conceptual de acuíferos	33
Aplicaciones de la inteligencia artificial para el cálculo de los indicadores de calidad del agua	39
Revisión del estado del arte de los efectos ambientales de la estimulación hidráulica (<i>fracking</i>)	43
Cambio climático y sostenibilidad	51
Efectos de los impactos de asteroides en la tierra	55

