

Revista de



TECNOLÓGICO

RIDTEC | Vol. 11, N.º1, enero - junio 2015

ISSN16880-8894

Edición Semestral

Publicación Regional

Publicación y directorio
en catálogo

latindex

www.latindex.unam.mx



EDITORIAL
TECNOLÓGICA

Revista de TECNOLÓGICO

Revista de investigación de la Universidad Tecnológica de Panamá

Volumen 11, Número 1, Edición Semestral, Enero - Junio 2015
ISSN 1680-8894

Director del Comité Editorial

Dr. Humberto Rodríguez
Dirección de Investigación
Universidad Tecnológica de Panamá

Comité Editorial

Dr. Humberto Álvarez
Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica de la
Industria (CINEMI)
Universidad Tecnológica de Panamá

Dr. Wedleys Tejedor
Centro de Producción e Investigaciones Agroindustriales (CEPIA)
Universidad Tecnológica de Panamá

Dr. Carlos Medina
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Panamá

Dr. Jaime Estrella
Consultor e Investigador en Biología Molecular y Evolución;
Especialista en Biodiversidad Agrícola.

Dra. Jazmina Urriola
Dirección de Investigación y Desarrollo (I+D)
Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT)

Ing. Eli Faskha
Miembro del Consejo Nacional de la Empresa Privada (CONEP) y de
la Junta Directiva de Cámara Panameña de Tecnología
y Comunicaciones

Suplentes

Dr. Ramfis Miguelena
Centro de Investigación, Desarrollo en Tecnologías de la
Información y las Comunicaciones (CIDITIC)
Universidad Tecnológica de Panamá

Lic. José Javier Rivera
Miembro del Consejo Nacional de la Empresa Privada (CONEP)



Ing. Libia Batista
Directora

Licda. Sandra Siebert
Sr. Armando Pinillo
Mercadeo y Ventas

Diseño y diagramación:
Sección de Diseño Gráfico

Idea y diseño original de la portada:
Licdo. Rafael Saturno

Corrección de estilo
Licda. Klenya Morales

Coordinación y logística:
Ing. Eduardo Caballero
Dirección de Investigación, UTP.

Escribir en I+D Tecnológico:
<http://utp.ac.pa/publicaciones-digitales-de-la-revista-de-id-tecnologico>

Plataforma para la Recepción de Artículos
<http://www.redinvestigadores.utp.ac.pa/revistaI+D/openconf/openconf.p>
© Derechos reservados, UTP, 2014.

Impreso en Panamá, Ciudad de Panamá
Imprenta de la Universidad Tecnológica de
Panamá

Contenido

5

Análisis de la monitorización de medios de comunicación social como proceso para agilizar la vigilancia de rumores usando Dinámica de Sistemas

Eduardo A. Caballero | Sergio Crespo | Humberto Álvarez | Nilda Yangüez C.

17

Asimilación de CO₂ en dos especies de plantas de un bosque húmedo tropical de Cerro Pelado, Gamboa

Kleever Espino | José R. Fábrega D.

26

Diseño de estructuras con sistema de amortiguamiento viscoso lineal

Fernanda M. Candanedo | Carlos E. Miranda | Rubén E. Cedeño | Richard Lozada | Oscar M. Ramírez

35

Evaluación de sistemas de ventilación utilizando la radiación solar

Jovanny Ariel Díaz | Alixelys Caballero | Heizel Chambers

41

***Typha angustifolia L.* evaluada como sustrato sólido orgánico natural para biorremediar agua subterránea contaminada con nitrato**

Euclides M. Deago | Gonzalo E. Pizarro

55

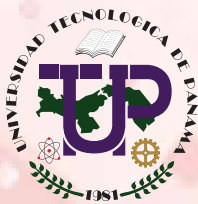
Medidas de intensidad sísmica independientes de la orientación del sensor: Aplicación a una base de datos con acelerogramas de Costa Rica, El Salvador y Nicaragua

Luis A. Pinzón | Diego A. Hidalgo | Lluís G. Pujades

Revista indexada en:



www.latindex.unam.mx



Universidad Tecnológica de Panamá

AUTORIDADES

Dr. Oscar M. Ramírez R.

Rector

Ing. Rubén D. Espitia P.

Vicerrector Académico

Dra. Casilda Saavedra de Madrid

Vicerrectora de Investigación, Postgrado y Extensión

Ing. Esmeralda Hernández P.

Vicerrectora Administrativa

Ing. Luis A. Barahona G.

Secretario General

Lic. Jeremías Herrera D.

Coordinador General de los Centros Regionales

Presentación

La Universidad Tecnológica de Panamá se complace en presentar a la comunidad científica en general la primera edición del año 2015 de la Revista de I+D Tecnológico, correspondiente al volumen 11 número 1.

En esta edición de la Revista de I+D Tecnológico se han incluido trabajos de las áreas de Ahorro Energético, Biorremediación de Aguas Subterráneas, Diseño Estructural, Medio Ambiente, Dinámica de Sistemas y de Sismología.

En el área de Ahorro Energético, el Dr. Jovanny Díaz nos presenta la evaluación del uso de un sistema de ventilación basado en el principio del Bernoulli y en la utilización de energía solar para provocar una diferencia de temperatura y el flujo natural del aire, lo que contribuye a la disminución del consumo de energía proveniente de los combustibles fósiles o del recurso hídrico.

El Dr. Euclides Deago presenta un aporte valioso al tema de la Biorremediación de aguas subterráneas que mantienen altos niveles de contaminación por nitrato, debido al incremento de actividades agrícolas. La investigación muestra los resultados de ensayos de desnitrificación realizados en reactores batch con material detrítico de *T. angustifolia*. Este trabajo aporta conocimientos relevantes sobre el uso de materiales naturales como fuentes alternativas de carbono.

El trabajo de la Ing. Fernanda Candanedo, en el área de Diseño Estructural, compara el diseño sísmico de un edificio de concreto reforzado de seis (6) pisos utilizando una estructura convencional, con respecto al diseño del mismo edificio, pero con una estructura reducida y con un sistema de amortiguadores viscosos lineales. La respuesta de desplazamiento de ambos modelos es evaluada utilizando los procedimientos de ASCE-7-05 para estructuras con sistemas de amortiguamiento y, además, el costo del sistema lateral es comparado.

El Ing. Eduardo Caballero presenta el uso de la dinámica de sistemas como herramienta de gran utilidad para el análisis y obtención de requisitos para un proyecto de software. El trabajo analiza el escenario de la vigilancia de rumores sobre enfermedades infecciosas en medios de comunicación social, específicamente la enfermedad del Dengue y las publicaciones relacionadas con ésta en

Twitter. Además, analiza la inserción de la monitorización de medios de comunicación social (MMCS) como una propuesta para agilizar la vigilancia de rumores en el Departamento Nacional de Epidemiología (DNE) del Ministerio de Salud de Panamá (MINSa).

En el área de estudios del Medio Ambiente, el trabajo presentado por el Lic. Kleveer Espino busca conocer la capacidad fotosintética de especies del sotobosque, mediante el estudio de la asimilación del CO₂ asociada a las diferentes intensidades de luz y establecer su comportamiento estacional. El investigador empleó la radiación fotosintéticamente activa artificial (PAR en inglés) para evaluar la eficiencia fotosintética y la asimilación máxima en dos especies dentro de una parcela circular de 450 m² ubicada dentro del Observatorio de Hidrología Tropical de Cerro Pelado (OHTCP), Gamboa, Panamá.

Por último, el Ing. Luis Pinzón nos presenta un análisis del efecto de direccionalidad en mediciones de intensidad sísmica, entendido como la dependencia de la media geométrica de la respuesta espectral de las componentes horizontales con el ángulo de orientación del instrumento de registro, y la obtención de nuevas medidas independientes del ángulo. Para ello, usa una serie de registros de aceleración ortogonales horizontales, rotados para todos los ángulos no redundantes. Estas nuevas medidas de intensidad del movimiento se aplicaron a una base de datos con acelerogramas de Costa Rica, Nicaragua y El Salvador.

Dr. Humberto Rodríguez del Rosario
Director del Comité Editorial
Junio de 2015

Análisis de la monitorización de medios de comunicación social como proceso para agilizar la vigilancia de rumores usando Dinámica de Sistemas

Eduardo Anel Caballero-Espinosa

Maestría en Ciencias de Tecnología de Información y Comunicación

Universidad Tecnológica de Panamá

eduardo.caballero@utp.ac.pa

Sérgio Crespo C. S. Pinto

Departamento de Computación, Instituto de Ciencia y Tecnología

Universidade Federal Fluminense (UFF)

screspo@id.uff.br

Humberto R. Álvarez A.

Facultad de Ingeniería Industrial

Universidad Tecnológica de Panamá

humberto.alvarez@utp.ac.pa

Nilda Yangüez Cervantes

Facultad de Ingeniería de Sistemas Computacionales

Universidad Tecnológica de Panamá

nilda.yanguez@utp.ac.pa

Resumen – Este artículo presenta la dinámica de sistemas como una herramienta de gran utilidad para el análisis del problema durante la obtención de requisitos para un proyecto de software. En el trabajo analizamos el escenario de la vigilancia de rumores sobre enfermedades infecciosas en medios de comunicación social desde una perspectiva de dinámica de sistemas. Además, analizamos la inserción de la monitorización de medios de comunicación social (MMCS) como una propuesta para agilizar la vigilancia de rumores en el Departamento Nacional de Epidemiología (DNE) del Ministerio de Salud de Panamá (MINSA).

Como una primera aproximación, el modelo está delimitado a la enfermedad del Dengue y a publicaciones en Twitter relacionadas con la enfermedad del Dengue. La metodología de trabajo consiste en una revisión de la literatura, la implementación del método COMPRAM para la definición de problemas sociales y dinámica de sistemas para el modelado del dominio del problema.

Como resultado de la dinámica de sistemas, el diagrama de ciclo causal ilustra las relaciones entre las variables de cuatro escenarios: salud pública, propagación del dengue y alerta sanitaria, medios de comunicación social y la solución

tecnológica que será evaluada. Además, el análisis teórico de nuestro modelo explica por qué la MMCS contribuye positivamente con las autoridades de salud pública en el caso de un brote de una enfermedad infecciosa. Finalmente, los resultados del análisis del problema serán utilizados como insumos en la siguiente actividad de la gestión de requerimientos, la especificación de requisitos.

Palabras claves— Dinámica de Sistemas, dominio del problema, método COMPRAM, obtención de requisitos.

Abstract— This article presents system dynamics as a useful tool for the problem analysis during the requirement elicitation for a software project. We analyzed the rumor surveillance scenario on infectious disease in social media from a system dynamics perspective. In addition, we analyzed the introduction of social media monitoring (SMM) as a proposal to enhance the rumors surveillance in the National Epidemiology Department (DNE) of the Ministry of Health (MINSA).

As a first approach, the model is delimited to Dengue disease and Twitter posts related to Dengue disease. The methodology for this research consists of a literature review, the COMPRAM method implementation for defining social problems and system dynamics for problem domain modeling. As a system dynamics result, the causal loop diagram illustrates the relationships among the variables of four scenarios, such as: public health, the spread of dengue and health alert, social media and technology solution that will be evaluated. In addition, the theoretical analysis of our model explains why the SMM contributes positively to public health authorities in case of an infectious disease outbreak. Finally, the results of the problem analysis will be used as inputs for the next step of managing software requirements, requirements specification.

Keywords— COMPRAM method, problem domain, requirements elicitation, system dynamics.

Tipo de artículo: Original

Fecha de recepción: 1 de septiembre de 2014

Fecha de aceptación: 19 de noviembre de 2014

1. Introducción

La Ingeniería de Software (IS) es la aplicación de un enfoque sistemático, disciplinado y cuantificable

al desarrollo, operación y mantenimiento de software; es decir, la aplicación de la ingeniería al software [1]. En el contexto de la IS, un proceso no es una prescripción rígida sino un enfoque adaptable que permite al equipo de software buscar y elegir el conjunto apropiado de acciones y tareas para el trabajo [1].

A pesar de esa flexibilidad, los equipos de desarrollo de software centran su atención en las etapas de desarrollo e implementación inmediata, esto se debe a la presión ejercida por las restricciones de tiempo y presupuesto. En consecuencia, hay una mínima inversión de tiempo en comprender y analizar el problema real de un negocio, las necesidades de los usuarios e interesados, de ahora en adelante *stakeholders*, y la naturaleza del entorno en el que sus aplicaciones deben madurar [2].

La meta del análisis del problema es ganar un mejor entendimiento del problema a resolver previo a la especificación de requerimientos o al desarrollo de cualquier componente del software [2]. También, esta actividad busca reducir los factores de riesgos futuros relacionados a la gestión de requisitos y a la definición del alcance del proyecto. Estudios revelan que estos factores de riesgo son causas principales en el fracaso de proyectos de software [5, 6, 9, 10, 11]. No obstante, estos estudios no indican cuál es el origen de estos factores, pero no es difícil deducir que el origen es un deficiente o pobre análisis del problema [12].

La dinámica de sistemas es una metodología para el estudio y manejo de sistemas complejos que podemos encontrar en entorno de negocios y sistemas sociales [13, 14]. Además, la dinámica de sistemas proporciona una dirección práctica a la solución de un problema. El objetivo del artículo es analizar desde la perspectiva de dinámica de sistemas los escenarios de salud pública, propagación del dengue y alerta sanitaria, medios de comunicación social y la MMCS como proceso propuesto para agilizar la vigilancia de rumores [16].

El artículo está organizado de la siguiente manera: La sección 2 contiene el marco teórico sobre la dinámica de sistemas, la ingeniería de software en la solución de problemas y el análisis de problemas durante la gestión de requisitos. En la sección 3 se define la metodología de trabajo: definición del problema, definición de variables, formulación de hipótesis, elaboración del diagrama causal, evaluación del modelo y análisis de resultados. Finalmente, la sección 4 presenta las conclusiones y trabajos futuros.

2. Marco Teórico

2.1 La dinámica de sistemas como metodología para el análisis de problemas

La dinámica de sistemas combina la teoría, los métodos y la filosofía para analizar el comportamiento de los sistemas. Además, muestra cómo van cambiando los elementos del sistema a través del tiempo. La dinámica de sistemas como metodología permite desarrollar simuladores que apoyan a la comprensión de la complejidad y formular mejores políticas que serán implementadas en un sistema [13, 14]. También, este enfoque apoya a la adaptación para un aprendizaje acelerado sobre los sistemas.

Un modelo de dinámica de sistemas es una estructura de políticas en interacción. Las políticas son las reglas que determinan la toma de decisiones, estas representan las causas de una acción y no son solamente una norma formal escrita [13, 14].

Un proyecto de dinámica de sistemas comienza con un problema que requiere una solución, o puede iniciar con un comportamiento indeseable que hay que corregir o evitar [13]. El contexto o dominio del problema se establece a través del enfoque de estudio de casos y entrevistas con los involucrados.

Como segundo paso, la metodología de dinámica de sistemas plantea la elaboración de una hipótesis dinámica [13]. Esta hipótesis se presenta a través de un diagrama de ciclo causal (DCC). Los

DCC capturan e ilustran la estructura básica de realimentación que explica el sistema o fenómeno bajo estudio, identifican los mapas mentales de las personas u organizaciones, y sirven de guía para la elaboración y comprensión de los modelos.

Finalmente, el modelo de simulación (flujos y niveles) se construye a partir del DCC que, a su vez, genera decisiones [13].

2.2 La Ingeniería de Software y la solución de problemas

Los ingenieros buscan una solución adecuada a un problema, a menudo mediante ensayo y error, evaluando alternativas en forma empírica con recursos limitados y con conocimiento incompleto [3]. En su forma más simple, el método de la ingeniería incluye cinco pasos: formular el problema, analizar el problema, buscar soluciones, decidir cuál es la solución adecuada y especificar la solución [3].

La Ingeniería de Software es la aplicación de la ingeniería al software y no es algorítmica [1, 3]. La ingeniería de software requiere de experimentación, la reutilización de patrones y la evolución creciente del sistema computacional hacia una solución que sea aceptable para el cliente. El desarrollo de software incluye, por lo general, cinco actividades: obtención de requerimientos, análisis, diseño del sistema, diseño de objetos e implementación [1, 3].

Durante la obtención de requerimientos y el análisis, los ingenieros de software formulan el problema con el cliente y construyen el modelo del dominio de problema [3]. A modo de analogía, la obtención de requerimientos y el análisis corresponden a la formulación y análisis del problema en el método de ingeniería.

2.3 Análisis de problemas durante la gestión de requisitos en Ingeniería de Software

Un problema, según [2, 12], se puede definir como, "...la diferencia entre las cosas tal como se

perciben y las cosas como se desean.”

Otra definición de problema es la que ofrece [15],
 “...discrepancia entre la situación real o próxima y la situación futura deseada y/o la falta de conocimiento y/o la falta de know-how.”

Basados en ambas definiciones, si los usuarios perciben algo como un problema entonces surgen interrogantes como, ¿Es un problema real? ¿Es algo digno de resolver? Algunas veces, la solución más simple es revisar los procesos de negocios en lugar de un nuevo sistema. Según experiencias, cambiar la percepción del usuario sobre el problema permite generar soluciones de alta calidad, rápidas y más baratas. Para los analistas de problemas es importante explorar las alternativas existentes antes de crear un nuevo sistema como la solución final [2].

La meta del análisis del problema es obtener una mejor comprensión del problema antes de iniciar con la especificación de un requisito o desarrollo de algún componente del software. Los pasos específicos para lograr esta meta están descritos en la tabla 1 [2].

Tabla 1. Pasos para el análisis de problemas

#	Paso	Tarea
1	Obtener un acuerdo sobre la definición del problema.	Describir el problema. Identificar los stakeholders afectados por el problema. Describir el impacto sobre los stakeholders y actividades del negocio. Indicar la solución propuesta y beneficios.
2	Comprender las causas fundamentales (el problema detrás del problema).	Implementar técnicas para ganar un mayor entendimiento de las causas del problema.
3	Identificar los stakeholders y los usuarios.	Conocer los usuarios del sistema, el cliente o comprador, afectados por las salidas del sistema evaluador y aprobador del sistema, otros usuarios internos o externos, encargado de mantenimiento y otros.
4	Definir las fronteras de la solución.	Describir el entorno que contiene la solución del sistema. Dividir el mundo en dos: el sistema y las cosas que interactúan con el sistema (actores: usuarios u otro sistema).
5	Identificar las limitaciones impuestas a la solución.	Identificar la fuente de la restricción, describir la restricción y mencionar la base lógica o justificación.

3. Metodología

La metodología diseñada para el estudio está fundamentada en el método COMPRAM [15] y dinámica de sistemas. A continuación detallamos las acciones a ejecutar:

- Revisar la literatura de la teoría de sistemas complejos, dinámica de sistemas, vigilancia e investigación de rumores en salud pública, la enfermedad infecciosa del dengue y MMCS.
- Adquirir información sobre los mecanismos utilizados por el MINSA para la vigilancia de rumores sobre enfermedades infecciosas.
- Definir el problema.
- Definir las variables y sus relaciones.
- Formular las hipótesis: Hipótesis dinámica e hipótesis para los ciclos de realimentación.
- Elaborar el diagrama de ciclo causal (DCC).
- Evaluar el modelo: Comprobar las hipótesis con el diagrama de ciclo causal.
- Analizar los resultados de la evaluación del modelo.
- Obtener los datos para el análisis del problema en Ingeniería de Software, según la tabla 1.

A continuación procederemos a implementar la metodología para el desarrollo de la investigación.

3.1 Definición del problema

Un equipo de investigación conformado por un estudiante y docentes de la maestría científica en Tecnología de la Información y Comunicación de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), en colaboración con la Universidade Federal Fluminense (UFF), realizó una reunión de trabajo con el personal del MINSA para conocer sus necesidades en tecnologías de la información y comunicación (TICs). El personal del MINSA indicó que carecen de una herramienta informática para monitorizar las publicaciones sobre la enfermedad del dengue en Twitter. Esta tarea forma parte del proceso de vigilancia de rumores.

En consecuencia, el equipo de investigación formuló un proyecto de investigación como trabajo

de grado con el objetivo de agilizar la vigilancia de rumores sobre enfermedades infecciosas en los medios de comunicación social. Específicamente, la propuesta consiste en el desarrollo de una arquitectura de software basada en web semántica para la MMCS y capturar las publicaciones sobre el dengue en Twitter.

3.2 Definición de Variables

Como ingenieros de software estamos conscientes de la complejidad de nuestro entorno de trabajo. Por lo tanto, se requiere ampliar el conocimiento sobre el dominio del problema y comprender con mayor precisión el ambiente en el que va a operar la solución tecnológica propuesta para el MINSa.

Para este análisis hemos planteado un modelo con cuatro escenarios en constante cambio con interdependencia [17]. En primer lugar, el escenario de salud pública que involucra conceptos vinculados a la vigilancia e investigación de rumores sobre enfermedades infecciosas. El segundo escenario consiste en la propagación del dengue y la alerta sanitaria. El tercer escenario trata sobre los medios de comunicación social, que por su diversidad, ha sido limitado a la interacción entre los usuarios de la red social de Twitter y a la publicación de información sobre el dengue. Finalmente, el cuarto escenario es la solución tecnológica para la MMCS.

Desde una perspectiva de dinámica de sistemas, la definición de variables y sus relaciones brindan una descripción básica y comprensible de los ciclos de realimentación o relaciones causa-efecto del modelo. No obstante, desde la perspectiva de Ingeniería de Software, esta actividad facilita al ingeniero de requisitos la identificación de los siguientes elementos: los *stakeholders*, el impacto del problema, el impacto de la solución, las fronteras y delimitadores de la solución.

La definición de variables ha sido agrupada por escenario para una mejor comprensión del modelo.

3.2.1 Salud Pública

Eventos confirmados: Casos confirmados de dengue en un paciente, criaderos potenciales, proliferación y presencia de mosquitos.

- Caso confirmado en paciente: Un caso sospechoso probable que es corroborado por laboratorio [28].
- Casos confirmados de criaderos, proliferación y presencia de mosquitos: Casos verificados mediante inspección e identificación de criaderos potenciales con/sin larvas y presencia del mosquito *Aedes Aegypti in situ*.

La variable “eventos confirmados” registra la cantidad de casos verificados por las autoridades de salud en un período determinado y ejerce un balance sobre los reportes no oficiales. Además, contribuye a la preparación y respuesta rápida por parte de las entidades de salud pública.

Investigación de rumores: Procedimiento exhaustivo y estandarizado de búsqueda de información complementaria sobre casos y condiciones relacionadas a eventos de alertas o emergencias [30, 31, 32]. Como segunda variable de observación, las entidades de salud pública investigan los eventos presentados en el “reporte no oficial”.

Preparación y respuesta: Conjunto de acciones que tienen el propósito de disminuir la desinformación o malentendidos en los ciudadanos, informar a los funcionarios de salud pública sobre posibles brotes de enfermedades, promover la preparación y respuesta rápida por las entidades de salud pública [16].

Reportes no oficiales: Registros de eventos no confirmados vinculados a la enfermedad infecciosa del dengue. Circunscrito a nuestro estudio, un reporte no oficial es un conjunto de microblogs filtrados.

3.2.2 Propagación del dengue y alerta sanitaria

Alerta Sanitaria: Actividades de la OMS ante epidemias que tienen por objetivo contener las amenazas para la salud pública mundial

que representan las enfermedades infecciosas emergentes, las epidemias y los agentes infecciosos resistentes a los medicamentos. Ejemplo: Examinar los rumores que surgen y hacer un seguimiento de ellos [23, 24]. Esta variable registra las alertas sanitarias emitidas por el MINSA, producto de la epidemia o casos de dengue que superen el promedio de personas infectadas por año [25, 26].

Criaderos del Mosquito *Aedes Aegypti*: Lugar propicio para la cría del mosquito *Aedes Aegypti*, ejemplos: recipientes desechados con agua limpia (por ejemplo, llantas, recipientes de alimentos y bebidas), drenajes y alcantarillas, vehículos abandonados, oquedades de árboles y rocas [8]. El propósito de esta variable es referenciar los puntos geográficos con mayor índice de contaminación por desperdicios que contribuyan a la proliferación del mosquito *Aedes Aegypti*.

Población con dengue con/sin signos de alarmas: Cantidad de personas que fueron diagnosticadas o que desarrollaron la enfermedad del dengue con/sin signos de alerta en un periodo de tiempo específico [7, 8].

Población con dengue grave: Personas que fueron diagnosticadas o que desarrollaron la enfermedad del dengue grave en un periodo de tiempo específico [7, 8].

Proliferación y presencia del mosquito *Aedes Aegypti*: Multiplicación abundante y presencia del mosquito *Aedes Aegypti* debido a las condiciones favorables del entorno. Esta variable en particular, mide la capacidad de reproducción del mosquito *Aedes Aegypti* en Panamá.

Riesgo de Infección: Probabilidad de que una enfermedad ocurra. El riesgo mide el número de nuevos casos que desarrollan una enfermedad entre las personas de una población en riesgo sobre un periodo de tiempo específico [35]. El riesgo de infección está influenciado por las personas infectadas con la enfermedad del dengue, proliferación y presencia del mosquito *Aedes Aegypti*.

Total de Casos de Dengue: Total de personas que fueron diagnosticadas o que desarrollaron la enfermedad del dengue con/sin signos de alerta y dengue grave en un periodo de tiempo específico.

3.2.3 Redes Sociales

Divulgación de rumores en Twitter: Divulgar, según [27], consiste en publicar, extender, poner al alcance del público algo. En el contexto de la investigación, divulgar un rumor en Twitter significa: "publicar o poner al alcance del público en tiempo real, eventos vinculados a la enfermedad del dengue utilizando la red social Twitter". Este proceso se convierte en una de las tres variables importantes del modelo porque describe la función principal de la red social Twitter: diseminar información en tiempo real. Donde, los rumores sobre la enfermedad del dengue y la interacción entre los usuarios generan tráfico en la web mediante los microblogs generados (tweets).

Incertidumbre en la Población- Se define como la imperfección en el conocimiento sobre el estado o los procesos de la naturaleza [29]. La incertidumbre en la población es el resultado o producto de la desinformación general durante una emergencia o situación de crisis.

Microblogs generados: Conjunto de microblogs publicados por los usuarios de Twitter a nivel mundial. En términos estadísticos, los microblogs generados representan el espacio muestral.

Rumores sobre la enfermedad del Dengue: Comentarios espontáneos no confirmados provenientes de la comunidad, sus líderes o a través de los medios masivos de comunicación o redes sociales, asociados a la aparición de casos o muertes no percibidas anteriormente [30]. En nuestro caso, la definición incluye casos relacionados con criaderos potenciales, proliferación y presencia de mosquitos *Aedes Aegypti*.

Usuarios de la Red Social Twitter: Subconjunto de usuarios de redes sociales que implementan la red social Twitter para divulgar rumores sobre la enfermedad infecciosa del dengue.

3.2.4 Solución Tecnológica

Arquitectura de Software basada en Agentes de Software y Ontología: Ambas variables conforman los componentes estándares de la Web Semántica [18] y serán implementados en el diseño y desarrollo de la arquitectura de software.

Un Agente de Software es una entidad de software que, basándose en su propio conocimiento, realiza un conjunto de operaciones para satisfacer las necesidades de un usuario o de otro programa, ya sea de manera autónoma o mediante una solicitud del usuario o programa [19]. Una Ontología es la especificación de una conceptualización [20, 21, 22]. En el contexto de conocimiento distribuido, una ontología es una descripción explícita y formal de una conceptualización compartida.

Marco legal: Conjunto de leyes, convenios, acuerdos, planes estratégicos u otros documentos en cuyo contenido, existe referencia que respalda el desarrollo e implementación de una solución tecnológica en el sector de salud pública. Ejemplos: PENCYT 2010-2014 de SENACYT [33] y el Marco Estratégico para la Prevención de Enfermedades Infecciosas del CDC [34].

Microblogs significativos: Subconjunto de microblogs resultantes de la MMCS para la adquisición de datos. En términos estadísticos, los microblogs filtrados son los eventos esperados.

Monitorización de Medios Comunicación Social: Proceso que permite conocer el contenido en las redes sociales, blogs, foros, microbloggings y Wikis [4]. Este proceso abarca dos subprocesos: adquisición de datos y análisis de datos. El monitoreo de medios sociales es la tercera variable que describe el funcionamiento de la solución a la problemática existente en el MINSa. El proceso tiene como entrada un conjunto de microblogs generados por usuarios de la red social Twitter y la salida es un subconjunto de microblogs filtrados según las restricciones establecidas.

La siguiente sección consiste en la formulación de la hipótesis dinámica e hipótesis para los ciclos de realimentación del modelo.

3.3 Formulación de la hipótesis dinámica e hipótesis de los ciclos de realimentación

La hipótesis dinámica plantea una forma de internalizar cómo la MMCS genera información útil a partir de los microblogs de Twitter para que el personal del MINSa inicie con la investigación de rumores. Finalmente, las acciones derivadas de la investigación de rumores buscan determinar la veracidad esos rumores publicados en Twitter y reducir la incertidumbre en la población a través de una respuesta rápida.

Con el propósito de analizar detalladamente el modelo, cuatro hipótesis han sido formuladas para los ciclos de realimentación R2, R3, B1 y B2, ver tabla 2. Es importante indicar que R1 no requiere una hipótesis porque es un proceso verificado [36].

Tabla 2. Hipótesis para los ciclos de realimentación

#	Hipótesis
1	La red social Twitter es una fuente constante de rumores sobre eventos relacionados a enfermedad infecciosa del dengue en Panamá
2	Una solución tecnológica para la vigilancia de rumores en medios sociales, agiliza la recopilación de rumores divulgados sobre la enfermedad del dengue en la red social Twitter.
3	La investigación de rumores es beneficiada con los reportes no oficiales provenientes del monitoreo de medios sociales.
4	La preparación y respuesta rápida de las entidades de salud pública contribuye a la eliminación de criaderos del mosquito Aedes Aegypti en la comunidad.

La siguiente sección presenta el desarrollo del diagrama de ciclo causal y la interacción entre las variables.

3.4 Elaboración del Diagrama de Ciclo Causal (DCC)

Un DCC debe ‘contar’ una historia para que el modelador y los espectadores la entiendan. Cuando el DCC no es comprensible, esto indica que el diagrama ha sido desarrollado de una forma inadecuada. Por lo tanto, el DCC debe ser muy transparente. Debido a la diversidad de conceptos

involucrados en el estudio, el DCC será analizado por ciclos de realimentación.

La figura 1 presenta el DCC o hipótesis dinámica con las relaciones causa-efecto entre las variables. Este modelo ilustra detalladamente el entorno de trabajo y el impacto al incluir la MMCS. También, el DCC facilita la interpretación cualitativa para cada ciclo de realimentación.

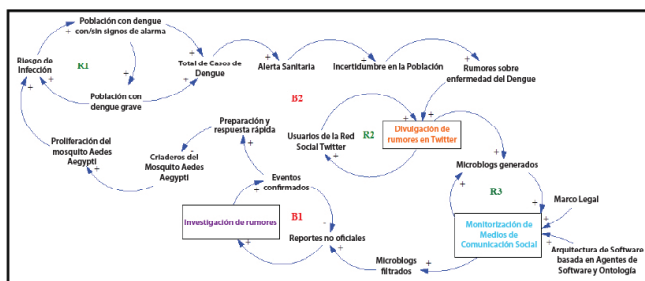


Figura 1. Diagrama de ciclo causal o hipótesis dinámica.

3.5 Evaluación del modelo

Un sistema complejo es aquel que cuenta con ciclos múltiples. Esto quiere decir que el sistema debe contar con más de tres ciclos realimentadores. Estos ciclos pueden ser positivos o negativos; los positivos o autorreforzadores son los que generan el proceso de crecimiento; los negativos o autocorrectivos son los que buscan regular el sistema o generar un balance para conseguir el objetivo. Entonces, el entorno de trabajo modelado con el DCC es un sistema complejo porque tiene cinco ciclos realimentadores. Finalmente, el DCC o hipótesis dinámica consta de cinco ciclos: tres de ellos son autorreforzadores y dos son autocorrectivos.

A continuación examinamos cada ciclo en paralelo con la comprobación de las hipótesis.

3.5.1 Ciclos de autorreforzamiento y comprobación de hipótesis

El primer ciclo -R1- indica que a mayor cantidad de personas con la enfermedad del dengue (con/sin signos de alarma o grave), aunado a la proliferación y presencia del mosquito *Aedes Aegypti*, entonces el riesgo de infección incrementa y la alerta sanitaria

se mantiene activada. A pesar de que R1 no tiene hipótesis, este ciclo fue incluido para profundizar en el proceso de propagación de la enfermedad y su relación con los demás escenarios.

El segundo ciclo de -R2-, ver figura 2, muestra que la activación de una alerta sanitaria provoca incertidumbre en la población y esto conlleva a la generación de rumores entre la población. Considerando que en Centroamérica, el 28 % de los usuarios de las redes sociales usan el Smartphone como medio de conexión a Internet y que en Panamá existen 270,000 usuarios de Twitter [37, 38], podemos indicar que la interacción en esta red social puede ser más fuerte y contribuir a la divulgación de esos rumores, incrementando la generación de contenido en Twitter -tweets y retweets-. Este ciclo también permite deducir que la cantidad de publicaciones diarias y la frecuencia de las publicaciones presentan un comportamiento impredecible. Por lo tanto, la hipótesis 1 es demostrada en el ciclo R2.

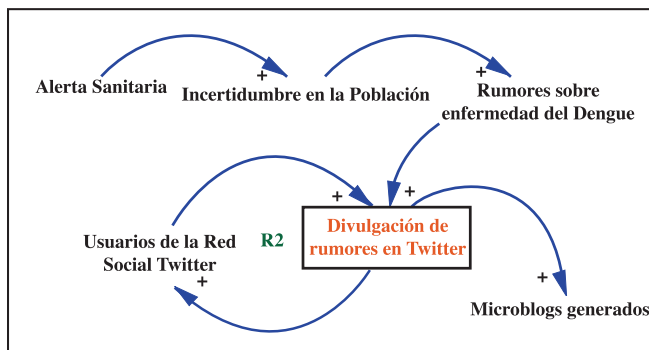


Figura 2. Ciclo de reforzamiento R2.

El ciclo -R3- representa la capacidad de la MMCS como un proceso que se ajusta a la necesidad del MINSA. Este ciclo indica que, a mayor cantidad de tweets generados por los usuarios de Twitter y el uso de una arquitectura de software basada en web semántica, incrementa la obtención de tweets significativos para la generación de reportes no oficiales con rumores sobre el Dengue, ver figura 3. Además, un marco legal que impulse y propicie

el desarrollo de la propuesta es fundamental. Finalmente, la hipótesis 2 se cumple porque la solución puede agilizar la vigilancia de rumores.

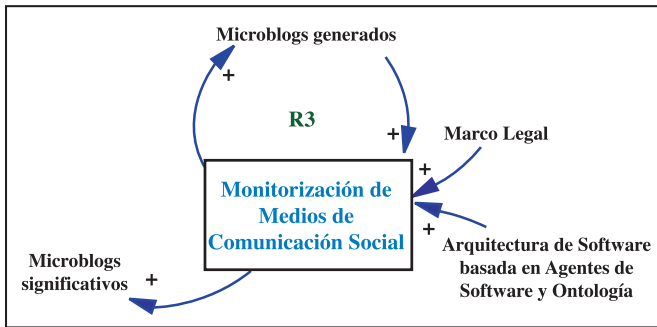


Figura 3. Ciclo de reforzamiento R3.

3.5.2 Ciclos de balance o autocorrectivo y comprobación de hipótesis

El ciclo -B1-, ver figura 4, indica que las autoridades de salud pública obtendrán reportes no oficiales con rumores sobre el Dengue para determinar su veracidad a través de la investigación de rumores, incidiendo positivamente en la preparación y repuesta rápida ante criaderos o casos de dengue. En consecuencia, estas acciones deben disminuir: la proliferación y presencia del mosquito, el riesgo de infección y la incertidumbre en la población. De esta manera, la hipótesis 3 queda demostrada.



Figura 4. Ciclo de balance B1.

Por último, el segundo ciclo de balance -B2- presenta el balance general del modelo, ver figura 5, donde el incremento de los eventos confirmados incide positivamente en la preparación y repuestas

rápida de las autoridades de salud. Como caso ilustrativo, si el MINSA recibe un reporte con rumores sobre criaderos del mosquito *Aedes Aegypti* entonces una de las acciones que debe ejecutarse es la eliminación de esos criaderos porque disminuye: la proliferación y presencia del mosquito, el riesgo de infección, la incertidumbre y la generación de rumores. Por lo tanto, la hipótesis 4 queda demostrada.

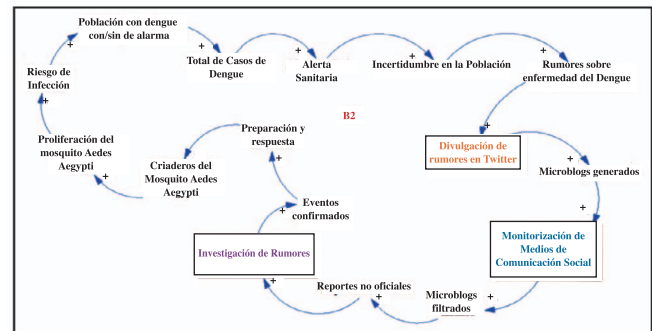


Figura 5. Ciclo de balance B2.

3.6 Análisis de los resultados

Basados en la hipótesis dinámica y análisis teórico de los ciclos de realimentación por escenario, podemos indicar que la MMCS debe:

- Disminuir el tiempo de adquisición de datos desde Twitter,
- Automatizar la generación de reportes no oficiales,
- y
- Agilizar la investigación de los rumores reportados.

También, el modelo ha permitido confirmar que la MMCS puede ser de gran utilidad en la vigilancia de rumores sobre enfermedades infecciosas, como es el caso del dengue.

No obstante, la MMCS como propuesta para atender la necesidad del MINSA, también requiere de otros criterios para que la vigilancia de rumores sea más efectiva. Los criterios han sido agrupados por escenario.

- Salud Pública: Definir metas para la vigilancia de rumores como parte de un sistema de alerta en el que cada rumor amerite una investigación

para determinar su veracidad.

- **Redes Sociales:** Proponer políticas que promuevan y regulen el uso de redes sociales en la divulgación de información sobre enfermedades infecciosas durante una alerta sanitaria.
- **Solución Tecnológica:** Delegar responsabilidades para la MMCS y gestión de una base de datos de rumores.

En cuanto al análisis del problema desde la perspectiva de gestión de requisitos, la Tabla 3 presenta los datos preliminares obtenidos de la evaluación del DCC.

Tabla 3. Resultados del análisis del problema

Elementos	Descripción		
Afectados	Analistas del Departamento de Epidemiología del MINSA		
Impacto del problema	El método actual para la vigilancia de rumores en Internet no es factible con el buscador de Google. El analista debe procesar manualmente un gran volumen de información generada diariamente en la web. Esto incluye las publicaciones.		
Solución	La MMCS con una arquitectura de software basada en componentes de web semántica.		
Beneficios de la solución	<ul style="list-style-type: none"> • Disminuir el tiempo en el proceso de adquisición de datos • Automatizar de la generación de reportes no oficiales. • Agilizar el inicio de la investigación. 		
Interesados (Stakeholders)	<ul style="list-style-type: none"> • MINSA - Departamento de Epidemiología • ICGES - Dirección de Investigación y Desarrollo Tecnológico 		
Beneficiarios	Directos: Analistas de datos de la sección de Vigilancia Epidemiológica del MINSA Indirectos: Población Panameña		
Fronteras de la solución	Usuarios finales: Analistas de datos de la sección de Vigilancia Epidemiológica del MINSA Función de los actores: Búsqueda, clasificación, almacenamiento de tweets y generación de reporte. Entrada del sistema: Palabras claves para la búsqueda de twitter y clasificar tweets en la base de datos Salida del sistema: Reporte de rumores (Tweets clasificados)		
Delimitadores	Fuente	Restricción	Explicación
	Entorno	Enfermedad del dengue	Alerta sanitaria en Panamá debido a los altos índices de infestación recientes.
	Entorno	Red social de Twitter	Generador y proveedor de datos
	Sistemas	Busqueda de datos MySQL	Compatibilidad con la base de datos del Sistema de Información para la Vigilancia Epidemiológica del MINSA (SISVIB)

4. Conclusiones y trabajos futuros

La Dinámica de Sistemas es una metodología científica estructurada para comprender el comportamiento de un sistema y la interacción entre sus variables. El modelado del entorno de trabajo y el análisis del impacto de la MMCS para agilizar la vigilancia de rumores, han permitido generar criterios a nivel operativo y administrativo como aporte para las bases de la salud pública en Panamá.

Considerando que los resultados de este estudio preliminar son interpretativos, la MMCS puede disminuir el tiempo de adquisición de datos desde Twitter, automatizar la generación de reportes no oficiales y agilizar la investigación de rumores. Todos estos beneficios impactan positivamente en la preparación y respuesta rápida del MINSA durante una crisis sanitaria debido a una enfermedad infecciosa.

Además, la dinámica de sistemas contribuyó significativamente en el análisis del problema desde la perspectiva de gestión de requisitos y a la comprensión del entorno en el que interactuará la arquitectura de software como herramienta para la MMCS.

Como trabajo futuro, sugerimos desarrollar un Diagrama de Flujos y Niveles para simular numéricamente el modelo desarrollado [39]. Además, sugerimos utilizar los datos de la simulación para sustentar cuantitativamente las proyecciones futuras sobre los beneficios e impacto de implementar la MMCS en la vigilancia de rumores.

Reconocimiento

Este trabajo fue desarrollado durante el programa de Maestría Científica en Tecnologías de la Información y Comunicación, con el financiamiento de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Panamá (SENACYT) y la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP).

Referencias Bibliográficas

- [1] Pressman, R. S (2010) Ingeniería del Software. Un Enfoque Práctico (7maEd.). McGraw-Hill: España.
- [2] Leffingwell, D., & Widrig, D. (2003). Managing software requirements: a use case approach. Pearson Education.
- [3] Bruegge, B., Dutoit, A. H., Hirales, R. G., López, M. R. C., & González, M. A. D. (2002). Ingeniería del software orientado a objetos. Pearson Educación.
- [4] Johansson, F., Brynielsson, J., & Quijano, M. N. (2012, August). Estimating citizen alertness in crises using social media monitoring and analysis. In Intelligence and Security Informatics Conference (EISIC), 2012 European (pp. 189-196). IEEE.
- [5] El Emam, K., & Koru, A. G. (2008). A replicated survey of IT software project failures. *Software, IEEE*, 25(5), 84-90.
- [6] May, L. J. (1998). Major causes of software project failures. *CrossTalk: The Journal of Defense Software Engineering*, 11(6), 9-12.
- [7] Organización Panamericana de la Salud (OPS)/ Organización Mundial de la Salud (OMS), "DENGUE - Guías de atención para enfermos en la región de las Américas", La Paz, Bolivia, 2010. Disponible en: http://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=264&Itemid=363. Última revisión: 12 de diciembre de 2013
- [8] Organización Mundial de la Salud (OMS), "DENGUE - GUÍAS PARA EL DIAGNÓSTICO, TRATAMIENTO, PREVENCIÓN Y CONTROL", La Paz, Bolivia, 2009. Disponible en: http://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=264&Itemid=363. Última revisión: 12 de diciembre de 2013
- [9] Wallace, L., & Keil, M. (2004). Software project risks and their effect on outcomes. *Communications of the ACM*, 47(4), 68-73.
- [10] Jones, C. (2006). Social and technical reasons for software project failures. STSC Cr0ssTalk June.
- [11] Keil, M., Cule, P. E., Lyytinen, K., & Schmidt, R. C. (1998). A framework for identifying software project risks. *Communications of the ACM*, 41(11), 76-83.
- [12] Mingers, J. (2014). Taming hard problems with soft OR. The Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS) will hold exams for its Certified Analytics Professional program according to the following schedule.
- [13] Forrester, J. W. Diseñando el futuro, 15 de diciembre de 1998, conferencia en la Universidad de Sevilla. Sevilla, España.
- [14] Senge Peter, M. (1990). La quinta disciplina: cómo impulsar el aprendizaje en la organización inteligente. Granica.
- [15] DeTombe, D.J. (1994) Defining complex interdisciplinary societal problems. A theoretical study for constructing a cooperative problem analyzing method: the method COMPRAM. Amsterdam: Thesis publishers Amsterdam (thesis), 439 pp. ISBN 90 5170 302-3
- [16] Samaan, G., Patel, M., Olowokure, B., Roces, M. C., & Oshitani, H. (2005). Rumor surveillance and avian influenza H5N1. *Emerging infectious diseases*, 11(3).
- [17] Lichtenstein, B. M. B. (2000). Emergence as a process of self-organizing-New assumptions and insights from the study of non-linear dynamic systems. *Journal of Organizational Change Management*, 13(6), 526-544.
- [18] Peis, E., Herrera-Viedma, E., Hassan, Y., & Herrera, J. C. (2003). Ontologías, metadatos y agentes: recuperación "semántica" de la información.
- [19] Hípola, P., & Vargas, B. (2005). Agentes Inteligentes: Definición y Tipología. *Revista Internacional Científica y Profesional*.
- [20] Gruber, T. (1993). What is an Ontology.
- [21] Gaona, A. B. A. UN PASEO POR LOS FUNDAMENTOS DE LAS ONTOLOGÍAS.
- [22] Moreno, D. A., Acevedo, J. F., & Giraldo, G. L. (2011). Una ontología para la representación de conceptos de diseño de software. *Revista Avances en Sistemas e Informática*, 8(3), 103-110.
- [23] OMS. (2006). "Trabajar en pro de la salud". Disponible en: http://www.who.int/about/brochure_es.pdf. Último acceso: 04/15/2014
- [24] OMS. (2001). "Seguridad sanitaria mundial: alerta y respuesta ante epidemias". Disponible en: http://apps.who.int/gb/archive/s/s_wha54.html. Último acceso: 04/15/2014
- [25] Brooks, G. F., Carroll, K. C., Butel, J. S., & Morse, S. A. (2005). Microbiología médica de Jawetz, Melnick e Adelberg. McGraw Hill Brasil.
- [26] Prescott, L. M. H. (2004). Microbiología, Lansing M. Prescott, John P. Harley, Donald A. Klein.
- [27] Real Academia Española de la Lengua, (2001). "Diccionario de la Lengua Española". 22.ª edición. Disponible en: <http://lema.rae.es/drae/>. Última revisión: 15 de noviembre de 2001
- [28] OPS-OMS, Colombia. "Módulo de Vigilancia Epidemiológica", Disponible en: <http://www.col.ops-oms.org/Municipios/defcasos.htm>. Último acceso: 04/26/2014
- [29] Caddy, J. F., & Mahon, R. (1996). Puntos de referencia para la ordenación pesquera (Vol. 347). Food & Agriculture Org. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/v8400s/v8400s05.htm#TopOfPage>
- [30] OPS-Campus Virtual de Salud Pública. (2011). "Funciones esenciales de Salud Pública - Estrategias claves en salud pública". Disponible en: http://cursos.campusvirtualsp.org/pluginfile.php/32591/mod_resource/content/0/Modulo_4_Estrategias/Material_principal/vigilancia_de_la_salud_publica.pdf
- [31] Western, K. A. (1982). Vigilancia epidemiológica con posterioridad a los desastres naturales (Vol. 420). Organización Panamericana de la Salud. Disponible en: <http://helid.digicollection.org/es/d/J062/4.4.1.html>
- [32] LOCAL, G. P. E. N. (2002). Vigilancia epidemiológica sanitaria en situaciones de desastre. Organización Panamericana de la Salud. Disponible en: <http://helid.digicollection.org/en/d/Js2922s/5.html>
- [33] Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, "Plan Estratégico Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 2010-2014 (PENCIYT)", 2010
- [34] CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (2011), "A CDC FRAMEWORK FOR PREVENTING INFECTIOUS DISEASES - Sustaining the Essentials and Innovating for the Future", Disponible en: <http://www.cdc.gov/oid/docs/ID-Framework.pdf>

- [35] Aschengrau, A., & Seage, G. (2013). *Essentials of epidemiology in public health*. Jones & Bartlett Publishers.
- [36] Henchal, E. A., & Putnak, J. R. (1990). The dengue viruses. *Clinical microbiology reviews*, 3(4), 376-396. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC358169/?tool=pmcentrez>
- [37] iLifebelt, "Estudio de Redes Sociales en Centroamérica 2013", disponible en: <http://ilifebelt.com/estudios-rsca/>, Última revisión: septiembre 2013
- [38] Datos estadísticos de las Redes Sociales en Panamá 2013, Disponible en: <http://www.latamclick.com/2014/01/datos-estadisticos-de-las-redes-sociales-panama-2013.html>, Última revisión: septiembre 2013
- [39] Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world* (Vol. 19). Boston: Irwin/McGraw-Hill.

Asimilación de CO₂ en dos especies de plantas de un bosque húmedo tropical de Cerro Pelado, Gamboa

Kleever Espino

Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
kleever.espino@utp.ac.pa

José R. Fábrega D.

Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
jose.fabrega@utp.ac.pa

Resumen— En el sotobosque de los bosques tropicales, la radiación incidente está delimitada por la cobertura boscosa, que filtra la luz. Este trabajo emplea la radiación fotosintéticamente activa artificial (PAR en inglés) para evaluar la eficiencia fotosintética y la asimilación máxima en dos especies dentro de una parcela circular de 450 m² ubicada dentro del Observatorio de Hidrología Tropical de Cerro Pelado (OHTCP), Gamboa, Panamá. El OHTCP consiste en una micro Cuenca experimental de 16.4 Hectáreas, con una precipitación anual total de aproximadamente 2100 mm. Las mediciones de la asimilación de CO₂ se realizaron entre las 10:00 y 14:30 horas, de junio de 2012 a noviembre de 2013, a temperatura ambiente (28-32 °C), humedad relativa entre 70-90 %, y presión de 1 atmósfera. Las intensidades de luz variaron entre 0 a 500 de PAR, para un flujo de 100 μmoles de CO₂. Condiciones de luz constante fueron simuladas con una luz LED 6400-02B. Las especies estudiadas fueron *Rinorea sylvatica* y *Oenocarpus mapora*. *Rinorea sylvatica* presentó una eficiencia fotosintética máxima de 4.12 μmol de CO₂/m²s, mientras que *Oenocarpus mapora* registró 3.70 μmol de CO₂/m²s (época lluviosa). Estas especies registraron valores de asimilación máximos de 3.82 y 3.29 μmol de CO₂/m²s (época seca). Para ambas especies se establecieron puntos de compensación fotosintética (Ic) sin asimilación neta de CO₂. Al disminuir la conductancia intracelular la asimilación neta de CO₂ aumenta. Estos resultados preliminares indican

que ambas especies presentan Ic por debajo de 100 μmol de fotones/m²s y relaciones de A vs PAR, r²= 0.99.

Palabras Claves— Fotosíntesis, Carbono, Capacidad estomática, Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR), Punto de compensación, Concentración intra-celular, Cerro Pelado Gamboa.

Abstract— In the understory of tropical rainforest, the incident radiation is limited by light filtered by the forest cover. This work employs artificial photosynthetic active radiation (PAR) to evaluate the photosynthetic efficiency and the maximum assimilation in two species within a 450 m² circular plot located at the Cerro Pelado Tropical Hydrology Observatory (CPTHO) in Gamboa, Panamá. The CPTHO consists in an 16.4 Ha experimental microbasin, with an annual precipitation of approximately 2100 mm. The measurements of CO₂ assimilation were taken between 10:00 and 14:30 hours, since June 2012 until November 2013, with a temperature of (28-32 °C), relative humidity between 70-90%, and 1 atmosphere. Light intensities varies from 0 to 500 of PAR, for a CO₂ flow of 100 μmoles. Constant light conditions were simulated with a LED 6400-02B. The species studied were *Rinorea sylvatica* and *Oenocarpus mapora*. *Rinorea sylvatica* presented a maximum photosynthetic efficiency of 4.13 mol CO₂/m²s, while *Oenocarpus mapora*

3.70 $\mu\text{mol de CO}_2/\text{m}^2\text{s}$ (wet season). These species registered maximum assimilation values of 3.82 and 3.29 $\mu\text{mol de CO}_2/\text{m}^2\text{s}$ (dry season) Both species established photosynthetic compensation points (I_c) without net assimilation of CO_2 . Lower intracellular conductances, correspond to higher net CO_2 assimilation. These preliminary results indicates that both species show I_c below 100 $\mu\text{mol of photons}/\text{m}^2\text{s}$. and A vs PAR relationships with a $r^2 = 0.99$.

Keywords— Photosynthesis, Carbon, Estomac Capacity, Photosynthetic Active Radiation (PAR), Compensation point, Intracellular concentration, Cerro Pelado Gamboa.

Tipo de artículo: Original

Fecha de recepción: 3 de septiembre de 2014

Fecha de aceptación: 19 de noviembre de 2014

1. Introducción

La fotosíntesis es un proceso que permite la asimilación de CO_2 que representa la base de la productividad de un ecosistema, a partir de aquí se da la acumulación de nutrientes en distintas partes de la planta [1-2].

Los bosques tropicales se caracterizan por diferentes intensidades lumínicas que van desde condiciones de sombra en el sotobosque, hasta intensidades lumínicas muy altas en los claros y en el dosel. [3-4]. Dentro del bosque, la calidad y cantidad de luz varían espacialmente y temporalmente a diferentes escalas; en un sotobosque, bajo dosel cerrado, las intensidades de luz son extremadamente bajas en la mayor parte del día, lo que hace que la capacidad fotosintética y las tasas de crecimiento de las plantas sean bajas. [5]. La fotosíntesis es un proceso fisiológico de los organismos con clorofila, que permite la asimilación de CO_2 ; representa la base de la productividad de un ecosistema, a partir de aquí se dará la acumulación de nutrientes en distintas partes de la planta.

Las plantas usan la energía lumínica procedente del sol, el CO_2 atmosférico y agua para realizar la fotosíntesis, y así formar su biomasa la cual se acumula en troncos, ramas, corteza, hojas y raíces.

Las plantas como todo ser vivo también emiten CO_2 mediante la respiración, pero en cantidades menores con un balance negativo, contribuyendo de manera significativa a la disminución del CO_2 atmosférico. La fotosíntesis se divide en dos etapas: Fase lumínica o electroquímica y fase oscura o química, desarrollándose ambas en estructuras especializadas de la hoja.

Durante la fase lumínica la energía está asociada a los fotones; comprendida en el espectro de luz visible (400-700 nm), es capturada por los pigmentos fotosintéticos y transformada en energía y ésta a su vez, en moléculas con poder reductor en forma de NADPH+ H^+ y energía química del enlace del ATP y oxígeno molecular a partir de moléculas de agua por reacciones denominada fotólisis.

La capacidad de las plantas de acumular carbono dependerá de la capacidad fotosintética de las especies y la intensidad de luz, sin embargo las plantas del sotobosque de las selvas tropicales se encuentran creciendo en condiciones de baja intensidad de luz. [6-7].

Sin embargo, en las regiones tropicales la radiación fotosintéticamente activa (PAR) está alrededor de 1800 $\mu\text{mol de fotones}/\text{m}^2\text{s}$, pero dentro del sotobosque sólo se recibe de un 4 al 10 % de la radiación [8].

Por otro lado se ha encontrado que el aumento en el CO_2 atmosférico es debido al crecimiento de especies agrícolas y otras actividades del hombre [9]. La concentración de CO_2 atmosférico de acuerdo al IPCC para noviembre de 2012 estaba alrededor de 392 ppm. [10-11]. Estos valores son preocupantes, si consideramos que las concentraciones, por el orden de 350 $\mu\text{mol de CO}_2$ imponen un límite para la asimilación en plantas C3 [12-15].

La capacidad de las plantas de acumular carbono dependerá de otros factores como la temperatura, intensidad de luz, concentración atmosférica entre otros [16-18].

La tasa de asimilación (A) depende, obviamente del flujo de fotones fotosintéticos (PAR o PPFD)

que son absorbidos por la hoja. La respuesta a la luz se caracteriza por una curva que presenta diferentes fases que se corresponden con otras tantas condiciones ambientales. [19].

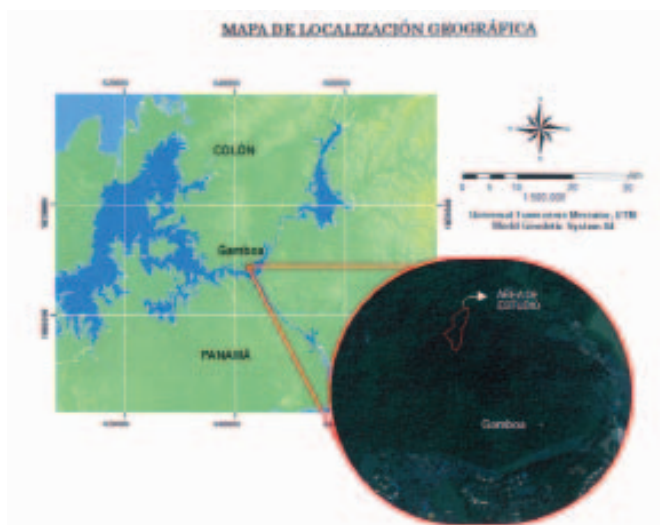


Figura 1. Localización regional del área de estudio de asimilación de CO₂. (Serrano, Nuñez, 2009).

2. Materiales y Métodos

2.1 Sitio de estudio

La investigación presentada se realiza en el Observatorio de Hidrología Tropical de Cerro Pelado (OHTCP), Gamboa. Esta zona se caracteriza por tener bosques húmedos tropicales ubicados en la cuenca hidrográfica del canal de Panamá. El OHTCP es utilizado para realizar investigaciones relacionadas al ciclo del agua y carbono, debido a que representa características de bosque húmedo tropical [20], es un área de fácil acceso. (Ver figura 1). Consiste en una colina bastante pronunciada que asciende abruptamente de 30 a 223 metros sobre el nivel del mar (msnm). Durante las operaciones tempranas del Canal (1920 o más tarde), Cerro Pelado fue claramente cortado en su altitud. Éste posee vegetación de crecimiento secundario. El mismo cuenta con una torre de observaciones meteorológicas, en cuya vecindad dominan

árboles que alcanzan entre los 25 y 35 metros de altura. Además de estos árboles predominantes, hay algunas especies de palmas que alcanzan los 25 metros de altura que, combinados con árboles caducos emergentes, forman la capa de cubierta secundaria. Algunas palmas más pequeñas y arbustos de unos cuantos metros se pueden ver en diferentes grados en las pendientes. [21].

En cuanto al clima, la temperatura mínima promedio es de 20.5° C y la máxima alrededor de los 32° C. La precipitación promedio anual alcanza 3 500 mm y su régimen climático se caracteriza por una prolongada estación lluviosa de casi ocho (8) meses. La topografía es muy variada, observándose terrenos prácticamente planos (0-3 %), lomas ligeramente onduladas (3-15 %) y terrenos marcadamente inclinados, con pendientes entre un 30 y 60 %. El área usada en las mediciones de carbono en plantas está en una zona de bosque próximo a la parcela permanente, en el cual se realizó otro inventario forestal para determinar la abundancia relativa de especies predominantes en la zona de estudio dentro de la parcela permanente desarrollada.

Este trabajo busca conocer la capacidad fotosintética de especies del sotobosque, mediante el estudio de la asimilación del CO₂ asociada a las diferentes intensidades de luz (PAR) y establecer su comportamiento estacional. Estos antecedentes muestran la relevancia de este estudio para generar información importante para el manejo adecuado de los sumideros de carbono y para la conservación de los bosques y la disminución del CO₂ ambiental.

2.2 Equipos y protocolos de medición

Para el presente estudio se realizó un inventario de una parcela circular de 450 m² en Cerro Pelado, Gamboa. Se utilizó como punto de referencia central, el árbol de mayor tamaño (*Luehea seemanii*), para proceder a identificar e inventariar la flora existente.

De aquí, se establecieron las dos especies de

arbustos más predominantes. (tabla 1). Para estas especies se realizaron mediciones de flujo de carbono a través del cálculo de la medición de la tasa de asimilación de CO₂ en función de la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR).

Se utilizaron hojas maduras de la parte superior de las plantas, las cuales se encontraban influenciadas por la cantidad de sombra producto de las copas de los árboles de mayor elevación ubicados próximos a las especies estudiadas, básicamente dependían de los destellos de luz solar que penetraban hacia el interior del sotobosque durante el período de aproximadamente 12 horas.

Para la medición de CO₂ en plantas se empleó el equipo de intercambio de gases LI-COR 6400XT (Previamente calibrado de acuerdo a las especificaciones del fabricante), el cual cuantifica la asimilación del CO₂ y tiene la capacidad de suministrar la cantidad de radiación incidente a través de un sensor de radiación interno.

El LI-COR 6400 XT es un analizador de intercambio de gases para la medición de fotosíntesis, fluorescencia y respiración de suelo. Para la medición de fotosíntesis, bajo el dosel del bosque fue necesaria la adaptación de una cámara de luz roja-azul 6400-02B de 2 x 3 cm. (Li-Cor).

Durante el proceso de medición, el analizador de gases permite cuantificar la cantidad de CO₂ absorbido por la planta y describe la relación que se presenta con las variaciones de intensidades (PAR). El LI-6400XT utiliza un motor para mover el CO₂ a través de la cámara que permite la inyección constante de una cantidad fija de CO₂ hacia las estomas de la planta para el intercambio de gases procedentes del ambiente o en su defecto suministrado por cilindros de CO₂ para asegurar un flujo constante de dicho gas [22].

Después de cada medición, los datos son descargados y utilizados para calcular la asimilación neta de flujo de CO₂ por parte de las plantas. Este equipo también tiene la capacidad de medir la cantidad de luz natural procedente del

sol a través de un sensor quantum, sin embargo por las características propias de la zona (muchas sombras), fue necesario emplear luz artificial con longitudes de onda entre 400 y 700 nm para simular condiciones naturales.

Mediciones de Flujo de Carbono en plantas. Las mediciones se realizaron en las especies antes indicadas entre las 10:00 y las 14:00 horas y con humedad relativa entre los 70 y 95 %, y a un flujo de 100 μmol de CO₂.

Se realiza la calibración del equipo, lo cual consiste en establecer el control de parámetros como cantidad de agua y flujo de CO₂ a través de los analizadores de gases (Irgas), intensidades de luz (Cantidad de Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR)). Se programa el equipo para realizar las mediciones de asimilación neta de CO₂ y otros parámetros de interés.

Luego de realizado el procedimiento descrito en el párrafo anterior, se coloca la hoja de la especie a medir en la cámara de 2 x 3 cm, de luz roja-azul, con un flujo constante de 100 μmol de CO₂ a diferentes intensidades de PAR (0 a 500 μmol de fotones/m²s) de forma ascendente para ir cargando los fotosistemas I y II propios de las plantas, hasta llegar al máximo de asimilación. Durante el período de medición se toman en cuenta aspectos como: la humedad, tipo de clima, hora de la medición. Las mediciones se realizan después que la hoja se ha acondicionado a la intensidad de luz. Posteriormente se toman cinco mediciones puntuales de asimilación de CO₂, a una intensidad lumínica pre establecida, el resultado obtenido de la capacidad fotosintética es conocido como A.

3. Resultados

3.1. Especies Identificadas

Se identificaron un total de 80 plantas representadas en 19 familias y 23 especies entre árboles y arbustos. Entre las principales familias identificadas están: *Arecaceae*, *Violaceae*,

Lecythidaceae, *Tiliaceae*. (Ver tabla 1). Este inventario mostró que *Gustavia superba* es la especie de mayor frecuencia dentro de esta parcela, sin embargo los arbustos como *Rinorea sylvatica* y *Oenocarpus mapora*, presentaron las mejores facilidades para realizar la medición y las mismas estaban bajo luz atenuada dentro del sotobosque. (Ver figuras 2-3).

Tabla 1. Resultados del Inventario realizado en una parcela de 450 m² dentro del OHTCP

Familia	Especie	Cantidad	%
Rubiaceae	<i>Alseis blackiana</i>	1	1.25
Arecaceae	<i>Astrocaryum standleyanum</i>	1	1.25
Fabaceae/caes	<i>Bauhinia sp</i>	1	1.25
Connaraceae	<i>Conareus panamensis</i>	1	1.25
Connaraceae	<i>Conarus sp</i>	1	1.25
Sapindaceae	<i>Cupania</i>	1	1.25
Rubiaceae	<i>Exostema mexicanum</i>	1	1.25
Meliaceae	<i>Guarea Guidonia</i>	1	1.25
Lecythidaceae	<i>Gustavia superba</i>	23	28.75
Erithropalaceae	<i>Heisteria concinna</i>	2	2.50
	<i>Heisteria concinna</i>	2	2.50
Achariaceae	<i>Lindackeria laurina</i>	1	1.25
Tiliaceae	<i>Luehea seemanii</i>	2	2.50
Melastomataceae	<i>Miconia affinis</i>	1	1.25
Arecaceae	<i>Oenocarpus mapora</i>	8	10.00
Rubiaceae	<i>Pentagonia macrophylla</i>	1	1.25
Moraceae	<i>Poulsenia armata</i>	1	1.25
Burseraceae	<i>Protium panamense</i>	2	2.50
Violaceae	<i>Rinorea sylvatica</i>	13	16.25
Leguminosae	<i>Swartzia simplex</i>	2	2.50
Meliaceae	<i>Trichilia tuberculata</i>	6	7.50
Polygonaceae	<i>Triplaris cumingiana</i>	1	1.25
Myristicaceae	<i>Virola sebifera</i>	7	8.75



Figura 2. *Rinorea sylvatica* Familia: *Violaceae*
Fuente: Tomada por el autor.



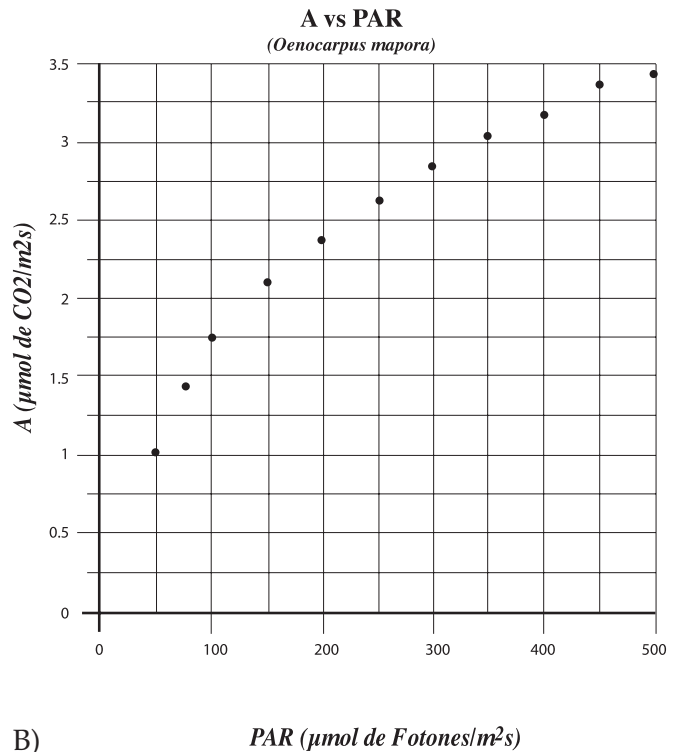
Figura 3. *Oenocarpus mapora* Familia: *Arecaceae*
Fuente: Tomada por el autor.

3.2. Mediciones de flujo de carbono

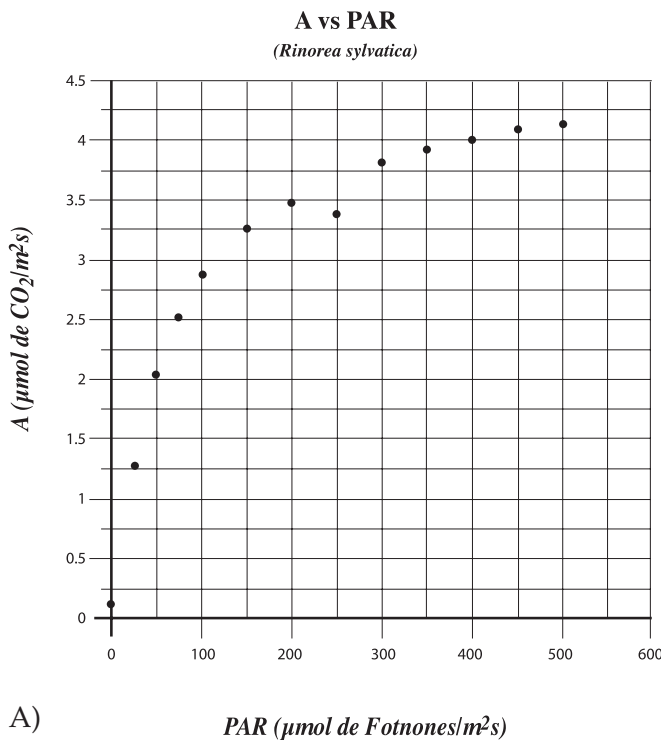
Se realizaron mediciones de la tasa de asimilación de CO₂ en función del PAR para el período comprendido entre junio de 2012 y noviembre de 2013. En la figuras 4 y 5 se presentan los promedios máximos de asimilación para diferentes valores de PAR. En general, el límite máximo de saturación en ambas especies se produjo para valores de PAR de 500 μmol de fotones/m²s.

Resultados época lluviosa. En la época lluviosa, los valores máximos de saturación fueron de 4.12,

y 3.70 μmol de CO₂/m²s para *Rinorea sylvatica* y *Oenocarpus mapora* respectivamente (Ver figura 4). Igualmente, en ambos casos, los puntos de compensación fotosintética (Ic) estuvieron por debajo de los 100 μmol de fotones/m²s, sin asimilación neta de CO₂ próximo a los 380 μmol de CO₂/mol. La respuesta a la luz para ambas especies se caracteriza por una curva con varias fases. Para intensidades de luz extremadamente bajas, la asimilación del CO₂ (fotosíntesis neta) presenta una cinética lineal. Luego en una fase de transición, esta respuesta diverge de la respuesta lineal, para finalmente llegar a una fase de saturación en la que el CO₂ empieza a limitar la respuesta fotosintética. Hacia un valor de 500 μmol de fotones/m²s la tasa de asimilación disminuye, por verse saturada por la luz. (Foto inhibición) (figura 4). Las curvas de asimilación de CO₂ vs PAR presentaron una relación hiperbólica con una $r^2 = 0.99$, lo que indica que la asimilación de CO₂ depende de la cantidad de luz para el rango de PAR evaluado.



B)

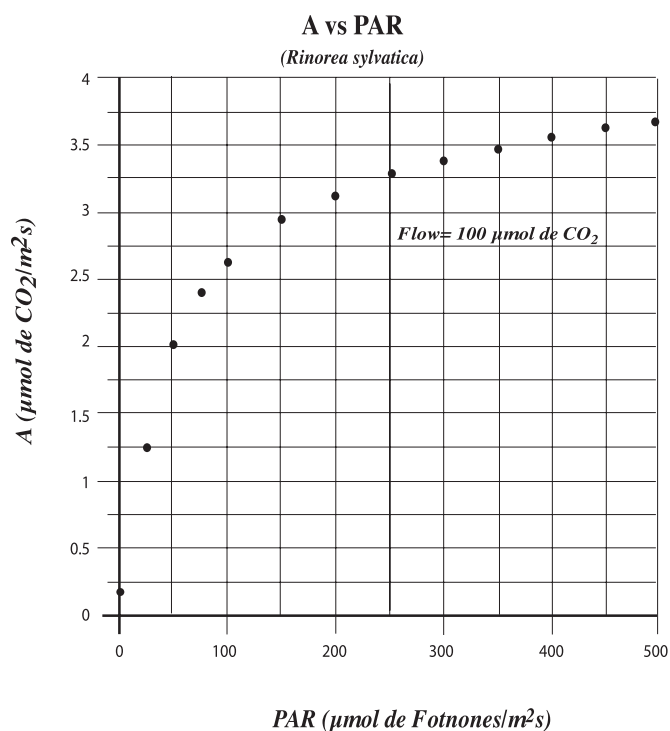


A)

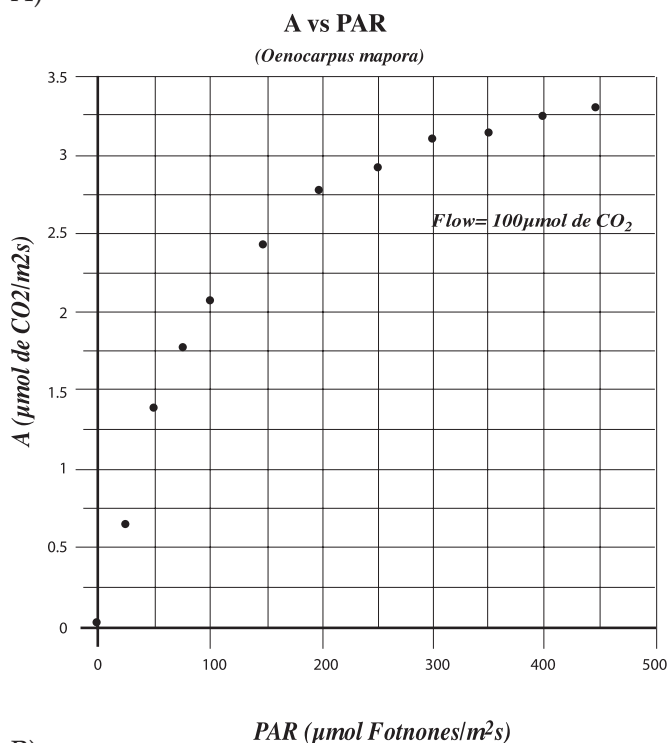
PAR ($\mu\text{mol de Fotones/m}^2\text{s}$)

Figura 4. Respuesta de asimilación de CO₂ al PAR en la época lluviosa. A) *Rinorea sylvatica* y B) *Oenocarpus mapora*. En ambos casos el $r^2=0.99$.

Los resultados de la relación entre la asimilación de CO₂ y PAR tanto para *Rinorea sylvatica* como para *Oenocarpus mapora* coinciden con lo establecido por Archontoulis et al. (2005) [23], es decir una cinética dictada por una curva polinomial hiperbólica con tres fases o estadios: uno donde la Asimilación vs PAR es creciente y corresponde a la eficiencia del uso de la luz por los cloroplastos (saturación por la luz) y una segunda fase donde la pendiente y el rendimiento de la fotosíntesis disminuyen. Aquí, la tasa de asimilación depende de la velocidad a la que se difunde el CO₂ desde el exterior de la hoja hasta el cloroplasto.



A)



B)

Figura 5. Respuesta de asimilación de CO_2 al PAR en la época seca. A) *Rinorea sylvatica* y B) *Oenocarpus mapora*. En ambos casos el $r^2 = 0.99$.

Efecto del estrés hídrico (época seca). Durante la época seca (figura 5 A y B) el estrés hídrico restringe la apertura estomática, no obstante las especies estudiadas están bajo la cobertura boscosa creándose un microclima que ha favorecido la asimilación del CO_2 con valores en el orden de $3.82 \mu\text{mol de CO}_2/\text{m}^2\text{s}$ para *Rinorea sylvatica* y de $3.29 \mu\text{mol de CO}_2/\text{m}^2\text{s}$ para *Oenocarpus mapora*; otra estrategia que ha podido favorecer a esta especie es la tolerancia al estrés hídrico, la adaptación morfológica de sus hojas y la estrategia de su sistema radicular para la obtención de agua.

Una ventaja de las plantas del sotobosque es que la evaporación disminuye en el interior del dosel, se observa una atenuación de la radiación, disminuyendo la temperatura, la velocidad del viento y la humedad, favoreciendo a estas especies. Se ha determinado, que las hojas aclimatadas a la sombra, comparadas con las que se desarrollan a plena luz, tienen una menor asimilación de CO_2 y menor punto de compensación.

Se observó que al disminuir la cantidad del PAR a cero la asimilación de CO_2 y la respiración son iguales a cero, no hay formación de compuestos orgánicos y se encuentra próximo a los $380 \mu\text{mol de CO}_2/\text{m}^2\text{s}$ (dato no mostrado), que corresponde al punto de compensación y un $r^2 = 0.995$.

4. Conclusiones

La cinética de Asimilación de CO_2 en función del PAR (Radiación Fotosintéticamente Activa) muestra que a una concentración de $100 \mu\text{mol de CO}_2$, ambas especies alcanzan la fotosaturación a los $500 \mu\text{mol de fotones}/\text{m}^2\text{s}$, sin embargo se observa que en la época lluviosa la tasa de asimilación por ambas especies es mucho mayor que para la estación seca. La condición hídrica de las especies estudiadas muestra diferencias en la asimilación de CO_2 . Durante la época lluviosa se obtuvo una mayor asimilación de carbono debido a que las especies no estaban sometidas a largos periodos de sequía; se pudo observar que para *Rinorea*

sylovatica se dio una reducción de un 20 % en su actividad fotosintética con respecto al periodo seco, mientras que para *Oenocarpus mapora* se observó el mismo comportamiento con una disminución de un 14 %

en la asimilación de CO₂. Se determinó que para un PAR cero se da una asimilación cero, el punto de compensación para ambas especies sin ganancia ni pérdida.

Cuando se alcanza el punto de compensación fotosintética (IC), la concentración intra celular se encuentra por el orden de los 380 μmol de CO₂/mol aproximadamente (dato no mostrado).

Se determinó, que las hojas aclimatadas a la sombra, en comparación con las que se desarrolla a plena luz, tienen una menor asimilación de CO₂ y menor punto de compensación [24-26].

Otra estrategia que ha podido favorecer a estas especies es la tolerancia al estrés hídrico, la adaptación morfológica de sus hojas y la estrategia de su sistema radicular para la obtención de agua. [27-29].

Finalmente, se espera extender estos estudios a otras especies, en lugares abiertos, para conocer las respuestas de asimilación de CO₂; así como estudiar la variación de otros parámetros como la transpiración, variaciones de C_i, efectos de la temperatura y la humedad, en función de parámetros como intensidad de luz y los efectos del estrés hídrico en la asimilación de CO₂.

5. Agradecimientos

Agradecemos también a nuestros colaboradores, la Licenciada Eny Serrano y al señor Wilbert Ortiz del Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas de la Universidad Tecnológica de Panamá, por el apoyo brindado durante las mediciones de campo. De igual forma agradecemos a la SENACYT por el apoyo brindado a través del proyecto COL-07-11.

Referencias Bibliográficas

1. Von Caemmer S., Farquhar G., Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and gas exchange of leaves *Planta* 1981 153:376-387
2. Damian A, Ramírez R., Valdina C., Díaz G., Características del intercambio de gases en hojas de Guayabo (*Psidium guajava*) 2009 *Revista Chapingo Serie Horticultura* 2009 15 (2): 119-126
3. Artavia G., Eckhargt K., Araujo J., Efecto de la luz sobre la densidad y morfología de las plantas en el claro dominado por *Duroira hirsuta* estación biológica madre selva, rio Osora Iquitos, Perú. *Revista reflexiones* 2004. 83: 131-135.
4. Rodrigo R., Takahashi F., Carvalho Silva L., Franco c. Características funcionales de las hojas de sol y sombra de especies arbóreas en un bosque de galería en el distrito Federal, Brasil 2010. *Acta Bot. Bras.* Vol 24 (3): 120-132.
5. Fetcher, N., Efectos del Régimen de Luz sobre la Fotosíntesis y el Crecimiento de Arboles de un Bosque Lluvioso Tropical de Costa Rica. (1987).*Rev. Biol. Trop.* 35 (Sulp. 1): 97-110.
6. Chazdon R, Pearcy R. Photosynthetic response to light variaton in rain forest species.1986 *Oecologia* 69: 517-523.
7. Pearcy R., Calkin H. Carbone dioxide Exchange of C3 and c4 tree species in the understory of hawaiian forest 1983. *Oecologia* 58: 26-32.
8. Baligar V., Bunce J., Elson M., and Fageria N. (2012). *Photosynthetic Photon Flux Density, Carbon Dioxide Concentration and Temperature Influences Photosynthesis in Crotalaria Species*. The poen *Plant Sciences Journal* 6: 1-7.
9. Kimball B.A., Carbon dioxide and agricultural yield: an assemblage and analysis of 430 prior observation. 1983 *Agrom J.* 75: 779-80
10. IPCC. Climate change 2012. (Cambio climático org.).
11. Gómez-Echverri, Luis, Editor, Cambio Climático y Desarrollo, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, y Yale School of Forestry and Environmental Studies, 2002 San José, Costa Rica.
12. Usuda H. Effect of Growth under Elevated CO₂ on the Capacity of Photosynthesis in two Radish Cultivars differing in capacity of Storage root. 2004 *Plant Prod. Sci* (4): 377-385.
13. Bowes, G. Growth at elevated CO₂; photosynthesis responses mediated Through rubisco. 1991 *Plant cell Environ* 14: 795-806.
14. Long S., Ainsworth E., Rogers a., Ort D. Risisng atmosferic carbón dioxide: plant FACE and future. 2004 *An Rev Plant Biol.* 55: 591-628.
15. Drake B., Leadley P., Canopy Photosynthesis of crops and native plant communities exposed to long-term elevated CO₂. 1991 *Plant Cell Environ* 14: 853-60.
16. Ehleringer, J., Bjorkman, O., Quantum yields for CO₂ uptake in C3 and C4 plants. Dependences on temperature, CO₂ and O₂ concentrations. 1977 *Plant Physiology* 59, 86-90.
17. Santiago, L., Goldstein G., Meinzer, F., Fisher, J., Machado, K., Woodruff, D., Jones, T. Leaf photosynthetic traits scale with hydraulic conductivity and wood density in Panamenian forest canopy trees. 2004. *Oecologia* 140: 543-550.
18. Santiago, L., Mulkey, S. A test of exchaces measurments on excised canopy branches of ten tropical tree species. 2003. *Photosynthetica* 41(3) 343-347.
19. Ibañez R, Condit, R, Angehr, GR, Aguilar, S, García, T., Martínez, R, Sanjur, A., Stallard, R. F., Wright, S. J., Rand, A. S. y Heckadon, S., An ecosystem report on the Panama Canal: monitoring the status of the forest communities and the watershed: 2002. *Env. Monitor.*

- Assess. 80:65-95.
20. Serrano Eny, Nuñez María, 2009, Cuantificación de flujo de CO₂ en suelo, Tesis de Grado-Universidad Tecnológica de Panamá, 2009 pág. 88.
 21. López-Serrano, Francisco, 2006, El Bosque como Sumidero de CO₂, Presentación en la primera jornada de Ecología y Conservación, Universidad Tecnológica de Panamá.
 22. Li-Cor 6400. Portable Photosynthesis System Book 1 and 2 (10th, 2012)
 23. Archontoulis S., Struik P., and Danalatos N. (2005). Leaf photosynthesis of Kenaf (C.V. Everglades 41) as affected by different light intensity and Temperature regimes. Wageningen University, Dept. of Plant Sciences, Crop and Weed Ecology Group, Haarweg 333, 6709 RZ Wageningen, The Netherlands. In press.
 24. Archontoulis S., Struik P., and Danalatos N. (2005). Leaf photosynthesis of Kenaf (C.V. Everglades 41) as affected by different light intensity and Temperature regimes. Wageningen University, Dept. of Plant Sciences, Crop and Weed Ecology Group, Haarweg 333, 6709 RZ Wageningen, The Netherlands. In press.
 25. Meinzer F., Goldstein G., Holbrook N., Jackson P., and Cavelier J. (1993). *Stomatal and environmental control of transpiration in a lowland tropical forest tree*. Plant, Cell and Environment 16: 429-436.
 26. Naumburg E., and Ellsworth D., (2000). *Photosynthetic sunfleck utilization potencial of understory saplings growing under elevated CO₂* in FACE Oecologia 122: 163-174.
 27. Myers, B., Duff G., Eamus D., Fordice, I. O'Grady, I., and Williams R. (1997). Seasonal variation in water relations of trees of differing leaf phenology in a wet and dry tropical Savvana near Darwin, Norther Australia. Australian Journal of Botany 45: 225-240.
 28. Brodrribb, T., Holbrook, N., and Gutierrez M. (2002). Hydraulic and photosynthetic co-ordination in seasonally dry tropical forest trees. Plant, Cell and Environment 25: 1435-1444.
 29. Novello V. (1994). *Diurnal changes of CO₂ net assimilation rate and related parameters in Pistacia vera* CIHEAM Options Mediterraneennes 51-55.

Diseño de estructuras con sistema de amortiguamiento viscoso lineal

Fernanda M. Candanedo

Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
fernanda.candanedo@utp.ac.pa

Carlos E. Miranda

Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
carlos.miranda@utp.ac.pa

Rubén E. Cedeño

Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
ruben.cedeno1@utp.ac.pa

Richard Lozada

Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
richard.lozada@utp.ac.pa

Oscar M. Ramírez

Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
oscar.ramirez@utp.ac.pa

Resumen— El diseño sísmico propuesto en la nueva versión del Reglamento Estructural Panameño REP-14, está basado en la normativa estadounidense ASCE 7-05. Esta normativa, además de los procedimientos tradicionales de diseño, incluye metodologías y técnicas que permiten equipar los edificios con tecnología de punta, como fuente alterna para la disipación de energía sísmica. En este artículo se compara el diseño sísmico de un edificio de concreto reforzado de seis pisos utilizando una estructura convencional, respecto al mismo edificio con una estructura reducida y con un sistema de amortiguadores viscosos lineales, diseñados según el ASCE-7-05, para rendir el mismo nivel de desempeño. Se evalúa la respuesta de desplazamiento global, y se compara el costo del sistema lateral de ambos modelos.

Palabras Clave— Amortiguamiento, Articulaciones Plásticas, Daño, Diseño Sísmico, Resistencia, Respuesta Sísmica.

Abstract— The seismic design proposed in the new version of Panamanian structural regulation REP-14 is based on the normative ASCE 7-05. These regulations, in addition to traditional design methods, including methodologies and techniques that allow buildings equipped with updated technology, as an alternative source for seismic energy dissipation. This article compare the seismic design of a six floors reinforced concrete building using a conventional structure, with the same building with a reduced structure and a system of linear viscous dampers, designed according

to the ASCE 7-05, for the same level of performance. Overall response is evaluated, and the cost of the lateral system is compared for both models.

Keywords— *Damage, Damping, Plastic Hinge, Pushover, Seismic Design, Seismic Response, Strength.*

Tipo de artículo: Original

Fecha de recepción: 15 de septiembre de 2014

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2014

1. Introducción

En el diseño sísmico tradicional, o diseño basado en daño, la energía impuesta por un sismo en una estructura es disipada mediante fricción inelástica en articulaciones plásticas que se desarrollan en secciones pre-establecidas de la estructura. El enfoque moderno del diseño sísmico, es el uso de nuevas estrategias de protección. Una de dichas estrategias, es la adición de dispositivos de amortiguamiento pasivos. El objetivo primario de adicionar estos dispositivos a la estructura de edificios es concentrar la disipación de energía durante un sismo en dispositivos específicamente diseñados para este propósito, reduciendo sustancialmente, o eliminando, disipación de energía a través de la estructura de resistencia lateral de un edificio. Es decir, reduciendo o eliminado el daño en la estructura como mecanismo de disipación.

El Capítulo 15 del NEHRP-2003 [1] y el Capítulo 18 del ASCE-7-05 [2] incluyen procedimientos para el análisis y diseño de estructuras con sistemas de amortiguamiento, los cuales están sustancialmente basados en el trabajo desarrollado por Ramírez et al. 2000 [3]. En estas normativas, se incluye el método de fuerza lateral equivalente, FLE, y el método de respuesta espectral modal, RSA, en un formato consistente con los métodos tradicionales existentes para el diseño de edificios.

El Método 2 de FEMA [4], fue ampliamente basado en el método de capacidad espectral

realizado por Freeman et al. 1975 [5] y Freeman et al. 1978 [6], pero extendido para incluir estructuras con sistemas de amortiguamiento. El trabajo realizado por Ramírez et al. 2000 presentó una modificación sustancial al Método 2 de FEMA. Ramírez et al. 2002^a [7] presenta el desarrollo de factores de corrección de velocidades, los cuales son utilizados para obtener velocidades pico a partir de pseudo-velocidades. Asimismo, presenta métodos simplificados para la determinación de respuestas máximas de aceleración y velocidades. Ramírez et al. 2002b [8] presenta el desarrollo de factores de reducción de demanda espectral para amortiguamientos de 0 a 100 %. Adicionalmente, Wittaker et al. 2003 [9] desarrolló procedimientos para el cálculo de amortiguamiento efectivo, y período efectivo, así como las relaciones de amortiguamiento para modos de vibración más altos en edificios con sistemas de amortiguamiento. Finalmente, Ramírez et al. 2003 [10] desarrolló la base teórica y validó los procedimientos de Fuerza Lateral Equivalente, FLE, y el método de Análisis de Respuesta Espectral, RSA, para estructuras con sistemas de amortiguamiento.

El Reglamento Estructural Panameño, REP-2014 [11], propone adoptar el formato del ASCE 7-05 para el diseño sísmico de edificios en Panamá. Es decir, se incluyen procedimientos y técnicas para el análisis de edificios equipados con tecnología de punta para disipar energía sísmica. La utilización de estas tecnologías permite un mejor desempeño de los edificios ante movimientos sísmicos, reduciendo o anulando el daño estructural implícito en métodos tradicionales; sin embargo, su aplicación es aún incipiente en muchos países del mundo. La ingeniería panameña carece de experiencia en el manejo conceptual de esta tecnología, por lo que es importante ilustrar su aplicación y comparar su efecto en la práctica de diseño y construcción actual.

En este documento, se compara el diseño sísmico de un edificio utilizando una estructura

convencional, respecto al mismo edificio con una estructura reducida adicionando un sistema de amortiguamiento pasivo, según el ASCE-7-05. Ambas estructuras son diseñadas para atender la demanda sísmica prescrita por el REP-2014, y satisfacer el mismo nivel de desempeño. Se busca investigar el efecto en términos de costo, y reducción del daño, del equipamiento de este edificio con dispositivos viscosos lineales.

2. Marco de Trabajo

2.1 Fundamento Conceptual

El método RSA, incluido en el Capítulo 18 del ASCE 7-05, propone un procedimiento iterativo para la determinación de la respuesta de desplazamiento de estructuras con sistemas de amortiguamiento. En este procedimiento, la respuesta sísmica se obtiene reemplazando el sistema de cedencia por un sistema elástico lineal equivalente. Para evaluar la respuesta en el primer modo de vibración de la estructura, se desarrolla un modelo matemático del sistema, el cual incluye todas las características del sistema estructural y de los dispositivos de disipación de energía. Se construye la curva de capacidad, o curva de *pushover* del sistema para determinar la capacidad plástica. Se supone un valor del desplazamiento del último piso, y se determina el amortiguamiento efectivo del sistema a ese nivel de desplazamiento. Se reduce el espectro aplicando el correspondiente valor del factor de reducción de amortiguamiento, y se determina el nuevo valor del desplazamiento, definido como la intersección entre la curva de capacidad espectral y la curva de demanda espectral reducida. El proceso se repite hasta lograr una convergencia satisfactoria. A este nivel de desplazamiento se obtiene por métodos modales los desplazamientos en los pisos inferiores, fuerzas inerciales, aceleraciones, velocidades, y acciones de diseño. La contribución de los modos más altos a la respuesta total se calcula utilizando el mismo método, considerando que la estructura permanece

elástica, y luego se obtienen acciones resultantes utilizando una regla de combinación.

En el caso de sistemas de amortiguamiento dependientes de la velocidad, como el que se presenta en este estudio, la respuesta del sistema en cada modo, debe ser evaluada en tres estados límites: Máximo desplazamiento, máxima

Se reconoce la capacidad del sistema de amortiguamiento para reducir tanto la demanda sísmica, como la respuesta de desplazamiento de una estructura. Ramírez et al. 2002b [8] desarrollo la base técnica para la reducción de 25 % en el cortante basal en estructuras con sistemas de amortiguamiento adicional, respecto al valor del cortante basal en estructuras sin sistemas de amortiguamiento, V. En consecuencia, ASCE 7-05 acepta la reducción de la capacidad a corte de la estructura a 0.75V, en estructuras con sistema de amortiguamiento.

2.2 Definición del Problema

Se examina un edificio de concreto reforzado de seis (6) pisos con un sistema estructural a base de pórticos de momento especiales, diseñado con una resistencia a cortante V. Luego se propone una estructura con resistencia reducida a cortante de 0.75V, a la cual se le incorpora un sistema de amortiguadores viscosos lineales. Los análisis estructurales, para establecer las propiedades dinámicas de los modelos, han sido llevados a cabo a partir de un modelo tridimensional de la estructura, utilizando el programa SAP-2000 V15.0 [12]. La respuesta global de los modelos se evalúa utilizando el Método RSA incluido en el capítulo 18 del ASCE-7-05. Ambos modelos son dimensionados y diseñados para satisfacer el mismo nivel de desempeño. El diseño por resistencia se lleva a cabo de acuerdo a ACI-318-08 [13], y finalmente se compara el costo del sistema lateral de ambos modelos.

2.3 Definición del Modelo de Referencia

El modelo de referencia consiste de un edificio de concreto reforzado de seis plantas para uso residencial, ubicado en la ciudad de Panamá en suelo tipo B. El edificio tiene dimensiones en planta de 30 x 48 m, y consta de seis niveles con altura de entrepiso de 4.5m en el primer nivel, y de 3.0 m en los demás niveles, para una altura total de 19.50 m. Se considera una losa de piso tipo placa plana postensada de 200 mm de espesor. El peso sísmico efectivo en cada piso se estima en 1.15 ton/m², o sea un peso de 1650 ton/planta, y un peso sísmico total del edificio de 9900 ton. La figura 1 muestra la planta y elevación del edificio.

La demanda sísmica en la ciudad de Panamá está caracterizada según el espectro de diseño del ASCE-7-05 con parámetros espectrales de $S_S = 1.2$ y $S_1 = 0.45$. El sistema de resistencia lateral en ambas direcciones ortogonales de la estructura consiste de pórticos especiales de momento de concreto reforzado, ubicados en el perímetro de la planta. Son dos pórticos en la dirección E-O, y dos pórticos en la dirección N-S, tal como se muestra en la figura 1.

El cortante basal requerido según ASCE-7-05 es $V = 386$ ton. El sistema de resistencia lateral ha sido dimensionado y diseñado según ACI-318-08 para permitir un desplazamiento máximo de 12 cms. en el centro de masas del último piso, bajo el sismo de servicio. El modelo de referencia presenta un período fundamental de vibración de $T = 1.29$ s.

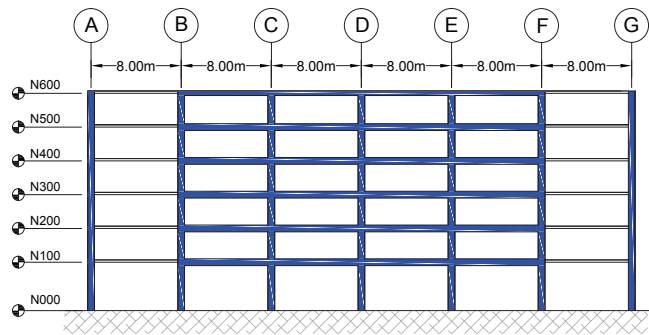
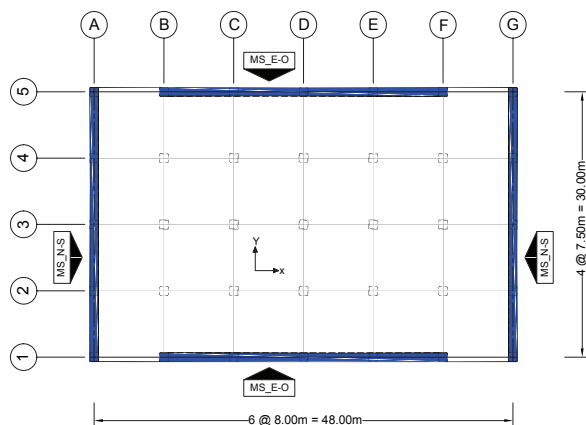


Figura 1. Vista de planta y elevación del edificio.

2.4 Definición del Modelo Reducido

Cuando se utiliza un sistema de amortiguamiento adicional, el ASCE 7-05 permite la reducción de la capacidad a cortante a:

$$V_{\min} = 0.75 V \quad (1)$$

Se ha dimensionado el modelo reducido para producir una resistencia a cortante basal $V_{\min} = 290$ Ton, aproximadamente igual al 75 % del cortante basal V . Este modelo tiene un período fundamental de vibración de $T = 1.71$ s. Es importante indicar que este modelo tiene una rigidez equivalente a 80 % de la rigidez del modelo de referencia. El desplazamiento lateral en el centro de masas del último piso de este modelo, bajo el sismo de servicio, es de 16.67 cm, excediendo en 39 % el desplazamiento objetivo de 12 cms. La figura 2 muestra las curvas de *pushover* del modelo de referencia y del modelo reducido. Tal como se observa en la figura 2, la resistencia plástica del modelo de referencia es $V_p = 426$ ton, mientras que en el modelo reducido es de $V_p = 319$ ton. Obsérvese que la resistencia plástica del modelo reducido es aproximadamente 75 % de la resistencia plástica del modelo de referencia.

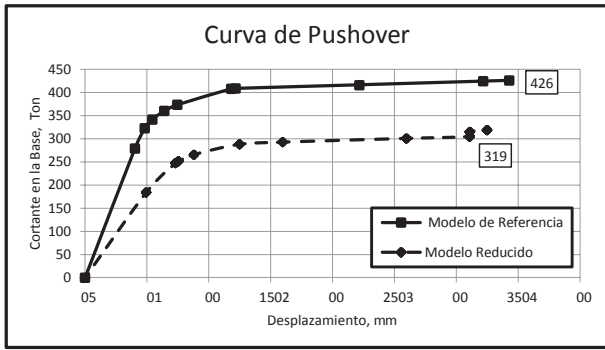


Figura 2. Gráficas de análisis estático no lineal *Pushover*.

La figura 3, muestra la ubicación de las articulaciones plásticas del pórtico del modelo de referencia, y del modelo reducido, correspondientes al sismo de diseño. La máxima rotación plástica ocurre en el extremo de la viga del nivel 300 en el modelo de referencia con un valor de 0.00739 radianes, mientras que en el modelo reducido la máxima rotación plástica ocurre en el nivel 100 con un valor de 0.0113 radianes, tal como se indica en la figura 3. Es decir, la máxima rotación plástica del modelo reducido presenta un incremento de 48 % respecto a la máxima rotación plástica en el modelo de referencia.

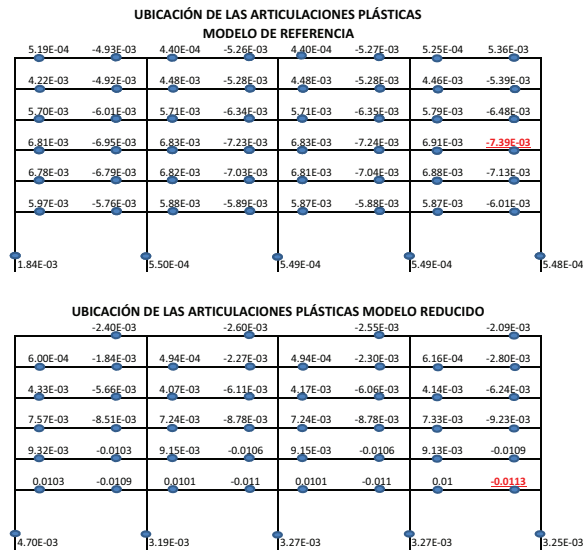


Figura 3. Ubicación de articulaciones plásticas y valor de rotación en radianes.

2.5 Amortiguamiento Requerido

La estructura del modelo reducido no es capaz de atender por sí mismo la demanda sísmica de diseño, V. Asimismo, debido a la reducción de rigidez de este modelo, el desplazamiento lateral estimado del centro de masas del último nivel del modelo reducido, excede el desplazamiento objetivo de 12 cm. Para satisfacer los objetivos del diseño se propone incorporar un sistema de amortiguamiento con dispositivos viscosos lineales, capaz de proveer un amortiguamiento adicional, bajo condiciones elásticas, de $\beta_v = 9\%$. Este amortiguamiento adicional se proveerá mediante dispositivos viscosos lineales, con constante de amortiguamiento, C, instalados en cada uno de los cuatro pórticos perimetrales, sobre puntales tipo “Chevron”, tal como se muestra en la figura 4.

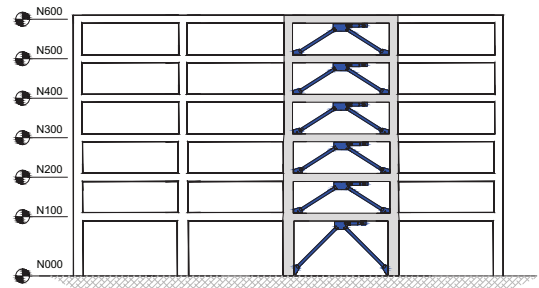


Figura 4. Marco del modelo reducido con dispositivos de amortiguamiento en configuración “Chevron”.

La constante de amortiguamiento se establece tomando en consideración el período fundamental de la estructura y las amplitudes modales del primer modo, a partir de la ecuación (2) del ASCE 7-05, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$C_j = \left(\frac{4\pi}{T_m} \right) \beta_{vm} \frac{\sum \left(\frac{w_i}{g} \right) \phi_{im}^2}{\sum \phi_{rj}^2} \quad (2)$$

Donde, C_j es la constante del amortiguador, T_m es el período del modo m^{th} de vibración, β_{vm} es el porcentaje de amortiguamiento viscoso adicional,

w_i es el peso tributario del marco en su respectivo nivel i , ϕ_{im} es la amplitud modal de cada nivel ϕ_{ij} es la amplitud modal relativa, y “ g ” es el valor de la aceleración de la gravedad.

El sistema de amortiguamiento propuesto considera que todos los dispositivos tienen la misma constante de amortiguamiento, C . En este caso, la constante de amortiguamiento resultante de la aplicación de la ecuación (2) al sistema propuesto es $C = 9.95$ Tons/cm

3. Análisis y resultados

La respuesta de desplazamiento de ambos modelos es evaluada utilizando los procedimientos de ASCE-7-05 para estructuras con sistemas de amortiguamiento. En el análisis de la respuesta de estructuras con sistema de amortiguamiento viscoso se definen tres estados límites: (a) Máximo Desplazamiento, (b) Máxima Velocidad y, (c) Máxima Aceleración. En cada estado se evalúa la respuesta de desplazamiento, así como las fuerzas inerciales, cortante, velocidades y aceleraciones impuestas al sistema por el sismo de diseño, DBE. Estas acciones son determinadas a partir de las siguientes expresiones:

Fuerza lateral inercial:

$$F_{im} = w_i \phi_{im} \frac{\Gamma_m}{\bar{W}_m} V_m \quad (3)$$

Donde, para cada modo m , y nivel i , F_{im} es la fuerza lateral de diseño en el estado de máximo desplazamiento, ϕ_{im} es la amplitud modal, w_i es el peso reactivo del piso correspondiente al pórtico, T_m es el factor de participación de modo m^{th} , \bar{W}_m es el peso modal, y V_m es el valor del cortante basal.

Velocidad relativa de piso:

$$\nabla_{1D} = \frac{2\pi}{T_{1D}} \Delta_{1D} \quad (4)$$

Donde, ∇_{1D} es la velocidad del piso, T_{1D} es el período efectivo, Δ_{1D} es la deriva de piso.

Fuerza axial en el dispositivo:

$$Fd_{i1D} = C_i \nabla_{i1D} \quad (5)$$

Donde, F_{di1D} es la fuerza en el dispositivo de amortiguamiento, C_i es la constante de amortiguamiento, ∇_{i1D} es la velocidad de piso.

Cortante en estado de máxima aceleración:

$$V_{i1MAX} = CF_1 \cdot V_{i1} |_{MaxDesp} + CF_2 \cdot V_{i1} |_{MaxVel} \quad (6)$$

Donde, V_{i1Max} es el máximo cortante de nivel en estado de máxima aceleración, CF_1 y CF_2 son los coeficientes de fuerza.

Similarmente, se establece la respuesta en los tres estados correspondientes al Máximo Sismo Creíble, MCE, con el objeto de diseñar los elementos del sistema de amortiguamiento, tal cual lo exige el ASCE-7-05. En cada caso, se incluye la participación de los tres primeros modos de vibración, y se estima la respuesta resultante utilizando la regla de combinación SRSS. Los resultados de estos análisis se muestran en el tabla 1.

Tabla 1. Resultados en los tres estados para DBE y MCE

Cantidad	Unidad	Método SRSS	
		DBE	MCE
Estado de Máximo Desplazamiento			
Deriva, Δ_m	mm	12	18
		21	32
		26	38
		25	38
		24	36
		24	36
Actual Fuerza de Cortante en Piso V_m	Tonf	58	87
		95	143
		115	173
		132	198
		152	228
		168	153
Estado de Máxima Velocidad			
Fuerza en el Dispositivo de Amortiguamiento, F_{dm}	Tonf	86	129
		106	159
		98	147
		81	121
		80	120
		95	142
Estado de Máxima Aceleración			
Máximo Cortante entre Piso, V_m max	Ton	99	148
		137	206
		150	225
		158	237
		177	266
		199	299

La resistencia de los elementos de la estructura completa se verificó, utilizando la envolvente de las máximas fuerzas resultantes en el estado de máximo desplazamiento y en el estado de máxima aceleración. Se utilizaron las combinaciones de carga aplicables según ASCE-7-05, y se verificó resistencia según ACI-318-08. Por otro lado, el sistema de amortiguamiento, el cual incluye todos los elementos de conexión del dispositivo, y de la estructura del pórtico donde se conectan los dispositivos, fue diseñado para resistir el escenario más desfavorable de combinaciones de cargas, para las fuerzas del sismo máximo considerado MCE, como lo establece la sección 18.7.1.2 de ASCE-7-05.

La tabla (2), muestra las características del disipador viscoso lineal, respectivamente. El stroke se refiere a la tolerancia de desplazamiento axial del pistón del dispositivo, para acomodar el desplazamiento esperado durante el máximo sismo creíble, MCE.

Tabla 2. Propiedades de los dispositivos de amortiguamiento

Nivel	Fuerza en el Dispositivo de amortiguamiento (Ton)	Constante de Amortiguamiento (Ton.s/cm)	Stroke (cm)
600	129	9.95	1.84
500	158	9.95	3.17
400	146	9.95	3.84
300	121	9.95	3.76
200	120	9.95	3.64
100	141	9.95	3.59

Basados en información de las curvas de *pushover* de ambos modelos, se determinó la respuesta inelástica de la estructura al nivel de desplazamiento objetivo de 12 cms en el último piso del edificio. De interés en este caso, es presentar las rotaciones inelásticas en las articulaciones plásticas desarrolladas a ese nivel de desplazamiento. Estas rotaciones inelásticas proveen un indicativo del nivel de daño en las secciones más solicitadas. La figura 5, muestra los valores de rotación

plástica obtenidos en el modelo de referencia, y en el modelo reducido, incluyendo el sistema de amortiguamiento viscoso.

Como se observa en la figura 5, el número de secciones que han desarrollado articulaciones plásticas en el modelo reducido de 0.75V, al cual se le instaló el sistema de amortiguamiento, es menor al número de secciones con articulaciones plásticas del modelo de referencia, diseñado para atender la demanda sísmica V. Adicionalmente, se observa que la magnitud de la mayoría de las rotaciones plásticas reportadas en el modelo reducido es sustancialmente menor a las del modelo de referencia.

Es de interés también notar, según se indica en la figura 5 que la máxima rotación plástica en el modelo reducido es de 0.00713 rads, y se produce en la viga del nivel 100, mientras que en el modelo de referencia es de 0.00739 rads, y se produce en la viga del nivel 300, con una diferencia de tan solo 0.00026 rads. Adicionalmente, se debe observar que la rotación máxima en el modelo reducido con sistema de amortiguamiento, es 58 % menor a la rotación plástica máxima del mismo modelo, sin sistema de amortiguamiento.

Se llevó a cabo un estimado de costos del sistema de resistencia lateral de ambos modelos. Se reporta el volumen de concreto, y la cuantía de acero de refuerzo de los cuatro pórticos de momento del modelo de referencia, diseñado para acomodar "V" mediante una estructura convencional. Asimismo, se reporta el volumen de concreto y la cuantía de refuerzo de los cuatro pórticos reducidos del modelo diseñado para acomodar "0.75V", incluyendo el sistema de amortiguamiento. Adicionalmente, se incluyen los costos correspondientes a los puntales, placas de soporte, y conexiones de la estructura de soporte del disipador. La tabla 3 muestra los resultados obtenidos.

Como se puede observar el costo global estimado del sistema lateral del modelo reducido con la adición del sistema de amortiguamiento es USD 506,800.00, mientras que el costo global

estimado del sistema lateral del modelo de referencia es USD 281,150.00. Es decir, se presenta un incremento de USD 225,650.00 en el sistema reducido respecto al costo del sistema lateral del modelo de referencia. Si se toma este diferencial, y se divide entre el área de construcción total del proyecto, 8640 m², se obtiene que el incremento del costo unitario de la estructura reducida a 0.75V con el sistema de amortiguamiento propuesto es de aproximadamente USD 26.00/m².

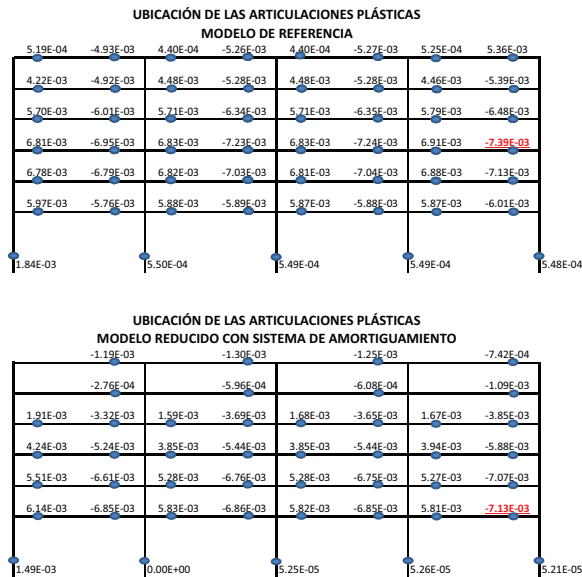


Figura 4. Formación de articulaciones plásticas y valor de rotación en radianes para un desplazamiento de 12 cm en el último piso.

Tabla 3. Cantidades y costos

Modelo de Referencia		
	Cantidad	Costo (USD)
Concreto	439 m ³	153,650.00
Acero de Refuerzo	85 Ton	127,500.00
Costo del Sistema Lateral		281,150.00
Modelo Reducido		
	Cantidad	Costo (USD)
Concreto	328 m ³	114,800.00
Acero de Refuerzo	78 Ton	117,000.00
Costo del Sistema Lateral		231,800.00
Sistema de Amortiguamiento		
Acero Estructural	10 Ton	25,000.00
Dispositivos	-	250,000.00
Costo TOTAL		506,800.00

4. Conclusiones

Se ha desarrollado el diseño de un edificio de concreto reforzado de seis niveles con el objeto de estudiar las ventajas y desventajas de incorporar un sistema de amortiguamiento. Para ello se ha considerado un edificio de referencia diseñado para atender un cortante basal V, y satisfacer un desplazamiento máximo de 12 cm en el último piso, bajo el sismo de servicio. Luego, se propone una estructura con capacidad reducida para atender 0.75 V, y se le incorpora un sistema de amortiguamiento con dispositivos viscosos lineales, el cual rinde un amortiguamiento adicional, bajo condiciones elásticas, de 9 %. Se evalúa la respuesta del sistema utilizando el método RSA de ASCE-7-05, para los estados límites de máximo desplazamiento, máxima velocidad, y máxima aceleración. Se verifica la resistencia de la estructura del pórtico y del sistema de amortiguamiento, y cumplimiento de nivel de desempeño pre-establecido. Se dimensionan los dispositivos y la estructura de soporte del dispositivo. Finalmente se lleva a cabo un análisis comparativo de costo del sistema lateral propuesto para ambos modelos.

A continuación se listan las conclusiones más relevantes de este estudio:

1. El incremento de costo en la estructura reducida con amortiguamiento se traduce en un aumento de USD 26.00/m² en el costo de la estructura global del proyecto, lo cual representa solamente un 3 % de incremento en el costo del edificio completo.
2. La cantidad y magnitud de las rotaciones en la mayoría de las secciones plastificadas en el sistema reducido con sistema de amortiguamiento incluido son menores. Es decir, el daño en el modelo de referencia es mayor. Esto implica que el costo de reparación de daños en la estructura del edificio de referencia, bajo el sismo de diseño, y muy probablemente los costos de coberturas de seguros para el edificio durante su vida útil, serán mayores. A largo plazo el 3 % de sobre costo inicial en la estructura reducida con sistema de amortiguamiento, se diluye frente a los costos de reparación y de cobertura de seguros, aplicables al modelo de referencia. La reducción en la capacidad de la estructura, y la adición del sistema de amortiguamiento, ha demostrado que es económicamente atractiva, y permite un mejor desempeño de la estructura.

Referencias Bibliográficas

- [1] National Earthquake Hazard Reduction Program, "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Federal Emergency Management Agency, Report No FEMA 450, Washington, D.C., 2003.
- [2] ASCE 7-05, «Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures,» American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2005.
- [3] O. M. Ramirez, M. C. Constantinou, C. A. Kircher, A. S. Whittaker, M. W. Johnson, J. D. Gomez y C. Z. Chrysostomou, «Development and evaluation of simplified Procedures for Analysis and Design of Buildings with Passive Energy Dissipation Systems,» Technical Report MCEER-00-0010. State University of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y. December 8, 2000.
- [4] FEMA, «Federal Emergency Management Agency, NEHRP Guideline for the Seismic Rehabilitation of Buildings and NEHRP Commentary on The Guideline for The Seismic Rehabilitation of Building,» Reports No. FEMA-273 and FEMA-274, Washington, D.C, 1997.[
- [5] S. A. Freeman, J. P. Nicoletti and J. V. Tyrell, "Evaluation of Existing Buildings for Seismic Risk- A Case of Puget Sound Naval Shipyard, Bremerton, Washington,," in *Proceedings of the First U.S. National Conference of Earthquake Engineering, Engineering Research Institute, Oakland, California, 1975.*
- [6] S. Freeman, "Prediction of Response of Concrete Buildings to Severe Earthquake Motion," in *Douglas McHenry International Symposium on Concrete and Concrete Structures*, Detroit, Michigan, American Concrete Institute, 1978, pp. 589-606.
- [7] O. M. Ramirez, M. C. Constantinou, C. A. Kircher, A. S. Whittaker, M. W. Johnson, J. D. Gomez and C. Z. Chrysostomou, "Evaluation of Simplified Methods of Analysis of Yielding Structures with Damping Systems. *Earthquake Engineering Institute,*" *Earthquake Spectra*, vol. 18, no. 3, pp. 501-530, Agosto 2002.
- [8] O. M. Ramirez, M. C. Constantinou, C. A. Kircher, A. S. Whittaker, M. W. Johnson, J. D. Gomez and C. Z. Chrysostomou, "Elastic and Inelastic Response Buildings with Damping Systems," *Earthquake Spectra*, vol. 18, no. 3, pp. 531-547, Agosto 2002.
- [9] A. S. Whittaker, M. C. Constantinou, O. M. Ramirez, M. W. Johnson and C. Z. Chrysostomou, "Equivalent Lateral Force and Modal Analysis Procedures of the 2000 NEHRP Provisions for Buildings with Damping Systems," *Earthquake Spectra*, vol. 19, no. 4, pp. 959-980, November 2003
- [10] O. M. Ramirez, M. C. Constantinou, C. A. Kircher, A. S. Whittaker, M. W. Johnson, J. D. Gomez y C. Z. Chrysostomou, «Validation of the 2000 NEHRP Provisions Lateral Force and Modal Analysis Procedures for Buildings with Damping Systems,» *Earthquake Spectra*, vol. 19, n° 4, pp. 981-999, November 2003.
- [11] REP-2014, Reglamento Estructural Panameño, Junta Técnica de Ingeniería y Arquitectura, Comisión Permanente del Reglamento Estructural Panameño, Panamá, 2014.
- [12] CSI, Computers & Structures Inc., "SAP 2000 V.15, Estructural and Earthquake Engineering Software," California, 2011.
- [13] ACI 318-08, «Requisitos de Reglamento Para Concreto Estructural y Comentarios,» American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan , 2008.

Evaluación de sistemas de ventilación utilizando la radiación solar

Jovanny Ariel Díaz

Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Panamá
jovanny.diaz@utp.ac.pa

Alixelys Caballero

al_y13@hotmail.com

Heizel Chambers

heizel-cham@hotmail.com

Resumen— Sistemas de ventilación solar han sido usados efectivamente basados en el principio de flotabilidad del aire caliente. La luz solar ha sido comúnmente utilizada para el calentamiento de alimentos mediante el fenómeno de reflexión utilizando espejos que concentren rayos solares en un recipiente absorbente. El consumo de energía de aire acondicionado en viviendas por el calentamiento climático excesivo es de gran preocupación. Sin embargo, este consumo puede ser minimizado mediante el uso de sistemas de ventilación solar. El objetivo de esta investigación es evaluar el uso de un sistema de ventilación basado en el principio de Bernoulli y la utilización de la concentración de la energía solar mediante el fenómeno de reflexión el cual contribuya a disminuir el consumo de energía proveniente de combustibles fósiles e hídricos.

Mediciones de temperatura en el tiempo fueron usadas para determinar la eficacia del sistema de ventilación utilizando la luz solar mediante el fenómeno de reflexión y el principio de Bernoulli. Para determinar la diferencia de temperatura del sistema de ventilación a utilizar, variables de control fueron hechas para comparar las temperaturas alcanzadas en un recinto sin y con el sistema de ventilación. Los resultados indican que el sistema de ventilación que utiliza la energía solar puede provocar una diferencia de temperatura de aproximadamente de más diez (10) grados Kelvin la cual logra que el aire caliente salga y sea reemplazada por aire fresco del exterior aumentando su eficacia con la adición del estrechamiento que produce el efecto de Bernoulli en el tubo.

Palabras Claves— consumo de energía, chimenea solar, flujo de aire caliente, muro trombe, principio de Bernoulli, reflexión, ventilación solar.

Abstract— Solar ventilation systems have widely used effectively based on the buoyancy principle of hot air flow. The solar light has been commonly used for heating foods by the reflection phenomena using mirrors that concentrate the solar rays in an absorbent recipient. The energy consumption of the air conditioning in housing by the excessive weather heating is an environmental concern, but it can be minimized through the use of solar ventilation systems. The objective of this research is to evaluate the use of a new ventilation system based on Bernoulli principle and the concept of the uses of solar energy concentrations by the reflection phenomena which contributes to diminish the energy consumption from fossil fuels and water sources.

Temperature measurements in period of time were used to determine the efficiency of the ventilation system using the solar light by the reflection phenomena and Bernoulli principle. Control variables were used to determine the difference of temperatures between the space with and without the ventilation system. The results indicate that the ventilation system using solar energy could create an approximate difference of ten (10) Kelvin degrees which could let the hot air out and replace it by fresh air from the outside increasing the efficiency by adding a diameter change in the tube to produce the Bernoulli effect.

Keywords— *Bernoulli principle, energy consumption, hot air flow, reflection, solar chimney, solar ventilation, trombe wall.*

Tipo de artículo: *Original*

Fecha de recepción: *15 de septiembre de 2014*

Fecha de aceptación: *19 de noviembre de 2014*

1. Introducción

Sistemas de ventilación solar han sido usados efectivamente basados en el principio de flotabilidad del aire caliente. La luz solar ha sido comúnmente utilizada en el pasado para el calentamiento de alimentos mediante el fenómeno de reflexión utilizando espejos que concentren rayos solares en un recipiente absorbente. El consumo de energía de aire acondicionado en viviendas por el calentamiento climático excesivo es de gran preocupación. Panamá, no es un país ajeno a este problema. El país tiene un consumo de energía del cuarenta por ciento (40 %) por el uso de sistemas de aire acondicionado. Sin embargo, este consumo puede ser minimizado mediante el uso de sistemas de ventilación.

El proyecto utiliza la energía del sol concentrada mediante la refracción para calentar el aire dentro de un tubo o chimenea buscando una manera efectiva y económica de mantener las viviendas más frescas. Similarmente, la luz solar también ha sido utilizada desde el siglo XX para el calentamiento de alimentos mediante la reflexión utilizando espejos para concentrar los rayos solares en un recipiente absorbente. La chimenea solar está compuesta principalmente de un hueco negro que actúa como masa térmica con abertura en la parte superior para la salida del aire caliente y en la parte inferior para introducir el aire de la habitación. Las chimeneas solares fueron basadas bajo el principio de flotabilidad del aire caliente. El aire caliente sube y crea un efecto de succión. Este efecto reemplaza el aire de la habitación por aire ambiente [1]. Utilizando este argumento sustentado y el efecto

de Bernoulli [2], lo que se busca es aplicar este principio de concentración por reflexión a un tubo de chimenea a fin de crear el efecto de succión en una chimenea solar aumentando su eficacia con la adición del estrechamiento que produce el efecto de Bernoulli en el tubo. El objetivo de esta investigación es evaluar el uso de un sistema de ventilación basado en el principio del Bernoulli y la utilización de la concentración de la energía solar mediante el fenómeno de reflexión el cual contribuya a disminuir el consumo de energía proveniente de combustibles fósiles e hídricos.

El proyecto de investigación busca evaluar la eficiencia del sistema de ventilación solar utilizando una reducción de área en el tubo aplicando el principio de Bernoulli. Esta investigación utiliza la energía solar para calentar el aire dentro de un tubo de chimenea. Utilizando el principio de menor peso, se provoca la succión del aire caliente en la parte inferior del mismo logrando el principio de ventilación aplicable a cualquier estructura. Seguidamente, se utiliza el efecto de Bernoulli para que el flujo de aire sea constante y a su vez mantener el espacio en estudio con una temperatura baja.

2. Marco Teórico

Una de las opciones más predominantes y exitosas aplicando el principio de flotabilidad del aire caliente es el uso de los sistemas de ventilación solar. Dos grandes logros deben ser asociados con la creación de un sistema de ventilación solar eficiente: 1) crear un sistema que pueda calentar el aire de manera efectiva y económica 2) apoyar la minimización del uso de la energía eléctrica por su alto costo y daños al ambiente. La principal preocupación es unir ambos conceptos óptimamente.

Sistemas de ventilación solar y chimeneas fueron usados efectivamente en el pasado. Estudios en el muro Trombe fueron realizados para evaluar su utilización como sistema de ventilación solar. El muro Trombe es un muro edificado hacia el sol

el cual utiliza la diferencia de densidad del aire caliente y frío con el fin de producir corrientes de flujo de aire. Estas corrientes de aire caliente o templado calientan o refrescan el recinto en el cual el muro Trombe ha sido instalado. El manejo de la flotabilidad del aire caliente por convección ha sido ampliamente estudiado mediante este sistema de ventilación [2]. Investigaciones relacionadas al manejo de la convección de aire forzada entre láminas paralelas fueron reportadas [3]. Las investigaciones fueron realizadas utilizando un pequeño sistema de ventilación a escala con paredes de 24 centímetros (cm) de altura. Otras investigaciones fueron realizadas cambiando el flujo del aire y medio [4-6]. El agua fue utilizada como medio alternativo para realizar experimentos que ayudaron a entender el funcionamiento del muro Trombe [7].

Seguidamente, estudios en el muro de Trombe fueron reportados como sistema de ventilación [8]. Se tomaban medidas de velocidad de flujo y perfiles de temperaturas para demostrar la eficiencia del sistema de ventilación. Sin embargo, se tiene poca información de mediciones específicas bajo condiciones controladas tanto en este sistema de ventilación como en las chimeneas.

La chimenea solar está compuesta principalmente de espacio hueco de cuerpo negro que actúa como masa térmica con abertura en la parte superior para la salida del aire caliente y en la parte inferior la entrada del aire permitiendo reemplazar el aire de la habitación por aire ambiente o fresco [1]. Similarmente, se estudiaba el flujo del aire a través del techo montada sobre una chimenea sola utilizando un analizador de gases [9]. Sin embargo, estos estudios también fueron desarrollados mediante condiciones no controladas. Consecutivamente, evidencia de la efectividad de la forma de techos Venturi basado en la aplicación del principio de Bernoulli fueron desarrollados a fin de generar una presión negativa significativa para inducir el movimiento del aire

[11]. Finalmente, se investigó el desempeño de una torre de ventilación natural a través de un análisis empírico en condiciones climáticas húmedas y calientes [12].

3. Metodología

El proyecto fue basado en el análisis comparativo del comportamiento de temperatura. Se deseaba comprobar al realizar el prototipo que la colocación de un reflector en forma cónica alrededor del tubo de la chimenea provocaba positivamente la concentración de los rayos solares sobre el tubo ocasionando que dentro del mismo se elevara la temperatura del aire a por lo menos entre 323 K y 333 K, cuando la temperatura ambiental estaba entre los 303 K a 308 K.

La elevación de la temperatura estableció una diferencia de densidad suficiente para crear circulación; con lo que se permitió la renovación del aire dentro de una vivienda. A su vez, con la aplicación de la ecuación de Bernoulli al reducir el área de la tubería, se aumentó la velocidad del aire al subir creando mayor succión del aire caliente produciendo así más eficiencia en este sistema. Las variables del sistema fueron definidas como una variable experimental y una variable de control. La variable experimental reflejaba un recinto con el prototipo diseñado mientras que la variable de control reflejaba un recinto cerrado simulando una estructura o vivienda sin ventilación exterior. Se procedió a diseñar un sistema de ventilación solar. El sistema de ventilación solar consistió de un tubo de lámina de zinc galvanizado de 15.2 centímetros (cm) de diámetro y una altura de 1.50 metros (m). En el centro del tubo, primero se llevó el angostamiento para el efecto Bernoulli. En este punto, el tubo se redujo al diámetro de 13 centímetros (cm). Segundo, el tubo se pintó de color negro para mejorar la radiación en el sistema de ventilación solar. Luego, se construyó una estructura de tubo de acero galvanizado de 1.2 centímetros (cm) y una platina de acero de 1 por

1.5 centímetros (cm). Para la pantalla reflectora, se utilizó la lámina de zinc galvanizado. Se procedió a calcular la particularidad de la pantalla reflectora concentrando todos los rayos solares en un punto. Se eligió un foco o punto y de allí se calculó la forma cónica parábola [13].

Para medir el efecto del sistema de ventilación se construyó dos recintos de iguales medidas. Estas medidas son 60 por 60 cm de ancho y 50 cm de altura. Estos recintos fueron totalmente cerrados y colocados a 5 centímetros sobre el suelo para que la renovación de aire se haga a nivel del suelo. En la figura 1 se muestra el prototipo experimental y el modelo de control. El primer modelo realizado es el prototipo del sistema de ventilación. El segundo recinto será el modelo de control. Para la medición de la temperatura se utilizó un termómetro de mercurio. Se tomaron medidas de la temperatura cada treinta (30) minutos entre las 10:30 a. m a 3:00 p. m en ambos recintos en el ambiente, a la sombra y en el tubo del sistema de ventilación. Debido a que no existe antecedentes investigativos sobre este artefacto, se utilizó el método experimental de obtención de datos mediante la medición de la temperatura en intervalos de tiempos definidos de 30 minutos.

Se tomaron como muestra la medición de las temperaturas en los dos recintos tomando en cuenta que uno posee el sistema de ventilación y el otro está totalmente cerrado. Por otra parte, se obtuvieron las temperaturas en el tubo del sistema y el ambiente. Se recopilaron estas mediciones por espacio de 30 días en las horas donde el sol es más fuerte a fin de evaluar si el sistema de ventilación cumple con el funcionamiento que se tenía planeado. Se debe tomar en cuenta que estas muestras fueron tomadas a la misma hora durante los treinta (30) días de experimentación.



Figura 1. Estructuras Finales: Recinto Cerrado de Control versus Recinto con Sistema de Ventilación.

4. Discusión de resultados

El proyecto busca utilizar el fenómeno de concentración de rayos solares por reflexión aplicándolo a un tubo a fin de crear un efecto de succión de una chimenea solar aumentando así su eficacia con la adición del estrechamiento que produce el efecto de Bernoulli en el tubo. Por ello, la eficacia del sistema de ventilación por radiación solar es probada inicialmente mediante la medición de temperaturas de las variables de control y experimentación así como la temperatura en el tubo. Los resultados obtenidos de las mediciones en promedio de temperatura a largo de los días de prueba mostrados en la figura 2 demuestran que el sistema de ventilación solar el cual consiste de un tubo calentado mediante la refracción solar logra elevar la temperatura de salida del aire hasta 10 grados Kelvin por encima de la temperatura ambiente.

Este sistema también mantiene la temperatura del recinto donde está incorporado en 2.5 grados Kelvin por debajo de la temperatura del recinto de control.

Se observan las diferencias de temperaturas promedio a lo largo de las horas del día de mayor radiación solar, de 10:30 a. m. a 3:00 p. m. En las tablas de los días estudiados encontramos una variación que va de 1 a 7 grados Kelvin. Estos resultados indican que la diferencia de temperatura del aire entre la entrada del sistema de ventilación en este caso la del ambiente y la de salida en el tubo

del sistema es suficiente para provocar la salida de aire. Similarmente, se puede apreciar que la temperatura promedio en el recinto de control se mantuvo en todo momento por encima de la temperatura promedio del recinto con el sistema de ventilación. Estos resultados nos indican que el sistema de ventilación logró, por el calentamiento del aire mediante la radiación concentrada en el tubo por la pantalla, mantener un flujo de aire constante y por lo tanto reemplazar el aire caliente dentro del recinto por aire más frío del exterior.

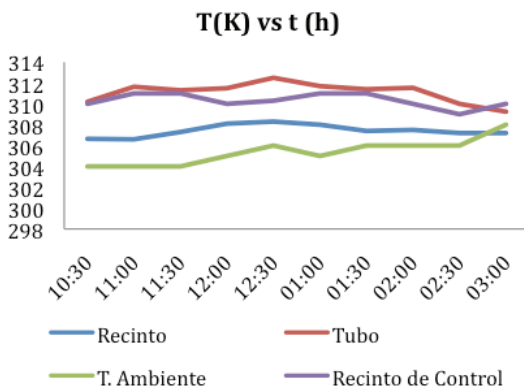


Figura 2. Distribución de las Temperaturas Promedio Medidas del Recinto, Tubo, Ambiente y Recinto de Control.

Finalmente se puede apreciar que las temperaturas de todas las muestras mantienen una relación ya que todas dependen de la radiación solar. Cabe mencionar que no teníamos equipo para medir la radiación solar, así que las medidas de temperaturas se tomaron despreciando la influencia del viento y la nubosidad parcial que también tienen influencia sobre la misma. Todos estos resultados fueron promedios de las temperaturas tomadas durante los treinta días de medición.

5. Conclusiones

Los datos recolectados producto de las mediciones en las variables de control y experimentación muestran positivamente el cumplimiento de los objetivos generales y específicos demostrando

que se pudo crear un sistema de ventilación el cual utiliza la energía solar como energía alternativa. El sistema de ventilación solar que consiste en un tubo calentado mediante la refracción solar logró elevar la temperatura de salida del aire de hasta 10 grados Kelvin por encima de la temperatura ambiente. Simultáneamente, este sistema también mantiene la temperatura del recinto donde está incorporado en 2.5 grados Kelvin por debajo de la temperatura del recinto de control. Los resultados indican que el sistema de ventilación que utiliza la energía solar puede provocar una diferencia de temperatura de aproximadamente de más de diez (10) grados Kelvin el cual logra que el aire caliente salga y sea reemplazada por aire fresco del exterior aumentando su eficacia con la adición del estrechamiento que produce el efecto de Bernoulli en el tubo. Este ensayo comprueba, entre el recinto de control y el de experimentación, una gran diferencia en las temperaturas y su eficiencia de acuerdo a las investigaciones realizadas al efecto de Bernoulli y el principio de aire caliente.

Teniendo en cuenta que los materiales utilizados para crear este sistema son accesibles y su facilidad en la confección del dispositivo de ventilación solar pueden producir un ahorro energético en las viviendas. Cabe mencionar que no se tenían equipos para medir la radiación solar, así que las medidas de temperaturas se tomaron despreciando la influencia del viento y la nubosidad parcial que también tienen influencia sobre la misma. Sin embargo, se recomienda realizar mayores mediciones de temperatura y flujo de aire con equipos de mayor exactitud que puedan determinar con precisión los datos que puedan ser obtenidos de la experimentación con el fin de comprobar la eficiencia energética producto de la utilización de este sistema de ventilación utilizando la radiación solar. Es importante medir el flujo de aire que expulsa el sistema de ventilación de acuerdo a la radiación solar en el momento. De igual manera, se recomienda variar la curvatura de

la pantalla reflectora a fin de estudiar la posibilidad de mejorar la eficiencia del dispositivo. Esta investigación es un estudio básico del sistema. Los recursos limitados no permitieron obtener datos más precisos que ayuden en la adecuación del prototipo.

Este dispositivo es un fuerte candidato en promover un ahorro energético en las viviendas a fin de disminuir la introducción de tecnologías de refrescamiento de energía eléctrica produciendo a largo plazo un ahorro de consumo energético.

Referencias Bibliográficas

- [1] S. Lal, C. Kaushik and P. K. Bhargava. "A study on stack ventilation system and integrated approaches", 2012.
- [2] Burek, S. A. M., and A. Habeb. "Air flow and thermal efficiency characteristics in solar chimneys and Trombe Walls.", *Energy and Buildings* 39.2, 2007: 128-135.
- [3] W. Elenbaas, "Heat dissipation of parallel plates by free convection", *Physica*, 9(1), 1942: 1-24.
- [4] W. Aung, L. S. Fletcher, and V. Sernas, "Developing laminar free convection between vertical flat plates with asymmetric heating", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 15, 1972: 2293-2308.
- [5] B. W. Webb, and D. P. Hill, "High Rayleigh number laminar natural convection in an asymmetrically heated vertical channel", *Transaction of ASME, Journal of Heat Transfer* 111, 1989: 649-656.
- [6] M.A. Habib, S.A.M. Said, S.A. Ahmed, and A. Asghar, "Velocity characteristics of turbulent natural convection in symmetrically and asymmetrically heated vertical channels", *Experimental Thermal and Fluid Science* 26, 2002: 77-87.
- [7] E. M. Sparrow, and L.F.A. Azevedo, "Vertical channel natural convection spanning between the fully developed limit and the single plate boundary layer limit", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 28 (10), 1985: 1847-1857.
- [8] C.J. Hocevar, and R.L. Casperson, "Thermocirculation data and instantaneous efficiencies to Trombe Walls", in: *Proceedings of the Fourth National Passive Solar Conference*, Kansas City, Missouri, USA, 1979, pp. 163-167.
- [9] C. Alfonso, and A. Oliveira, "Solar chimneys: simulation and experiment", *Energy and Buildings* 32 (2000) 71-79.
- [10] Blocken, B., et al. "On natural ventilation and thermal comfort in compact urban environments – the Old Havana case." *Building and Environment* 44.9, 2009: 1943-1958.
- [11] Van Hooff, T., et al. "PIV measurements and analysis of transitional flow in a reduced-scale model: ventilation by a free plane jet with Coanda effect". *Building and Environment*, 56, 2012: 301-313.
- [12] Lim, C. H., et al. "Performance of wind-induced natural ventilation tower in hot and humid climatic conditions", 9th WSEAS international conference on environment, ecosystems and development (EED'11). Montreux Switzerland: WSEAS. Vol. 31. 2011
- [13] M. Carlos, G. Enrique, Web extension to Escuela Universitaria Politécnica de Valladolid, www.eis.uva.es/energias-renovables/trabajos_07/COCINA-SOLAR.pdf [Consulta: 14 de enero de 2014].

Typha angustifolia L. evaluada como sustrato sólido orgánico natural para biorremediar agua subterránea contaminada con nitrato

Euclides M. Deago

Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá.
euclides.deago@utp.ac.pa

Gonzalo E. Pizarro

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental
Pontificia Universidad Católica de Chile.
gpizarro@ing.puc.cl

Resumen— Actualmente las aguas subterráneas mantienen altos niveles de contaminación por nitrato, incremento de actividades agrícolas. En consecuencia, recientes investigaciones se han enfocado en estudiar Sustratos Sólidos Orgánicos Naturales (SSON) para biorremediar las aguas subterráneas, obteniendo resultados alentadores. Sin embargo, aún existen aspectos que deben profundizarse, tales como el aporte de nutrientes desde los SSON, que son fundamentales para la desnitrificación. Para ayudar a clarificar estos aspectos, investigamos *Typha angustifolia* L. (*T. angustifolia*) como SSON. En este artículo presentamos resultados de ensayos de desnitrificación realizados en reactores batch con material detrítico de *T. angustifolia* colectado en invierno y verano. La liberación de DQO por hidrólisis durante el ensayo de invierno (115 mg DQO/día) casi duplicó al valor obtenido en verano (60 mg DQO/día). Se observaron similares rendimientos de desnitrificación usando carbono orgánico liberado por lixiviación e hidrólisis, lo cual sugiere similitud entre estos carbonos. Además, se comprobó que el nitrógeno biodisponible en el material detrítico fue usado por las bacterias para síntesis celular. Los hallazgos de este estudio indican que es viable la desnitrificación del agua subterránea usando *T. angustifolia*; además, aportan conocimientos relevantes sobre el uso de materiales naturales como fuentes alternativas de carbono.

Palabras claves: Desnitrificación; *Typha angustifolia* L.; Sustratos Sólidos Orgánicos Naturales; biorremediación, aguas subterráneas.

Abstract— Currently groundwater maintains high nitrate contamination due to increased agricultural activities. Consequently, recent research has focused on studying Natural Organic Solid Substrates (NOSS) for bioremediation of groundwater, obtaining encouraging results. However, there are still aspects that need further study, such as the supply of nutrients from the NOSS, which are essential for denitrification. To help clarify these aspects, we investigated *Typha angustifolia* L. (*T. angustifolia*) as NOSS. In this paper we present results of denitrification tests in batch reactors *T. angustifolia* detrital material collected in winter and summer. The release of COD by hydrolysis during winter testing (115 mg COD/day) almost doubled the value obtained in summer (60 mg COD/day). Similar yields of denitrification using organic carbon released by leaching and hydrolysis were observed, suggesting similarity between these carbonos. Furthermore, it was found that the bioavailable nitrogen in the detrital material was used by bacteria for cell synthesis. The findings of this study indicate that groundwater denitrification is feasible using *T. angustifolia*; also they

provide important insights into the use of natural materials as alternative carbon sources.

Keywords— *Denitrification; Typha angustifolia L.; Natural Organic Substrate Solid; bioremediation; ground water.*

Tipo de artículo: Original

Fecha de recepción: 26 de febrero de 2015

Fecha de aceptación: 12 de mayo de 2015

1. Introducción

A nivel mundial la disponibilidad de agua ha disminuido en cantidad y calidad. Esto es causado por el aumento de la población y la contaminación asociada a la agricultura intensiva y a los altos índices de aplicación de fertilizantes [1]. En los Estados Unidos, más del 75 % de los estados reportan que sus aguas subterráneas son contaminadas por actividades agrícolas; siendo el nitrato el principal contaminante [2]. Al igual que en los Estados Unidos, en Europa la principal fuente de contaminación de las aguas subterráneas se asocia a las actividades agrícolas [3]. En los países europeos el consumo de nitrógeno inorgánico alcanzó un máximo de 11 millones de toneladas anuales en la década de los 80, y aunque se ha presentado una disminución en su uso, la cantidad de toneladas en los años más recientes está en el orden de los 9 a 10 millones [4]. Este elevado consumo de fertilizantes en Europa repercute negativamente, contaminando entre 32 % y 80 % de las aguas subterráneas [3].

A raíz de esta alta contaminación con nitrato, se ha señalado la necesidad de estudiar la composición y biodisponibilidad de carbonos orgánicos para biorremediación *in situ* de las aguas subterráneas con bacterias desnitrificantes [3]. En este sentido, han surgido iniciativas para investigar Sustratos Sólidos Orgánicos Naturales (SSON) para la biorremediación de las aguas subterráneas, tales como paja de trigo y aserrín [5-7]. Sin embargo, a pesar de los avances logrados en

la materia, hay aspectos poco claros en el uso de SSON, tales como: liberación de carbono orgánico y el aporte de nitrógeno, en función del grado de madurez, contenido lignocelulósico, de nutrientes y humedad.

Para responder estas interrogantes en este estudio se seleccionó la *T. angustifolia*, la cual es una gramínea diseminada en climas fríos, templados y tropicales [8], nativa de marismas, pantanos y humedales [9]. *T. angustifolia* es una especie de tallo robusto y hojas ensiformes que puede alcanzar hasta 3 m de altura [9]. Esta planta es usada como depuradora de aguas residuales en humedales artificiales [10, 11]. En países como Chile y Perú, tiene otros usos, tales como: material de construcción para embarcaciones artesanales; alimentos para el ganado y confección de artesanías [12]. En contraste a su amplio uso, en varias partes del mundo es considerada una especie invasiva [13-15].

Consideramos que esta investigación aporta información relevante en el uso de gramíneas, ya que son pocos los estudios que han investigado este tipo de SSON [16, 17].

2. Materiales y métodos

2.1 Colecta de *T. angustifolia*

Para esta investigación se usó *T. angustifolia* colectada en la Laguna de Baticó a 40 km al norte de la ciudad de Santiago de Chile. Las plantas se colectaron en invierno (Agosto) y verano (Febrero). En los ensayos se usó el tallo de las plantas (material detrítico), porque es donde se concentra el mayor porcentaje de carbono orgánico (como celulosa) [18].

2.2 Caracterización de material detrítico de *T. angustifolia*

Las muestras de los materiales detríticos fueron secadas a 105 °C por 24 horas [19]. El contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa fue obtenido usando el método de Van Soest [20]. El contenido

de nitrógeno se obtuvo con el método Kjeldahl y el carbono total fue obtenido por el método de combustión [19]. El nitrógeno indisponible se obtuvo según Goering & Van Soest [21]. El contenido de cationes presentes en los materiales detríticos se determinó mediante digestión de ácido nítrico y detección de ICP [19]. La fracción biodegradable y carbono orgánico disponible se determinaron con la metodología propuesta por Van Soest [22].

El carbono orgánico biodisponible en los materiales detríticos fue llevado a masa de DQO, el cual se determinó siguiendo los siguientes pasos: i) se obtuvo el contenido de celulosa de la masa seca total del material detrítico de los SSON; ii) se determinó la masa de carbono orgánico presente en la celulosa; iii) la masa de celulosa fue considerada equivalente a la masa de CH₂O; iv) finalmente, al carbohidrato se le determinó la masa de electrones equivalentes de DQO.

2.3 Preparación de reactores de lixiviación

El material detrítico usado en cada ensayo fue lavado cuidadosamente para eliminar impurezas presentes en su superficie. Una vez lavado el material, se seccionaron en trozos de 1 cm; luego se irradiaron con luz ultravioleta para su desinfección. Se usó luz ultravioleta, porque es un método de desinfección eficaz usado para reducir poblaciones microbianas presentes en la superficie de los vegetales [23]. Se emplearon lámparas de efecto germicida, cuya longitud de onda estaba entre los 245 nm y 345 nm. La dosis aplicada fue de 1.2 KJ/m² por un período de 10 minutos. Esta dosis ha sido reportada como efectiva para abatir las poblaciones microbianas de las superficies de materiales vegetales [24].

El agua y las botellas usadas en los ensayos fueron esterilizadas. Los reactores se prepararon por triplicado en una campana de flujo laminar. En el ensayo se usaron agitadores termo-regulados para mantener la temperatura en los reactores a

30 ± 2 °C y agitados a 150 rpm. El volumen total usado en los ensayos fue 500 mL (agua + material detrítico húmedo). La masa húmeda de material detrítico de *T. angustifolia* usada en cada reactor fue de 40.7 g. Los volúmenes de agua en los reactores de invierno y verano con *T. angustifolia* fueron 417 mL y 456 mL, respectivamente. Esta diferencia en el volumen de agua se debió a las densidades de los materiales detríticos.

2.4 Configuración de reactores biológicos

Los ensayos consistieron de reactores batch con un volumen total 2 L (agua + material detrítico húmedo). La relación agua - material detrítico fue de 1/6 para el ensayo de invierno, según lo realizado por Gibert et al. [25]. La masa usada de *T. angustifolia* fue 163 g. Para el ensayo de verano se usó la misma masa húmeda. Por lo tanto, el volumen de agua usada en los reactores de invierno y verano fueron 1667 ml y 1810 ml, respectivamente.

Los reactores se cubrieron con papel aluminio para impedir la entrada de la luz solar. En cada ensayo se utilizó agua desionizada y se dosificó una concentración de nitrato de 100 mg N-NO₃-/L, usando NaNO₃. Los reactores se operaron en rangos de pH entre 6.5 y 7.5; para ello se dosificaron buffer de fosfato (3 g/L de KH₂PO₄ y 3 g/L K₂HPO₄). Se inyectó nitrógeno gaseoso de 5 a 10 minutos para desairar los reactores batch y así mantener condiciones anóxicas. Los reactores se operaron con agitación continua de 150 rpm y a una temperatura de 30 ± 2 °C, usando agitadores termo-regulados.

Los materiales detríticos de *T. angustifolia* fueron usados sin previo tratamiento, es decir que se mantuvo su contenido de humedad inicial, para propiciar condiciones naturales. En estudios similares, el material detrítico de gramíneas fue deshidratado [26]. Los materiales detríticos de *T. angustifolia* no fueron lavados ni irradiados con luz ultravioleta como se hizo en los ensayos de lixiviación; de esta forma se permitió el crecimiento de las bacterias nativas adheridas a estos SSON.

El uso de bacterias nativas adheridas a SSON ha sido reportado [16, 25]. Además, no se dosificaron micronutrientes en los reactores batch biológicos, ya que se asumió que las bacterias los obtendrían de los materiales detríticos.

Es importante señalar que se adoptó la DQO como la medida de referencia para el carbono orgánico medido directamente en el agua, aquel usado en la reducción de nitrato y para representar el carbono orgánico liberado desde los SSON. Esto fue adoptado porque está demostrado que la DQO es el más simple y fácil de los parámetros individuales usados para describir la concentración de desechos o aguas residuales, en términos de mg O₂/L [27]. Además, es la única medida que permite relacionar los equivalentes de electrones de sustrato orgánico, biomasa activa y el oxígeno utilizado [28]. De esta forma es posible hacer balances de masas de carbono orgánico entre el medio acuoso y los SSON.

En este artículo se usarán los términos de carbono orgánico y DQO, para representar biomasa biodisponible en los materiales detríticos y el donante de electrones o sustrato orgánico.

3. Resultados

3.1 Caracterización de material detrítico

Las colectas de *T. angustifolia* se realizaron en dos estaciones del año (invierno y verano), con el propósito de evaluar la variabilidad del contenido de nutrientes y el grado de madurez (tabla 1). Los resultados obtenidos, reflejan que la planta cosechada en invierno registró un mayor contenido de nutrientes (por ejemplo, nitrógeno). En cuanto a los contenidos de elementos inorgánicos, se encontró poca variación en ambos períodos. Un factor común identificado entre los materiales detríticos fue el alto contenido de sales, siendo el Sodio el de mayor valor (Tabla 1).

Tabla 1. Características físico-químicas de materiales detríticos de *T. angustifolia* colectadas en verano e invierno

Parámetros	Invierno	Verano
Ca (mg/g)	1.53	1.55
Fe (mg/g)	0.09	0.02
K (mg/g)	3.32	1.97
Mg (mg/g)	0.30	0.16
Na (mg/g)	26.00	28.4
P (mg/g)	0.25	0.1
N (%)	1.23	0.27
C (%)	44.50	46.5
C/N	36.30	174
Celulosa (%)	37.66	44.30
Hemicelulosa (%)	18.54	19.20
Lignina (%)	6.80	11.21
Carbono orgánico (%)	35.20	31.80
Fracción Biodegradable, f _b (%)	67.10	57.60
Densidad (g/mL)	0.49	0.93
Materia seca (%)	11.90	91.00
Cenizas (%)	22.10	13.40
Proteínas (%)	7.67	1.67

3.2 Ensayos de Lixiviación

En los ensayos de lixiviación se encontró que las concentraciones de nitrato, nitrito y amonio en el sobrenadante de reactores de invierno fueron 1.78 mg N-NO₃⁻/g_{sust}, 0.08 mg N-NO₂⁻/g_{sust} y 1.1 mg N-NH₄⁺/g_{sust}, respectivamente (tabla 2). Para el ensayo de verano no se detectaron nitrato ni nitrito, mientras que el contenido de amonio en el sobrenadante fue 0.01 mg N-NH₄⁺/g_{sust}. Los resultados de DQO en los ensayos de lixiviación fueron altos, principalmente en los reactores con *T. angustifolia* de invierno (tabla 2).

Tabla 2. Masa de nitrógeno, DQO y otros elementos lixivados por gramo de masa seca de *T. angustifolia*.

Reactores	Parámetros (mg/(g _{sust} como masa seca))							
	N-NO ₃ ⁻	N-NO ₂ ⁻	N-NH ₄ ⁺	DQO	Ca	K	Cl	Na
<i>T. angustifolia</i> de invierno	1.78	0.08	1.1	44.5	6.0	21.2	92.5	21.3
<i>T. angustifolia</i> de verano	0	0	0.01	13.7	0.26	2.25	4.54	0.61

3.3 Ensayos batch biológicos

3.3.1 Comportamiento de componentes nitrogenados en sobrenadantes

Nitrato

Durante la operación de los reactores batch se dosificó de nitrato cada 2 o 3 días, para obtener una concentración de 100 mg N-NO₃⁻/L. El nitrato se consumió totalmente y se mantuvo el mismo comportamiento durante los períodos de operación de los reactores (figura 1a y 1b). La única diferencia encontrada en los ensayos se registró en los primeros 7 días de operación de los reactores de invierno, lo cual se atribuye a la adaptación de bacterias y a la liberación de nitrato desde *T. angustifolia*, debido a la lixiviación.

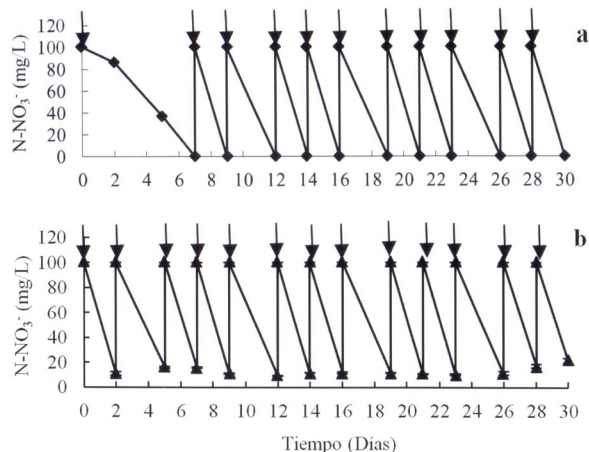


Figura 1. a) Las mediciones de nitrato en los ensayos de invierno reflejaron una completa desnitrificación b). En los ensayos de invierno se observó una remoción de nitrato por arriba 90 % (↓ dosificación de nitrato).

Nitrito

En el ensayo de invierno se registraron altos valores de nitrito en los primeros días de operación y posterior al día ocho la concentración estuvo menor a 0.3 mg N-NO₂⁻/L. En tanto, la concentración de nitrito fue casi cero en los ensayos de verano (figura 2).

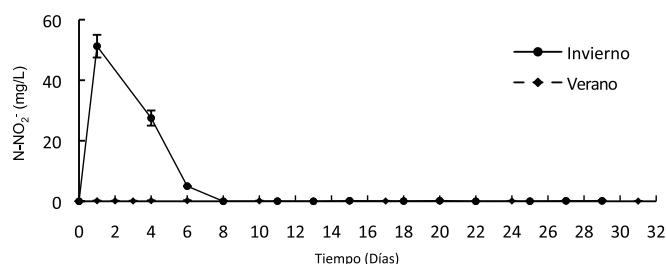


Figura 2. Resultados de nitrito en el sobrenadante de los reactores de invierno y verano. El nitrito del ensayo de invierno pudo ser el resultado de una desnitrificación parcial.

Amonio

Los resultados de amonio en el sobrenadante reflejaron un comportamiento similar durante la operación de los reactores batch, ya que los máximos valores se obtuvieron en el sexto día de operación (figura 3). Las concentraciones máximas de amonio en los ensayos de invierno y verano fueron 23.8 ± 2.45 mg N-NH₄⁺/L y 39.5 ± 2.25 mg N-NH₄⁺/L, respectivamente. Posterior al sexto día, se registró una disminución del amonio en el sobrenadante de los reactores, hasta llegar a valores menores a 3 mg N-NH₄⁺/L.

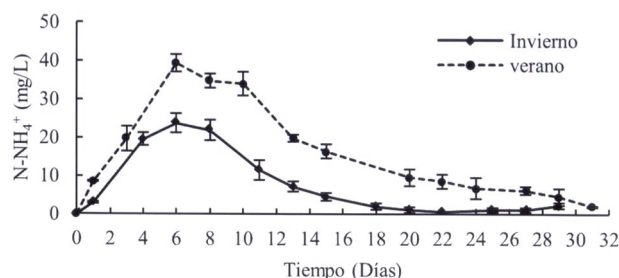


Figura 3. El comportamiento de la liberación de amonio desde *T. angustifolia* fue similar en los reactores batch de invierno y verano.

3.3.2 Balance de masa de nitrógeno en *T. angustifolia*

El balance de nitrógeno en el material detrítico se hizo en porcentaje de masa seca. Para ello se determinó el contenido de nitrógeno total antes y después de los ensayos; de igual manera, se

determinó el nitrógeno no disponible. El nitrógeno no disponible es aquel que se encuentra entrelazado con lignina, la cual que no es hidrolizable por bacterias [21].

La masa de nitrógeno total presente en los materiales detríticos de *T. angustifolia* de invierno antes y después de los ensayos fueron 247 mg N y 139 mg N, respectivamente (tabla 3). Al restar estos dos valores se encontró que el nitrógeno liberado durante los ensayos fue 108 mg N. Esta masa representa el 68 % del nitrógeno biodisponible en la *T. angustifolia* de invierno. En los ensayos con *T. angustifolia* de verano, la masa de nitrógeno fue de 401 mg N antes del ensayo y 300 mg N al finalizar las pruebas. Esto indica que durante la operación de los reactores batch se liberó una masa de nitrógeno de 101 mg N. Esto corresponde al 97 % del nitrógeno biodisponible en el material detrítico de *T. angustifolia*.

Tabla 3. Balance de nitrógeno en materiales detríticos de *T. angustifolia*

Identificación	N total (mg)	N no disponible (mg)
<i>T. angustifolia</i> invierno antes de ensayos	247	88
<i>T. angustifolia</i> invierno después de	139	88
<i>T. angustifolia</i> verano antes de ensayos	401	297
<i>T. angustifolia</i> verano después de ensayos	300	297

3.3.3 Comportamiento de DQO en el sobrenadante

Los resultados DQO muestran que las máximas masas para los ensayos de invierno y verano se registraron al cuarto y sexto día de operación de los reactores, respectivamente (figura 4a). En el ensayo de invierno la máxima masa de DQO fue 1342 mg y en verano fue de 3059 mg (figura 4a). Desde el octavo día, la DQO disminuyó progresivamente hasta el final del ensayo. En estos ensayos se observó que el decrecimiento fue de tipo lineal (figura 4b).

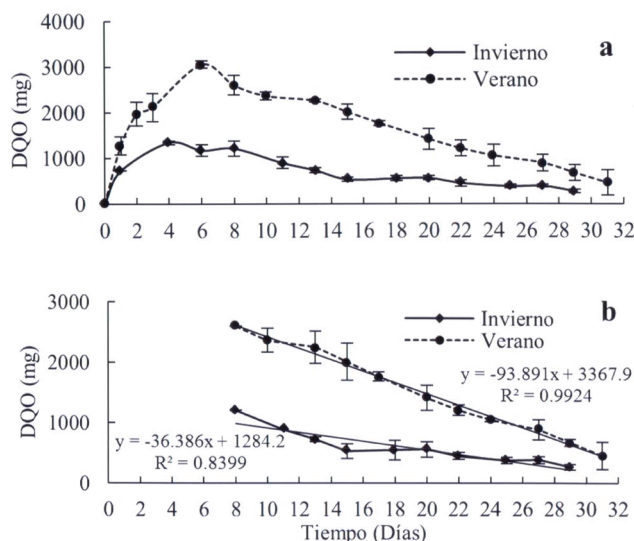


Figura 4. a) La masa de DQO del ensayo de verano fue mayor que el liberado en el ensayo de invierno; b) El comportamiento de la disminución de la DQO entre el día 8 y 29 fue similar en los ensayos de invierno y verano.

El comportamiento de la liberación de DQO total acumulado en el sobrenadante se presenta en la figura 5. Estos resultados se obtuvieron de sumar los valores de DQO medidos en el sobrenadante de los reactores y la DQO equivalente usada en la reducción de nitrato. La DQO equivalente se obtuvo de multiplicar el nitrato reducido, por el factor estequiométrico 2.225 mg DQO/mg N-NO₃⁻ [16]. La liberación de DQO desde material detrítico de *T. angustifolia* de invierno y verano fue similar hacia el final de los ensayos (figura 5).

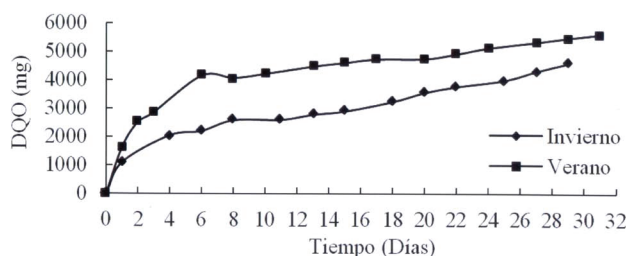


Figura 5. DQO acumulado en el sobrenadante de los reactores batch para los ensayos de invierno y verano tendieron a ser similares hacia el final de los ensayos.

3.3.4 Balance de masa de carbono orgánico (como DQO) en sobrenadante y materiales detríticos

Se realizó un balance de DQO en el sobrenadante de los reactores batch, para definir cuánto se liberó debido a lixiviación y a hidrólisis. En los ensayos de invierno se identificó que 2.2 g de DQO se debió a lixiviación y 2.4 g de DQO se atribuye a hidrólisis; mientras que en verano, la masa de DQO por lixiviación e hidrólisis fueron 4.1 g y 1.5 g, respectivamente (tabla 4).

Tabla 4. Balance de masa de DQO presente en el sobrenadante de los reactores y en los materiales detríticos de *T. angustifolia* colectadas en invierno y verano

Ensayos	DQO en el sobrenadante			DQO disponible en materiales detríticos	
	Por Lixiviación (g)	Total acumulado (g)	Por hidrólisis (g)	Antes del ensayo (g)	Después del ensayo (g)
Invierno	2.2	4.6	2.4	7.0	4.6
Verano	4.1	5.7	1.5	69.7	68.2

3.3.5 Relación C/N en sobrenadante

Las relaciones C/N para los ensayos de invierno y verano se determinaron con la DQO medida y el nitrato dosificado. Para el ensayo de invierno la relación C/N promedio fue de 5.1, con un valor máximo de 7.2. En tanto, el valor promedio y máximo de C/N para el ensayo de verano fue 12.4 y 9.6, respectivamente (Figura 6).

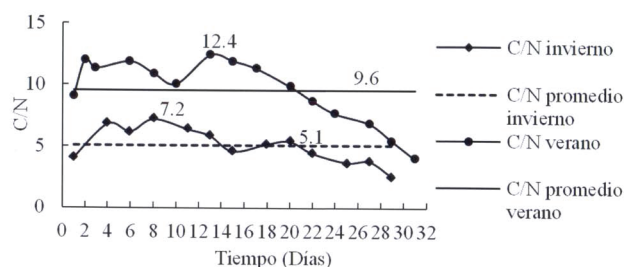


Figura 6. Relación C/N en el sobrenadante de reactores batch con *T. angustifolia* de invierno y verano estuvieron cercanos a los valores estequiométricos.

4. Discusión

4.1 Propiedades físicas y químicas de materiales detríticos

Los resultados de caracterización del material detrítico presenta que la *T. angustifolia* de invierno presentó un mayor contenido de nitrógeno lo cual se refleja en una menor relación C/N, así como un menor porcentaje lignocelulósico (tabla 1). Estos resultados son concordantes con estudios de consumo y almacenamiento de nutrientes en la *T. angustifolia* [30-32]. En tanto, el material detrítico de *T. angustifolia* de verano mostró una estructura más robusta y fuerte, lo que indica que la planta estaba más desarrollada. Este grado de madurez se debió a la alta actividad vegetativa de la planta en donde hay floración, la cual se presenta en los meses calurosos del año. Ratushnyak [33] señala que *T. angustifolia* produce mayor cantidad de carbohidratos como Fructuosa, Glucosa y Maltosa durante el verano.

En base a estos resultados, se infiere que *T. angustifolia* de invierno se degradaría con mayor rapidez. La biodegradabilidad de un material detrítico disminuye según el grado de madurez, lo cual está relacionado con el contenido lignocelulósico [18]. La degradación se presenta más rápido por tener un menor porcentaje de lignina, facilitando a las bacterias obtener el carbono orgánico [29]. De igual forma, la relación C/N juega un papel importante en la degradación de los materiales detríticos, ya que las plantas que presentan una menor relación de C/N contienen más nitrógeno disponible para las bacterias para su síntesis celular y por ende el tiempo de biodegradación estos materiales será menor [18].

4.2 Compuestos solubles liberados en ensayos de lixiviación

Para tener claridad de la liberación de compuestos solubles debido a lixiviación desde materiales detríticos de *T. angustifolia*, se aplicó el método de desinfección con irradiación UV, con

el objetivo de abatir las poblaciones microbianas presentes en la corteza de los materiales detríticos usados en la investigación. En este caso, se quería demostrar cuánto sustrato soluble se liberaba en la fase abiótica, es decir por lixiviación. De igual forma, la supervivencia de alguna población microbiana a la irradiación de luz UV no alteró el ensayo, ya que las condiciones del sistema no favorecieron el desarrollo de las bacterias. Estas condiciones corresponden a la ausencia de aceptor de electrones externos (nitrato u oxígeno), necesarios para que ocurra la degradación biológica de materiales orgánicos [18, 27].

Para los ensayos de lixiviación con material detrítico colectado en invierno, los resultados de los compuestos nitrogenados en el sobrenadante concuerdan con la caracterización del material detrítico de invierno, el cual presentó el mayor porcentaje de nitrógeno (tabla 1). En tanto, en los ensayos de verano, el aporte fue menor (tabla 1). Asaeda et al. [30], señalan que la *T. angustifolia* acumula nutrientes en la época de crecimiento, la cual se presenta en los meses del año con menores temperaturas.

A pesar que el amonio es la primera opción como fuente de nitrógeno de las bacterias para su síntesis celular, su acumulación en el agua es desfavorable, principalmente si la *T. angustifolia* es usada como sustrato en la remoción de nitrato del agua potable. En tanto, la liberación de nitrato y nitrito soluble durante la lixiviación también es desfavorable para un proceso de desnitrificación, porque estos iones son precisamente los que se requiere remover del agua. Zhang et al. [6], detectaron liberación de compuestos nitrogenados (N-NO_3^- , N-NO_2^- y N-NH_4^+) usando paja de trigo, lo cual lo consideran una limitación en la remediación del agua subterránea.

La liberación de DQO por gramo de material detrítico en los ensayos de invierno fue 3.3 veces mayor que los obtenidos en los ensayos de verano. La menor liberación de DQO por gramo de material detrítico en los ensayos de verano está

relacionada con su menor contenido de humedad. También se puede destacar que en la lixiviación hubo altas concentraciones de Sodio y Potasio, principalmente en los reactores que contenían *T. angustifolia* de invierno (Tabla 2). La masa de Potasio liberada en los ensayos de invierno fue 9 veces mayor que el registrado en verano; mientras que el sodio fue 35 veces mayor. Basados en estos resultados, se sugiere precaución al momento de usar *T. angustifolia*; principalmente aquel material colectado en meses fríos del año, debido a los altos aportes de nitrógeno, carbono soluble y sales.

4.3 Ensayos batch biológicos

En estos ensayos se evaluó tanto la lixiviación como la hidrólisis. Estos ensayos se denominaron biológicos porque hubo participación de bacterias. Se consideró que las bacterias fueron responsables de la liberación del carbono orgánico por varios aspectos: i) que el pH mantenido en los microambientes de los reactores batch, estuvo entre 7 y 8; el cual es el rango de pH donde mejor se desempeñan las bacterias [34]; ii) además, en los ensayos se mantuvieron condiciones anóxicas, y según la literatura en los procesos de ruptura de componentes orgánicos, donde el aceptor de electrones es nitrato, los grupos de microorganismos que intervienen son bacterias [18]. En estudios similares al nuestro se encontró que el biofilm que creció sobre los SSON estaba constituido por bacterias [35, 36].

4.3.1 Comportamientos de componentes nitrogenados en sobrenadante de reactores biológicos

Las máximas tasas de desnitrificación obtenidas para los ensayos de invierno y verano fueron $50 \text{ N-NO}_3^-/\text{L}\cdot\text{d}$ y $45.25 \text{ mg N-NO}_3^-/\text{L}\cdot\text{d}$, respectivamente. La similitud entre las tasas de desnitrificación obtenidos en estos ensayos sugieren que las concentraciones de micronutrientes

requeridas por las bacterias para su actividad metabólica se obtuvieron del material detrítico, y que el carbono orgánico liberado fue similar en ambas pruebas, mostrando que hubo la concentración necesaria del donante de electrones. Una característica a destacar en estos ensayos fue que la remoción de nitrato estuvo entre 90 y 100 %, a pesar de las altas concentraciones de sales liberadas del material detrítico de *T. angustifolia*. En la literatura han reportado desnitrificación en tratamiento de aguas residuales con altos contenidos de sal [37]. Por lo tanto, se puede señalar que *T. angustifolia* es una fuente potencial de carbono orgánico, para usarlo en la remoción biológica de nitrato.

La presencia de nitrito en el ensayo de invierno se asocia a una desnitrificación incompleta, causada por la poca adaptación de las bacterias durante los primeros días de operación de los reactores. Esta condición también fue observada en ensayos preliminares (datos no mostrados). No se considera el oxígeno disuelto como causa de la presencia de nitrito, ya que este parámetro se mantuvo por debajo de 1 mg O₂/L.

En cuanto al amonio, se encontró que en invierno el aporte fue de 1.95 mg N-NH₄⁺/g_{sust}, siendo cuatro veces mayor al amonio aportado en los ensayos de verano (0.45 mg N-NH₄⁺/g_{sust}). La variación en el comportamiento del amonio en los ensayos con *T. angustifolia* se asocia a varios factores: (i) que se usó un valor constante de nitrato (100 mg N-NO₃⁻/L), lo cual generó una condición estable; (ii) además, hubo una liberación de amonio desde el material detrítico de *T. angustifolia* hasta un valor máximo y luego fue consumido por las bacterias. Esta presencia de amonio se debió a lixiviación y la hidrólisis de proteínas.

La hidrólisis de proteínas se consideró la principal responsable de la presencia de amonio, ya que se aportó el doble de la fase de lixiviación (tabla 3). En la biodegradación de materiales detríticos, las proteínas son las primeras en ser hidrolizadas por bacterias [18]. Vavilin *et al.* [38],

señalan que durante la degradación de proteínas se libera nitrógeno en forma de amonio. La presencia de amonio asociado a hidrolización de proteínas ha sido reportada en la desnitrificación usando SSON como chitina [39] y granos de madera [40]. Sin embargo, otros investigadores señalan que la presencia de amonio en sistemas desnitrificantes es causada probablemente por la Reducción Desasimilatoria de Nitrato a Amonio (RDNA) [6, 25, 41]. Sin embargo, para que dicha ruta de reducción de nitrato a amonio se presente, la relación C/N en el agua debe ser mayor al valor estequiométrico [42].

En nuestro estudio se descarta que la RDNA fuera la ruta formadora de amonio, dado que el valor promedio de la relación C/N en el sobrenadante de los reactores está cercano al valor estequiométrico (figura 6). Deago & Pizarro [16] señalan que el factor estequiométrico de la relación C/N es de 6.11, para la desnitrificación usando SSON como fuente de carbono orgánico y nitrógeno (como amonio) para síntesis celular. De hecho, Cuervo-Lopez et al [42], han reportaron desnitrificación en sistemas de tratamiento con valores de C/N cercanos a 34.

En el caso de usar *T. angustifolia* como SSON para biorremediación in situ, es decir en barreras permeables reactivas, como ha sido propuesto en investigaciones similares [25, 43], es posible que la ruta de la reducción de nitrato sea a amonio; dado que se ha encontrado flora microbiana en el suelo capaz de realizar esta ruta reductora de nitrato [44]. En estos casos, el amonio debido a RDNA podría ser favorable para plantas y microorganismos de ecosistemas con escaso contenido de nitrógeno [44].

4.3.2 Balance de masa de nitrógeno en materiales detríticos

Según el balance de masa de nitrógeno, 97 % del nitrógeno biodisponible de los materiales detríticos de *T. angustifolia* de verano fue consumido, mientras que en invierno se usó el 68 % del nitrógeno

biodisponible (tabla 3). Los resultados indican que las bacterias hidrolizaron proteínas presentes en el material detrítico y obtuvieron el nitrógeno para su síntesis celular. El consumo de nitrógeno fue similar en ambos ensayos, con 108 mg N en invierno y 101 mg N en verano, lo que indica que la adaptación de las bacterias al microambiente de los reactores fue favorable. Sin embargo, se observa que al final de los ensayos de invierno quedaron disponibles 51 mg de N en el material detrítico, mientras que en verano solo 3 mg (figura 7). El nitrógeno biodisponible en *T. angustifolia* de verano se agotó con mayor rapidez, debido a su menor contenido inicial (figura 7). Esta condición sugiere que una vez agotado el nitrógeno de los materiales detríticos, las bacterias usarían nitrato como su fuente de nitrógeno para síntesis celular.

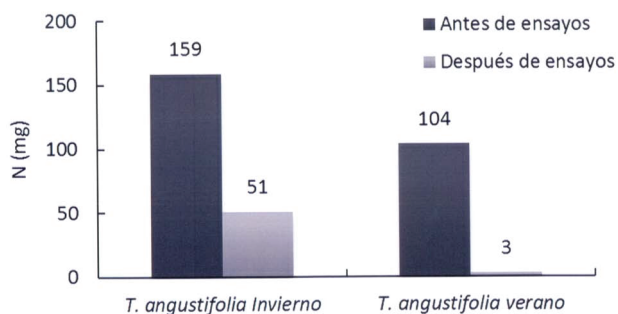


Figura 7. Contenido de nitrógeno en materiales detríticos antes y después de ensayos.

4.3.3 Comportamiento de liberación de DQO

Como se describió previamente, la liberación de DQO desde *T. angustifolia* fue identificada en dos fases: física y biológica. La fase física corresponde a lixiviación de compuestos soluble causada por la autólisis [18] y la fase biológica está asociada a la actividad hidrolítica de bacterias en crecimiento adherido [18, 27, 38]. La fase física o de lixiviación se presentó en los primeros 8 días (figuras 4a). En esta fase la liberación de DQO fue alta. En la segunda fase se refleja una alta actividad bacteriana, dado

que se incrementó el consumo de carbono soluble en el sobrenadante de los reactores batch (figura 4b). El comportamiento lineal de la disminución de DQO en el sobrenadante fue mayor en los reactores que contenían mayor masa de material detrítico. Esto se observó en los reactores con *T. angustifolia* de verano, donde la pendiente de consumo de DQO en el sobrenadante del reactor de verano fue 2.6 veces mayor que en invierno (figura 4b).

La adaptación de las bacterias al microambiente de los reactores batch, es atribuida al tipo de carbono orgánico lixiviado. Smith [45] indica que el carbono soluble lixiviado es de alta calidad y es responsable de promover el crecimiento y la actividad microbiana. Esta actividad microbiana fomenta la colonización de los sustratos sólidos, el cual es un paso obligado para la solubilización de productos que benefician a otros microorganismos [46].

El buen rendimiento observado en este estudio, posterior al día 8 (fase biológica), nos indica que las bacterias hidrolizaron carbonos orgánicos similares al liberado por lixiviación. Moran & Hodson [47], reportaron similitudes entre el carbono orgánico soluble liberado por lixiviación y el obtenido por hidrólisis del contenido lignocelulósico. Una vez agotado el carbono orgánico soluble, el siguiente paso en el proceso de biodegradación es el ataque de la celulosa [48]. Moran et al. [49], indican que la celulosa es el primer carbono estructural del material detrítico en ser degradado por microorganismos. Esta degradación se debe a la acción de las enzimas de bacterias hidrolíticas, las cuales rompen los enlaces covalentes que mantienen unidas las moléculas de glucosa [34]. Esta glucosa puede ser asimilada directamente por las bacterias desnitrificantes [18].

El siguiente esquema resume los procesos que intervienen en la liberación de carbono orgánico desde materiales detríticos y su uso en la desnitrificación del agua (figura 8).

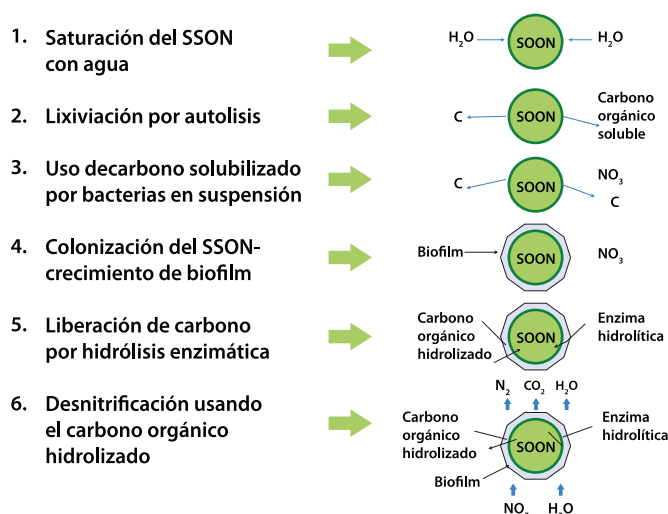


Figura 8. Esquema conceptual de la liberación de carbono orgánico desde SSON y su uso en la desnitrificación.

Aunque se ha identificado que la fase de lixiviación ayuda a la aclimatación de bacterias, el exceso de liberación de carbono orgánico es una condición no deseada. Esta fase de lixiviación está en función de: i) el área de contacto del SSON por donde ingresa el agua; ii) a la concentración de los carbonos orgánicos solubles presente en las vacuolas de las células vegetales; iii) y estos orgánicos solubles dependen de la madurez o edad de la planta. Por lo tanto, se reitera que la lixiviación es una etapa importante a considerar en la desnitrificación usando *T. angustifolia* como fuente de carbono orgánico.

Como se observaron comportamientos similares del consumo de carbono a lo largo de los ensayos, se considera que la hidrólisis es el último proceso de biodegradación de materiales detríticos. Esto se debió a las condiciones anóxicas mantenidas durante las pruebas. Angelidaki & Sander [27] señalan que la degradación en condiciones anóxicas depende de la disponibilidad de aceptor de electrones como nitrato.

De los resultados obtenidos en los ensayos batch (figura 5), estimamos las tasas de liberación de DQO debido a lixiviación e hidrólisis (tabla 5).

Tabla 5. Comportamiento de la liberación de la masa de DQO desde *T. angustifolia* en cada ensayo batch

Fase	mg DQO/día
Lixiviación - invierno	368
Hidrólisis - invierno	115
Lixiviación - verano	693
Hidrólisis - verano	60

La mayor tasa de liberación de DQO por lixiviación se presentó en verano, lo cual se debió a altas concentraciones de sustratos solubles fácilmente asimilables presentes en el material detrítico de *T. angustifolia*; mientras que la tasa de liberación de DQO debido a hidrólisis fue mayor en invierno, dado que el material detrítico de *T. angustifolia* usado contenía menor porcentaje de lignina. Estos resultados nos muestran que en términos prácticos, es más favorable usar *T. angustifolia* colectada en verano, porque aumenta el tiempo de degradación y por ende su vida útil.

4.3.4 Balance de masa de DQO en materiales detríticos y sobrenadante

En los ensayos de invierno, 48 % de DQO liberado al sobrenadante se asocia a lixiviación (112.5 mg DQO/g_{sust}) y 52 % corresponde a hidrólisis (124.21 mg DQO/g_{sust}); mientras que en verano, 71 % se atribuye a lixiviación (27.6 mg DQO/g_{sust}) y 29 % a hidrólisis (10.7 mg DQO/g_{sust}). Para los ensayos de invierno se aprecia que hubo un aporte similar de las masas de carbono por lixiviación y por hidrólisis; sin embargo, en los ensayos de verano 2/3 del carbono liberado se debe a lixiviación. La disparidad en las proporciones de DQO liberada por lixiviación está asociada a las concentraciones de carbono orgánico soluble presentes en los materiales detríticos, donde 15.3 g DQO/L se obtuvo en los materiales de invierno y 278 g DQO/L para verano. En cuanto a la DQO liberada por hidrólisis, se encontró que en invierno se usó 34 % del carbono estructural biodisponible (como celulosa) en el material detrítico; mientras

que en el ensayo de verano se usó solo 2.2 %. Esta diferencia en la liberación de carbono por hidrólisis se asocia a varios factores: i) la alta disponibilidad de DQO soluble en el sobrenadante de los reactores al inicio de los ensayos (debido a lixiviación) aportado en los ensayos de verano; ii) y que la masa de *T. angustifolia* de verano fue aproximadamente 8 veces mayor a la masa seca de *T. angustifolia* de invierno.

Los resultados confirman lo señalado en la literatura, la cual indica que en la época de verano las plantas producen mayor cantidad de carbono soluble, debido a una alta actividad vegetativa de las plantas [33, 50]. Ratushnyak [33], señala que en la época de alta actividad vegetativa, los carbohidratos son los principales carbonos orgánicos producidos por *T. angustifolia*. Esto también confirma el supuesto sobre la similitud en el tipo de carbono orgánico liberado durante las fases de lixiviación y biológica.

La capacidad que tienen las bacterias de aprovechar los SSON como soporte para su crecimiento, fuente carbono orgánico, nitrógeno y otros nutrientes, hacen que los sistemas desnitrificantes sean más simples y autosuficientes que aquellos que requieren dosificación de sustratos solubles.

5. Conclusiones

En este estudio se evaluó el comportamiento de la liberación de carbono orgánico y nutrientes desde material detrítico de *T. angustifolia*, colectados en diferentes épocas del año. Se identificó que el aporte de carbono y nutrientes se debió a lixiviación (por autólisis) y a hidrólisis enzimática. La liberación de carbono y nutrientes estuvieron regulados por el contenido de humedad, densidad y área superficial del material detrítico. Se encontró que *T. angustifolia* colectada en verano, aportó mayor masa de carbono orgánico por gramo de material y se confirmó que el amonio medido en el sobrenadante de los reactores batch procedía de los

materiales detríticos de *T. angustifolia*. Este amonio fue la fuente de nitrógeno para síntesis celular de las bacterias.

Para el mejor aprovechamiento de *T. angustifolia* se recomienda que su colecta sea en verano, dado que la planta contará con mayor grado de madurez. Propiedades como la relación C/N, el contenido lignocelulósico y la densidad serán mayores, haciendo más lenta la degradación del material y en consecuencia tendrá una mayor vida útil; además, es más recomendable usar materiales detríticos con mayor grado de madurez, dada su alta actividad vegetativa, en donde la planta genera sustratos solubles fácilmente asimilables por bacterias desnitrificantes en altas concentraciones.

Los hallazgos de esta investigación aportan información relevante que permite considerar la *T. angustifolia* como potencial SSON para biorremediación del agua subterránea contaminada con nitrato.

6. Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento al Gobierno de la República de Panamá por financiar nuestros estudios doctorales, mediante el Programa de Becas de Excelencia Profesional SENACYT-IFARHU 2006-2010, de la cual es producto esta investigación.

Referencias Bibliográficas

1. Chambon, P., et al., *WHO Guidelines for drinking-water quality: volume 2. Health Criteria and Other Supporting Information - Addendum*. 1998, World Health Organization: Geneva, Switzerland. p. 1-127.
2. Ongley, E.D. *Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos. (Estudio FAO Riego y Drenaje - 55)*. 1997; Available from: <http://www.fao.org/docrep/W2598S/w2598s00.htm#Contents>.
3. Rivett, M.O., et al., *Nitrate attenuation in groundwater: A review of biogeochemical controlling processes*. *Water Research*, 2008. 42(16): p. 4215-4232.
4. CCE, *INFORME DE LA COMISION: aplicación de la Directiva 91/676/CEE del Consejo relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura*, in COM(2002) 407 final 2002: Bruselas.
5. Wang, X.M. and J.L. Wang, *Nitrate removal from groundwater using solid-phase denitrification process without inoculating with*

- external microorganisms. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2013. 10(5): p. 955-960.
6. Zhang, J.M., et al., *Behavior of solid carbon sources for biological denitrification in groundwater remediation*. *Water Science and Technology*, 2012. 65(9): p. 1696-1704.
 7. Fan, Z.X., J. Hu, and J.L. Wang, *Biological nitrate removal using wheat straw and PLA as substrate*. *Environmental Technology*, 2012. 33(21): p. 2369-2374.
 8. Asaeda, T., et al., *Latitudinal characteristics of below- and above-ground biomass of Typha: A modelling approach*. *Annals of Botany*, 2005. 96(2): p. 299-312.
 9. Earl, J.S. *Typha angustifolia*. *Narrow Leaf Cattail*. 2004; Available from: <http://www.rook.org/earl/bwca/nature/aquatics/typhaan.html>.
 10. Firdaus e, B. and S. Khilji, *Bioaccumulation of metals from tannery sludge by Typha angustifolia L.* *African Journal Of Biotechnology*, 2008. 7(18): p. 3314-3320.
 11. Nilratnisakorn, S., P. Thiravetyan, and W. Nakbanpote, *Synthetic reactive dye wastewater treatment by narrow-leaved cattails (Typha angustifolia Linn.): Effects of dye, salinity and metals*. *Science Of The Total Environment*, 2007. 384(1-3): p. 67-76.
 12. Artes, C.N.d.I.C.y.l. *Museo Campesino y de los antiguos oficios*. 2013 [cited 2013 March].
 13. Hood, W.G., *Applying and testing a predictive vegetation model to management of the invasive cattail, Typha angustifolia L., in an oligohaline tidal marsh reveals priority effects caused by non-stationarity*. *Wetlands Ecology and Management*, 2013. 21(4): p. 229-242.
 14. Miklovic, S., *Typha angustifolia Management: Implications for Glacial March Restoracion*. *Student On-Line Journal*, 2000. 6(2): p. 11.
 15. Shih, J.G. and S.A. Finkelstein, *Range dynamics and invasive tendencies in Typha latifolia and Typha angustifolia in Eastern North America derived from herbarium and pollen records*. *Wetlands*, 2008. 28(1): p. 1-16.
 16. Deago, E.M. and G.E. Pizarro, *Denitrification of drinking water using Saccharum spontaneum L. as a natural organic solid substrate*. *Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua*, 2013. 62(7): p. 477-486.
 17. Ovez, B., S. Ozgen, and M. Yuksel, *Biological denitrification in drinking water using Glycyrrhiza glabra and Arunda donax as the carbon source*. *Process Biochemistry*, 2006. 41(7): p. 1539-1544.
 18. Reddy, K.R. and R.D. DeLaune, *Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications*. First ed. Vol. 1. 2008, Florida: Taylor & Francis Group. 774.
 19. APHA, AWWA, and WEF, *Standar Methods for The Examination of Water And Wastewater*. 21 ed, ed. A.D. Eaton, et al. 2005, Baltimore, Meryland.
 20. Van Soest, P.J., *Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. II. A rapid method for determination of fiber and lignin*. *Journal Association Official Agronomy Chemistry*, 1963. 46: p. 829-835.
 21. Goering, H.K. and P.J. Va Soest, *Forage fiber analysis (aparatus, reagent, procedures, and some applications)*. *Agriculture Handbook No 379*, ed. A.R.S.-U.S.D.o. Agriculture. 1970, Washington, D. C.
 22. Van Soest, P.J., *Environmental and forage quality, in Nutrition Conferences for Feed Manufactures*. 1996: Rochester, Ithaca, NY.
 23. Allende, A. and F. Artes, *UV-C radiation as a novel technique for keeping quality of fresh processed 'Lollo Rosso' lettuce*. *Food Research International*, 2003. 36(7): p. 739-746.
 24. Aguayo, E., et al., *Técnicas emergentes y sostenibles para la desinfección de frutas y hortalizas mínimamente procesadas, in 17° Simpoaium Internacional-Tecnologías y Sanidad de las frutas y hortalizas en postcosecha*. 2007: Valencia, España.
 25. Gibert, O., et al., *Selection of organic substrates as potential reactive materials for use in a denitrification permeable reactive barrier (PRB)*. *Bioresource Technology*, 2008. 99(16): p. 7587-7596.
 26. Ovez, B., *Batch biological denitrification using Arundo donax, Glycyrrhiza glabra, and Gracilaria verrucosa as carbon source*. *Process Biochemistry*, 2006. 41(6): p. 1289-1295.
 27. Angelidaki, I. and W. Sanders, *Assessment of anaerobic biodegradability of macropollutants*. *Reviews Environmental Science and Bio/Technology*, 2004. 3(2): p. 117-129.
 28. Cokgor, E.U., et al., *Respirometric analysis of activated sludge behaviour - I. Assessment of the readily biodegradable substrate*. *Water Research*, 1998. 32(2): p. 461-475.
 29. Chandler, J.A., et al., *Predicting methane fermentation biodegradability, in Biotechnology And Bioengineering*. 1980. p. 93-107.
 30. Asaeda, T., P. Sharma, and L. Rajapakse, *Seasonal patterns of carbohydrate translocation and synthesis of structural carbon components in Typha angustifolia*. *Hydrobiologia*, 2008. 607: p. 87-101.
 31. Sharma, P., et al., *Morphology, growth and carbohydrate storage of the plant Typha angustifolia at different water depths*. *Chemistry And Ecology*, 2008. 24(2): p. 133-145.
 32. Das, S.C. and N. Tanaka, *Estimating nitrogen budgets of Typha angustifolia by considering the regrowth shoot productivity and nitrogen content after harvesting aerial organs in different growing seasons*. *Landscape and Ecological Engineering*, 2007: p. 99-108.
 33. Ratushnyak, A.A., *The investigation of exometabolism of some aquatic macrophytes*. *Global Journal of Environmental Research*, 2008. 2(2): p. 92-95.
 34. Howard, R.L., et al., *Lignocellulose biotechnology: issues of bioconversion and enzyme production*. *African Journal of Biotechnology*, 2003. 2(12): p. 602-619.
 35. Ovez, B., J. Mergaert, and M. Saglam, *Biological denitrification in drinking water treatment using the seaweed Gracilaria verrucosa as carbon source and biofilm carrier*. *Water Environment Research*, 2006. 78(4): p. 430-434.
 36. Shen, Z.Q., et al., *Denitrification performance and microbial diversity in a packed-bed bioreactor using biodegradable polymer as carbon source and biofilm support*. *Journal of Hazardous Materials*, 2013. 250: p. 431-438.
 37. Foglar, L., L. Sipos, and N. Bolf, *Nitrate removal with bacterial cells attached to quartz sand and zeolite from salty wastewaters*. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2007. 23(11): p. 1595-1603.
 38. Vavilin, V.A., et al., *Hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic material: An overview*. *Waste Management*, 2008. 28(6): p. 941-953.
 39. Robinson-Lora, M.A. and R.A. Brennan, *The use of crab-shell chitin for biological denitrification: Batch and column tests*. *Bioresource Technology*, 2009. 100(2): p. 534-541.

- performance of organic carbon for use in denitrification beds. *Ecological Engineering*, 2010. 36(11): p. 1588-1595.
41. Shen, Z.Q. and J.L. Wang, *Biological denitrification using cross-linked starch/PCL blends as solid carbon source and biofilm carrier*. *Bioresource Technology*, 2011. 102(19): p. 8835-8838.
 42. Cuervo-López, F., et al., *Principles of denitrifying processes, in Environmental Technologies to Treat Nitrogen Pollution: Principles and Engineering*, F. Cervantes, Editor. 2009, IWA Publishing: London. p. 420.
 43. Robertson, W.D., et al., *Long-term performance of in situ reactive barriers for nitrate remediation*. *Ground Water*, 2000. 38(5): p. 689-695.
 44. Rutting, T., et al., *Assessment of the importance of dissimilatory nitrate reduction to ammonium for the terrestrial nitrogen cycle*. *Biogeosciences*, 2011. 8(7): p. 1779-1791.
 45. Smith, J.L., *Cycling of nitrogen through microbial activity, in Soil Biology: Effects on Soil Quality*, B.A.S. J. L. Hatfield, Editor. 1994, Lewis: Boca Raton, Florida, U.S.A. p. 91-120.
 46. Vavilin, V.A., S.V. Rytov, and L.Y. Lokshina, *A description of hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic matter*. *Bioresource Technology*, 1996. 56(2-3): p. 229-237.
 47. Moran, M.A. and R.E. Hodson, *Formation and bacterial utilization of dissolved organic carbon derived from detrital lignocellulose*. *Limnology and Oceanography* 1989. 34(6): p. 1034-1047.
 48. Swift, M., W. Heal, and J. Anderson, *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. *Study in Ecology*. Vol. 5. 1979, California, USA.
 49. Moran, M.A., R. Benner, and R.E. Hodson, *Kinetics of Microbial Degradation of Vascular Plant Material in Two Wetland Ecosystems*. *Oecologia*, 1989. 79(2): p. 158-167.
 50. Pranskevicius, M. and A. Lietuvninkas, *Season-related change of the total carbon in Neris regional park soil*. *Environmental Engineering*, Vols 1-3, ed. D. Cygas and K.D. Froehner. 2009, Vilnius-40: Vilnius Gediminas Technical Univ Press, Technika. 284-291.

Medidas de intensidad sísmica independientes de la orientación del sensor: Aplicación a una base de datos con acelerogramas de Costa Rica, El Salvador y Nicaragua

Luis A. Pinzón, M.Sc.

Universidad Tecnológica de Panamá
luis.pinzon3@utp.ac.pa

Diego A. Hidalgo, M.Sc.

Universidad de Costa Rica
diego.hidalgo@ucr.ac.cr

Lluís G. Pujades, Ph.D.

Universidad Politécnica de Cataluña
lluis.pujades@upc.edu

Resumen— En esta investigación se han comparado las medidas de intensidad del movimiento del suelo, para una base de datos con acelerogramas de Costa Rica, Nicaragua y El Salvador. Estas medidas están basadas en una serie de registros de aceleración ortogonales horizontales, rotados para todos los ángulos no redundantes, de tal manera que se proponen medidas que son independientes de la orientación de los sensores.

Estas medidas son: GMRotDpp y GMRotIpp, donde “pp” representa el percentil, comúnmente “50” y las letras D e I, indican dependencia o independencia del periodo de la estructura. Para determinar GMRotDpp, se define para cada oscilador, el ángulo correspondiente del percentil deseado (pp), esto ordenando de manera creciente los valores obtenidos para cada rotación, no pudiendo definir un solo ángulo válido para todos los periodos, por lo cual se dice que es dependiente del periodo. Por su parte GMRotIpp, requiere del cálculo previo de GMRotDpp, y define un único ángulo para el cual la medida se aproxima con el menor error posible al valor dependiente del periodo, siendo esta medida independiente del periodo.

Estas dos medidas fueron comparadas entre sí, encontrando una relación que permite determinar qué medida es la más adecuada para cada caso de estudio. Al mismo tiempo fueron comparadas con la máxima respuesta espectral esperada definida por la media cuadrática y se obtuvieron relaciones que fueron comparadas con otras obtenidas en diferentes investigaciones.

Un resultado relevante de esta investigación ha sido el análisis del efecto de direccionalidad, entendido como la dependencia de la media geométrica de la respuesta espectral de las componentes horizontales con el ángulo de orientación del instrumento de registro, y la obtención de nuevas medidas independientes del ángulo.

Palabras Claves— Acelerogramas, Análisis Espectral, Dinámica, Direccionalidad, Espectro de Respuesta, Sísmica, Sismo, Sismología.

Abstract— This research compares the measures of ground motion intensity, for an accelerograms' database from Costa

Rica, Nicaragua and El Salvador. These measures are based on a series of orthogonal- horizontal acceleration records, rotated for all non-redundant angles, so we proposed measures that are independent of the orientation of the sensors.

These new measures are: *GMRotDpp* and *GMRotIpp*, where "pp" represents the percentile, commonly "50", and D or I represent the dependence or independence of the period. For the calculation of *GMRotDpp*, it is necessary to define the angle of rotation required to obtain the value of the percentile (pp), arranging in an increasing way the values obtained for every rotation, not being able to define a single angle that's valid for the measure, thus establishing the dependence of the period.

On the other hand, *GMRotIpp*, requires the calculation of *GMRotDpp*, and defines a single angle, to which the measure approximates, with the least error possible, to the dependent value of the period, being this measure independent of the period.

These two measures were compared in order to find a relationship between them and to determine what action is most appropriate for each case of study. At the same time, the measures were compared with the maximum expected spectral response (RMS) defined by the quadratic mean, obtaining the relations that were also compared with some results from different authors.

An important result of this research is the analysis of the directionality effect, understood as the dependence of the geometric mean from the horizontal components with orientation angle of the recording device, and obtaining new measurements independent of the angle.

Keywords— *Accelerogram, Directionality, Dynamic, Earthquake, Response Spectrum, Spectral Analysis, Seismic, Seismology.*

Tipo de artículo: Original

Fecha de recepción: 12 de marzo de 2015

Fecha de aceptación: 12 de mayo de 2015

1. Introducción

Gran parte de las ecuaciones para predecir el movimiento del suelo debido a sismos (leyes de atenuación con la distancia), emplean la respuesta espectral correspondiente al movimiento horizontal como parámetro de intensidad [1]. Usualmente, los registros de aceleraciones

horizontales son obtenidos de componentes orientadas ortogonalmente, por lo que hay dos registros disponibles para cada evento.

Hay muchas maneras de combinar la respuesta de las componentes horizontales en las ecuaciones de predicción de movimientos del terreno [2], entre las cuales se puede mencionar: la media aritmética (AM), la media geométrica (GM), la media cuadrática (QM) o el máximo valor de cada componente. En la derivación de algunas ecuaciones de predicción del movimiento del suelo, como las propuestas por Boore et al. [3], estas dos componentes se combinan en una única medida de intensidad del movimiento, para formar la media geométrica del espectro de respuesta para cada componente horizontal [4].

Una ventaja de la GM es que la variabilidad de los resultados obtenidos en las regresiones empleadas para las ecuaciones de predicción del movimiento del suelo, es menor con respecto a otras medidas comúnmente empleadas [1], sin embargo, la GM de la respuesta estructural tiene un inconveniente potencialmente importante: no es invariante a la orientación de los sensores.

Como un caso extremo, consideremos las señales libres de ruido, linealmente polarizado. Si uno de los sensores resulta estar alineado con la dirección de polarización, el espectro de respuesta del movimiento registrado en el sensor ortogonal sería cero, independientemente de la amplitud de la polarización del movimiento del suelo. Ésta es una consideración importante para registros de sismos cercanos al origen, donde la orientación de la ruptura y el patrón de radiación, incluyendo los efectos de directividad, pueden producir fuertes movimientos correlacionados en particular en los períodos de 1 segundo o más [5].

Debido a que obtener el espectro de respuestas no es una operación lineal en una serie de tiempo (el espectro de respuesta de la suma de dos series de tiempo, no es igual a la suma del espectro de respuesta para cada serie de tiempo), la sensibilidad

a la orientación del sensor también es compartida por muchas otras medidas de intensidad de movimiento de suelo.

En este trabajo se utilizan dos medidas de intensidad del movimiento del suelo que son independientes de la orientación de los instrumentos de registro [6]. Estas dos medidas se obtienen al computar la media geométrica del espectro de respuesta para todas las rotaciones no redundantes, de las componentes horizontales de un registro de aceleraciones.

Las medidas determinadas son la GMRotDpp y GMRotIpp, donde “pp” representa el percentil, comúnmente 50 y las letras D e I indican que es dependiente o independiente del período de la estructura. Al utilizar estas medidas, se elimina la orientación del sensor como un componente de la incertidumbre aleatoria, lo cual puede ser importante en cálculos probabilistas de riesgo sísmico de movimientos de suelo con una frecuencia anual de excedencia baja [7].

2. Base de datos

La base de datos disponible, posee registros de Costa Rica, El Salvador y Nicaragua, registrados en el período comprendido entre 1967 y 2012. Entre estos tres países se tiene un total de 1010 sismos, que se traduce en 3191 registros de aceleraciones, todos con dos componentes horizontales y una vertical. De este total, hay 1328 acelerogramas registrados en Costa Rica, 262 sismos registrados en Nicaragua y 1601 en El Salvador. Los registros fueron recopilados por el Ing. Víctor Schmidt en su trabajo final de doctorado [8] y el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica [9].

Vale la pena observar que esta base de datos fue usada por Schmidt [8] y Schmidt et al. [10] para la obtención de leyes predictivas del movimiento del suelo (leyes de atenuación) en Costa Rica; la mayoría de los acelerogramas corresponden a registros en campo abierto (en superficie y/o en

roca) y, aunque algunos fueron registrados en la base (nivel más inferior) de edificios, su contenido frecuencial representa bien el registro en campo libre ya que no está alterado de forma significativa por la respuesta estructural.

De estos registros, se seleccionaron aquellos con una aceleración máxima de cualquiera de sus dos componentes horizontales, superior o igual a 10 gal (10 cm/s²), resultando 1406 registros, cada uno con sus tres componentes ortogonales. Tanto el tratamiento estadístico de la base de datos como la selección de acelerogramas y su tratamiento preliminar, se realizaron mediante programas en MATLAB, desarrollados por los autores de este estudio.

El objetivo de este trabajo es estudiar el efecto de direccionalidad para una extensa base de datos de Centroamérica y comparar los resultados con los obtenidos por otros autores. En estos estudios previos, véase por ejemplo Boore et al. [6], no se consideran aspectos como la cercanía o no a fallas, el tipo de suelo, la duración o el contenido frecuencial, y en consecuencia, aun reconociendo su importancia, no se han considerado tampoco aquí. La influencia de la direccionalidad en la incertidumbre aleatoria de las leyes predictivas parece ser poco significativa [1] aunque probablemente, como indica Boore et al. [6], los efectos de direccionalidad pueden ser más relevantes cuando las dos componentes horizontales están fuertemente correlacionadas como pueden ser movimientos impulsivos cerca de las fallas así como en casos relacionados con fenómenos de directividad y efectos de movimientos perpendiculares o paralelos a la falla.

3. Metodología

La metodología utilizada se basa en la propuesta de Boore et al. [6]. Esta metodología se ha adaptado a las características de los datos disponibles y se ha complementado con una serie de procedimientos orientados a caracterizar la base de datos disponible y al cálculo de los espectros.

3.1 Media Geométrica de Espectros de Respuesta

Debido a la dependencia que posee la media geométrica de la respuesta espectral al ángulo de rotación, Boore et al. [6] definen dos medidas del movimiento del suelo, correspondientes a un cierto percentil del conjunto de medias geométricas obtenidas utilizando todas las rotaciones no redundantes.

Se utilizan combinaciones lineales de las componentes rectangulares entre 0 y 90 grados de rotación, debido a que las combinaciones lineales de la señal, poseen una periodicidad en este intervalo. Este hecho se puede apreciar cuando se calcula el valor de la aceleración pico del terreno (PGA por sus siglas en inglés), el cual toma valores simétricos a partir de los 90 grados. La GM, al ser una combinación de las dos direcciones ortogonales, posee el mismo valor pues no depende del orden de los factores que la componen.

A pesar de que la definición de GMRotDpp satisface el requisito de ser independiente de la orientación del sensor, tiene la deficiencia de que una única rotación no produce dos series de tiempo para las cuales la media geométrica del espectro de respuesta individual sea igual a GMRotDpp para todos los períodos considerados.

Por ese motivo, se calcula una medida que sea independiente de la orientación del sensor y del período, denominada GMRotIpp. Con esta medida se pretende obtener un único espectro de respuesta, que será independiente del ángulo del registro y del período de la estructura. Vale la pena observar que este espectro GMRotIpp es útil tanto para el análisis espectral como para el análisis dinámico de estructuras, ya que permite definir también la serie temporal que lo genera.

3.1.1 GMRotDpp

Para calcular GMRotDpp se generó un programa en MATLAB y se siguieron los pasos descritos por Boore et al. [6], que se resumen a continuación.

a) Todos los cálculos se realizan a partir de los

archivos resultantes del proceso de filtrado, donde para uniformizar el cálculo y post-procesamiento de los espectros de respuesta, se aplica un filtro pasa banda acasual tipo Butterworth de orden 3, con una frecuencia máxima de 20 Hz y para el caso de las frecuencias bajas se utiliza un valor de 0.10Hz. A cada una de las componentes de aceleraciones se les nombró como $acc_f_n(t,n,\theta)$ (N-S) y $acc_f_e(t,n,\theta)$ (E-O), donde t es el tiempo del registro, n es el porcentaje del amortiguamiento crítico del oscilador y θ indica la rotación del ángulo respecto a las condiciones iniciales.

- b) Se estableció el ángulo de rotación θ a 0.0, como ángulo de partida.
- c) Se forma la serie de tiempo para el ángulo de rotación θ , utilizando combinaciones lineales de las series de tiempo definidas en el paso a). Las ecuaciones que definen estas combinaciones lineales son:

$$\begin{bmatrix} acc_f_e(t,\theta) \\ acc_f_n(t,\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} acc_f_e(t,0) \\ acc_f_n(t,0) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde por simplicidad se elimina "n", pues en todos los casos se emplea el mismo factor de amortiguamiento crítico del 5 %.

- d) Se calcularon los espectros de respuestas correspondientes a cada ángulo de rotación. Así, para todos los ángulos de rotación tendremos un espectro de respuesta para ambas componentes horizontales $ER_1(\theta,T)$ y $ER_2(\theta,T)$.
- e) Se calculó la media geométrica de las respuestas espectrales, que al igual que las respuestas calculadas en el paso anterior serán una función del ángulo rotacional y del período para un valor fijo de amortiguamiento:

$$GM(\theta T) = \sqrt{ER_1(\theta T) * ER_2(\theta T)} \quad (2)$$

Donde:

GM: media geométrica

ER: espectros de respuesta

- f) Se ordenan los valores de $GM(\theta, T_i)$ para un valor fijo de T_i , de menor a mayor, conformando una matriz con los valores para cada período considerado.
- g) Finalmente se obtiene la medida $GMRotDpp$, correspondiente a la media geométrica GM según el percentil deseado para cada período, se utilizan los percentiles 0, 50 y 100, que corresponden al mínimo, mediana y máximo.

3.1.2 GMRotIpp

A continuación se detalla el procedimiento que se utilizó para el cálculo de la $GMRotIpp$.

- a) Para este cálculo partimos de la medida $GMRotDpp$. Esta medida se computa para el rango de períodos útil para cada registro, el cual se ha definido de acuerdo a las frecuencias del filtro aplicado por los centros sismológicos a cada archivo.
- b) Para cada período, se normaliza el conjunto de medias geométricas de la ecuación 2 para todos los ángulos de rotación respecto a $GMRotDpp$.

$$\frac{GM(\theta, T_i)}{GMRotDpp(T_i)} \quad (3)$$

- c) A continuación se calcula la función de penalización o de error, definida por la ecuación:

$$penalty(\theta) = \frac{1}{N_{per}} \sum_{i=1}^h [GM(\theta, T_i)/GMRotDpp(T_i) - 1]^2 \quad (4)$$

Donde el rango de períodos se extiende de T_1 a T_h (dependiente de la frecuencia mínima de filtrado suministrada en cada registro). $GM(\theta, T_i)$ es la media geométrica del espectro de respuesta para el período T_i computado para el ángulo de rotación θ , y $GMRotDpp(T_i)$ es el valor del percentil de $GM(\theta, T_i)$ sobre todos los ángulos de rotación posibles, como se definió previamente.

- d) Se encuentra el ángulo de rotación correspondiente al mínimo de la función de

penalización, θ_{min} . La figura 1 muestra el cálculo de la función de penalización para el percentil 50.

- e) Como ya se habían calculado los espectros de respuesta para el rango de rotaciones de interés en el cálculo del $GMRotDpp$, se selecciona el espectro correspondiente al ángulo mínimo de la función de penalización (θ_{min}). Al espectro de respuesta resultante se le llama $GMRotIpp$, definido por:

$$GMRotIpp(T_i) = GM(\theta_{min}, T_i) \quad (5)$$

La selección de θ_{min} busca evitar variaciones extremas lejos del valor del percentil deseado para todos los períodos. En particular, para $GMRotI50$ el procedimiento evita valores muy bajos de medias geométricas asociadas con movimientos fuertemente correlacionados.

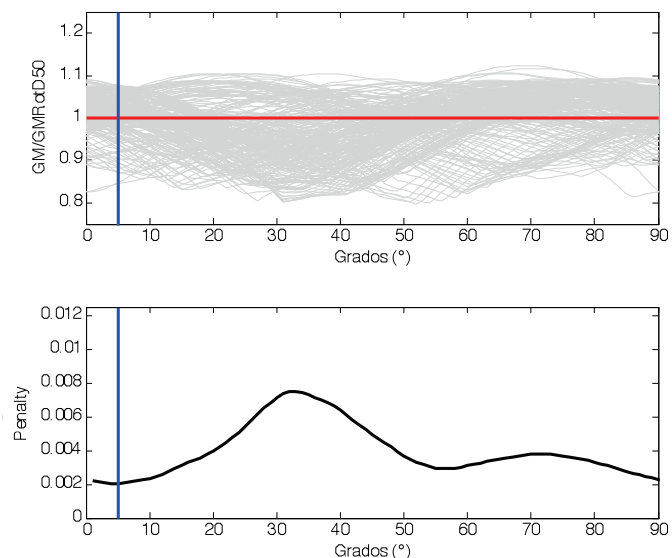


Figura 1. Cálculo de la normalización de $GM/GMRotD50$ necesaria para el cálculo de la función de penalización y debajo la función de penalización para el cálculo del θ_{min} para el percentil 50. La línea azul que atraviesa ambas figuras muestra el ángulo que minimiza la función de penalización.

3.2 Media Cuadrática de Espectros de Respuesta y RotD100

La media cuadrática (QM) representa la

a la orientación del sensor, por lo que no existe la necesidad de rotar la señal para obtener la respuesta máxima [11]. Por lo que su cálculo es muy simplificado si se utiliza la siguiente ecuación:

$$QM(T) = \max \left(\sqrt{(R_{f_n}(t,0))^2 + (R_{f_e}(t,0))^2} \right), T \quad (6)$$

donde es la historia temporal de la respuesta del oscilador de un grado de libertad en la dirección N-S, debido a la aceleración y , sería la correspondiente respuesta para la aceleración \ddot{y} .

Boore [12] define la medida RotD100, la cual resulta equivalente a la media cuadrática [11]. Esta medida representa el valor máximo de aceleración espectral (S_a) para cada oscilador de un grado de libertad, al considerar los espectros rotados para una componente horizontal.

Siguiendo la metodología aplicada para el cálculo de las medidas GMRotDpp y GMRotIpp, una vez que se han calculado todos los espectros con la rotación de la señal, se seleccionan los valores máximos de la aceleración espectral S_a en función del período (T_n), y así se obtiene el espectro correspondiente al percentil 100, que será igual al valor obtenido con la media cuadrática [12].

$$RotD100(T) = \max [ER_1(\theta, T), ER_2(\theta, T)] \theta \quad (7)$$

4. Resultados

Los resultados que se presentan a continuación, reflejan el comportamiento de la base de datos completa, sin hacer distinción entre países o tipos de suelo. Para resultados más detallados se puede consultar el estudio de Pinzón-Ureña [13].

4.1 Promedio de los espectros de respuesta

Una vez seleccionados los registros de aceleración, se realizó el cálculo de los espectros de respuesta en aceleración, descritos en la sección anterior, con lo que se procedió a calcular el promedio de los espectros para cada medida de intensidad.

Para poder calcular los promedios para cada medida de intensidad, fue necesario normalizar los espectros con respecto al PGA, con el fin de eliminar la dependencia con respecto a esta variable. Durante la normalización se utiliza el PGA de la media geométrica sin rotar, para evitar una disminución de la amplitud de los espectros que originaría normalizar con respecto al PGA de cada medida, además de considerar relevante examinar las diferencias que se presentan en comparación entre las nuevas medidas y la GM sin rotar. Al valor obtenido luego de la normalización, se le conoce como el factor espectral dinámico (FED). A continuación se expresa la forma matemática de las normalizaciones aplicadas.

$$GMRotDpp_{nor} = \frac{GMRotDpp}{PGA_{GM \sin rotar}} \quad (8)$$

$$GMRotIpp_{nor} = \frac{GMRotIpp}{PGA_{GM \sin rotar}} \quad (9)$$

$$QM_{nor} = \frac{QM}{PGA_{GM \sin rotar}} \quad (10)$$

$$GM \sin Rotar_{nor} = \frac{GM \sin Rotar}{PGA_{GM \sin rotar}} \quad (11)$$

Para el cálculo de promedios de los espectros normalizados, se realizó un análisis comparativo entre la media aritmética y la media geométrica de los espectros, con el fin de definir qué media utilizar. La media geométrica se define como la raíz enésima (siendo n el número de registros), de la multiplicación de los valores de aceleración de los espectros de respuesta normalizados (S_{a_nor}), o lo que es igual, el antilogaritmo del promedio de los logaritmos naturales de la respuesta espectral normalizada calculada para cada medida de intensidad [14] y la media aritmética se define como la suma de todos los valores de aceleración de los espectros de respuesta normalizados para cada

período, dividido entre el número de registros.

Se tomó el vector del período de 1 segundo de los espectros de respuesta para todos los sismos calculados con la medida GMRotI50, con el fin de comparar la distribución de aceleraciones espectrales normalizadas (Sa_{nor}). Al comparar el histograma de Sa_{nor} , el cual representa la distribución de los valores en escala natural, con el de $\ln(Sa_{nor})$, que representa los valores en escala logarítmica se infiere que la media aritmética posee una distribución sesgada a la izquierda, mientras que con la media geométrica se obtiene una distribución normal con el logaritmo de los valores, que es equivalente a una distribución log-normal).

La distribución obtenida con los valores en escala logarítmica, se ajusta a las teorías empleadas a la hora de ajustar las ecuaciones del movimiento del suelo [15][16], que se considera se ajustan a una distribución de probabilidades log-normal, por lo que se considera la media geométrica un mejor estimador de los valores promedios para el caso de medidas de intensidad sísmica.

4.2 Comparación de la media geométrica si rotar, GMRotDpp, GMRotIpp

Para comparar las medidas, se realizó un cálculo masivo de los 1406 registros seleccionados, utilizando un programa desarrollado en MATLAB. Primero se calculó la respuesta espectral en aceleración de todos los registros para todas las combinaciones lineales consideradas con la variación del ángulo de giro. Posteriormente se calcularon las diferentes medidas independientes de la orientación del sensor, siguiendo la metodología descrita anteriormente.

De los 1406 acelerogramas seleccionados, se calculó la respuesta espectral para cada componente horizontal y sus respectivas rotaciones, esto para osciladores de un grado de libertad con un rango de 133 a 200 períodos por señal, dependiendo del T_h . Una vez calculados los espectros de respuesta

para los 90 grados de rotación considerados para cada componente, se procedió a calcular la media geométrica y la media cuadrática de ambas componentes. Esto conlleva un cálculo computacional de 253080 espectros de respuesta en total.

Una vez calculados todos los espectros de respuesta se determinaron las diferentes medidas de interés (GMRotD50, GMRotD100, GMRotI50, GM Sin Rotar y QM). Se obtuvieron 1406 espectros de respuesta por medida, que representan a cada uno de los acelerogramas seleccionados. Posteriormente se normalizaron los espectros con el PGA de la media geométrica sin rotar, con el fin de obtener un promedio de todos los espectros para cada medida. Tal y como se explicó en la sección anterior los promedios fueron determinados con la media geométrica y cuando se hable de espectros promedio, se debe hacer referencia a este concepto.

En la figura 2a se muestra una comparación de las proporciones (ratio) de la GMRotI50 con respecto a la GMRotD50 y la media geométrica sin rotar. Se observa que la medida dependiente del período (GMRotD50) se asemeja mucho a la independiente (GMRotI50), en cambio, existe una mayor variación entre la GMRotI50 y la media geométrica de la señal sin rotar. Se observa además en esta figura que para casi todo el rango de períodos considerados, la GMRotI50 es, en promedio, mayor que la GMRotD50 y la GM sin rotar, lo cual podría indicar que el proceso de selección de la medida independiente sobrevalora la respuesta en comparación a la medida dependiente, lo cual se aleja de la teoría pues el planteamiento busca que ambas medidas sean lo más parecidas posible.

Para el cálculo de los ratios se utilizó el antilogaritmo del promedio de los logaritmos naturales de la proporción de las medidas que se querían comparar, lo cual representa la media geométrica de los ratios [14]. De la misma forma se calcularon las desviaciones típicas (estándar).

En la figura 2b se muestran los resultados obtenidos

que las mostradas en la figura 2a, pero para una base de datos distinta. Se observa que se obtuvieron resultados similares, ya que en ambos casos la relación $GMRotD50/GMRotI50$ es muy cercana a 1, en cambio la $GM\ Sin\ Rotar/GMRotI50$, se aleja entre un 1 y 2% aproximadamente.

La relación $GMRotI50/GMRotD50$ se comparó con los resultados publicados por Boore et al. [6], pues utilizaron una metodología distinta para el cálculo de los ratios. Los valores mostrados en la figura 3a no reflejan el logaritmo inverso del promedio de los logaritmos, en cambio, sumaron 1.0 a los promedios de los logaritmos naturales de las proporciones, para convertirlos directamente en factores de multiplicación. De esta forma, en la figura 3b, se observa que no existe una gran diferencia para el promedio de las relaciones, siempre y cuando los valores de los del promedio de los logaritmos sean cercanos a cero, como es el caso de los ratios calculados. Por otro lado, para el caso de las desviaciones estándar sí se observa una gran diferencia con respecto a la metodología de Boore et al. [6].

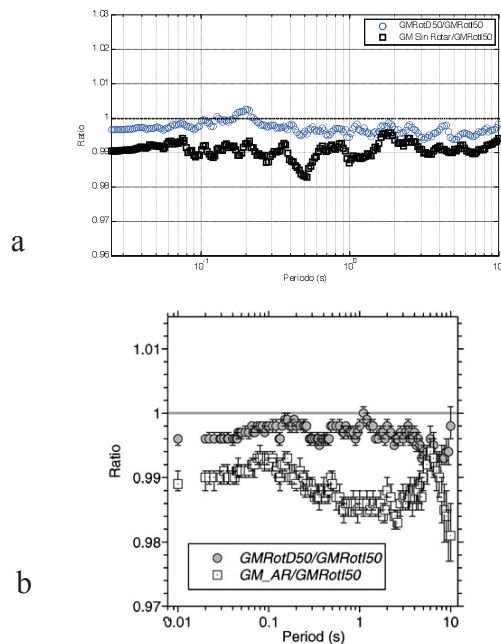


Figura 2. (a) Comparación de los ratios $GMRotD50/GMRotI50$ y (b) $GM\ Sin\ Rotar/GMRotI50$ con respecto a los obtenidos por Boore [12].

En las figuras 2 y 3, se observa que esta relación presenta ratios entre 1.00 y 1.01, lo que muestra que la variación entre ambas es de menos de 1%. De igual forma ocurre con la media geométrica sin rotar, la cual sólo para algunos períodos supera el 2% de diferencia con respecto a la $GMRotI50$.

Siguiendo la misma metodología con la que se obtuvieron las relaciones anteriores, se compararon los valores de $GMRotD100$ con respecto a los de $GMRotD50$, $GMRotI50$ y la GM sin rotar (figura 4). Se encontraron variaciones entre el 5 y 6% para la $GMRotI50$, 6 y 7% para la $GMRotD50$ y entre 7 y 8% para la GM sin rotar.

Los valores mostrados en la tabla 1 fueron calculados para períodos específicos, con el objetivo de condensar la información disponible. Estas relaciones pueden utilizarse para obtener el valor de la $GMRotD100$ a partir de cualquiera de las otras medidas, utilizándolas como factores multiplicativos [1].

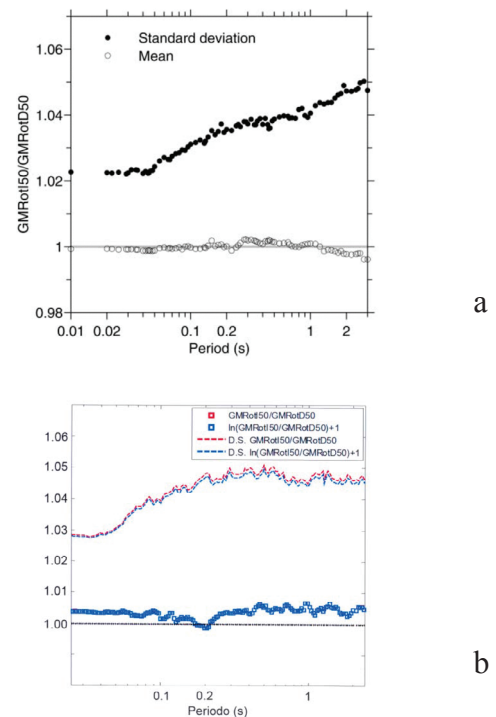


Figura 3. (a) Comparación de los ratios $GMRotI50/GMRotD50$ obtenidos por Boore et al. [6] y (b) $GMRotI50/GMRotD50$ obtenidos en esta investigación.

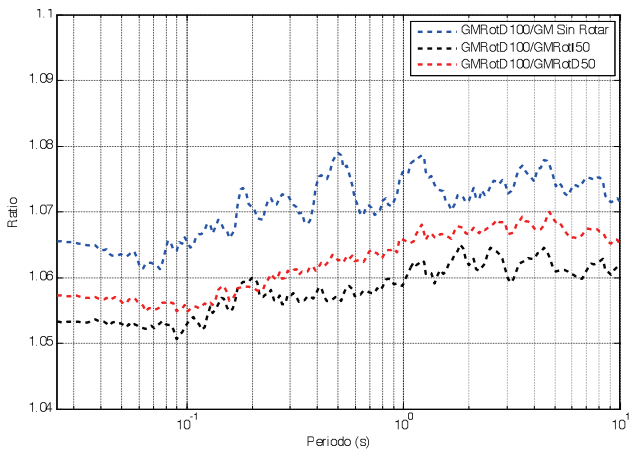


Figura 4. Comparación de los ratios GMRotD100/GM Sin Rotar, GMRotD100/GMRotI50 y GMRotD100/GMRotD50.

Tabla 1. Valores de las relaciones GMRotD100/GM Sin Rotar, GMRotD100/GMRotI50 y GMRotD100/GMRotD50 para diferentes períodos

T(s)	GMRotD100/ GM Sin Rotar	GMRotD100/ GMRotI50	GMRotD100/ GMRotD50
0.025	1.07	1.05	1.06
0.030	1.07	1.05	1.06
0.050	1.06	1.05	1.06
0.075	1.06	1.05	1.06
0.100	1.07	1.05	1.05
0.150	1.07	1.06	1.06
0.200	1.07	1.06	1.06
0.250	1.07	1.06	1.06
0.300	1.07	1.06	1.06
0.400	1.08	1.06	1.06
0.500	1.08	1.06	1.06
0.750	1.07	1.06	1.06
1.000	1.08	1.06	1.07
1.500	1.07	1.06	1.07
2.000	1.07	1.06	1.07
3.000	1.07	1.06	1.07
4.000	1.07	1.06	1.07
5.000	1.07	1.06	1.07
7.500	1.07	1.06	1.07
8.333	1.07	1.06	1.07

4.3 Comparación con la media cuadrática

Una vez comparadas las medidas independientes a la orientación del sensor, se decidió comparar las mismas con la media cuadrática (QM). Esta medida representa la máxima respuesta espectral de un registro de aceleraciones, independiente a

la orientación en que se haya registrado el evento [11].

Al comparar los ratios de la media cuadrática con respecto a la GMRotD50, GMRotI50 y la GM sin rotar, se observa que la relación no es lineal a lo largo del rango de períodos considerado, ver figura 5. Existen variaciones entre un 21 y un 29 % con respecto a la GMRotI50, 21 y 30 % con la GMRotD50 y 22 y 30 % con la media geométrica sin rotar. En la Tabla 2 se muestra el valor de las relaciones para un conjunto de períodos específicos, con estos valores se puede calcular la media cuadrática directamente si se tiene el valor de cualquiera de las medidas relacionadas.

La relación QM/GMRotI50, fue comparada con las obtenidas por Beyer & Bommer [1], Huang & Whittaker [17], Watson-Lamprey & Boore [18], Campbell [19] y NEHRP [20]. Para el caso de la relación de Huang & Whittaker [17], se grafican tanto la relación para sismos cercanos (NF) como la relación para sismos de campo lejano (FF).

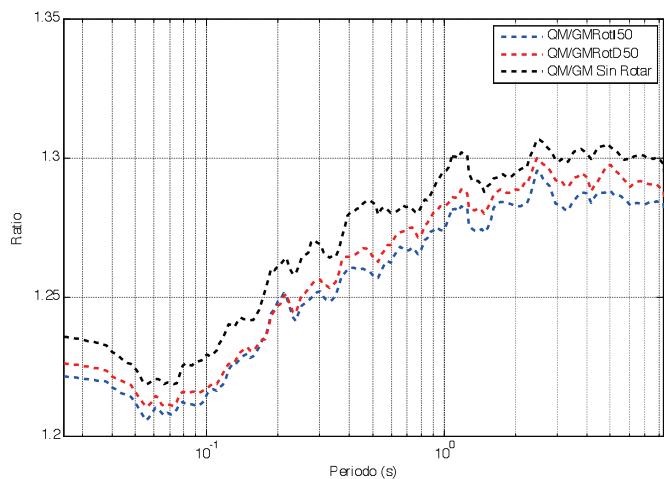


Figura 5. Comparación de los ratios QM/GMRotI50, QM/GMRotD50 y QM/GM Sin Rotar.

Tabla 2. Valores de las relaciones QM/GM Sin Rotar, QM/GMRotI50 y QM/GMRotD50 para diferentes periodos.

T(s)	QM/GMRotI50	QM/GMRotD50	QM/GM Sin Rotar
0.025	1.22	1.23	1.24
0.030	1.22	1.23	1.23
0.050	1.21	1.22	1.22
0.075	1.21	1.21	1.22
0.100	1.22	1.22	1.23
0.150	1.23	1.23	1.24
0.200	1.25	1.25	1.26
0.250	1.25	1.25	1.26
0.300	1.25	1.26	1.27
0.400	1.26	1.26	1.28
0.500	1.26	1.27	1.28
0.750	1.27	1.27	1.28
1.000	1.28	1.28	1.30
1.500	1.28	1.28	1.29
2.000	1.28	1.29	1.29
3.000	1.28	1.29	1.30
4.000	1.29	1.29	1.30
5.000	1.29	1.30	1.30
7.500	1.28	1.29	1.30
8.333	1.28	1.29	1.30

Como se observa en la figura 6, se obtuvieron valores similares a los de las investigaciones mencionadas. Para todos los casos (con la excepción de la expresión propuesta por el NEHRP [20]) la relación inicia constante para periodos bajos, con valores cercanos a 1.20, aumentando de manera lineal para periodos medios, para volverse constante de nuevo en periodos largos con un valor aproximado de 1.30.

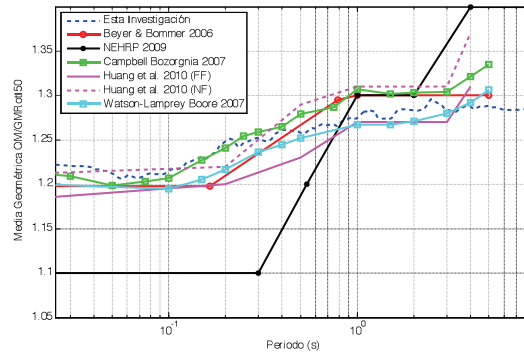


Figura 6. Comparación de la relación QM/GMRotI50 obtenida para esta investigación con respecto a las de otros autores.

4.4 Comparación con espectro de respuesta tipo código

Este apartado muestra el cálculo de los espectros medios para las medidas de intensidad, descritas en las secciones anteriores, esto para cada tipo de suelo y país, para posteriormente compararlos con los espectros de diseño del Código Sísmico de Costa Rica 2010 [21]. En este código, se definen las características tanto dinámicas como mecánicas, empleadas para la clasificación del tipo de suelo, aplicado por Schmidt-Díaz [22], para la base de datos empleada en esta investigación.

En la figura 7, se muestran los resultados obtenidos del cálculo masivo de registros de Costa Rica, con las medidas GMRotD50, GMRotI50, GMRotD100 y la media cuadrática, para un tipo de sitio S1.

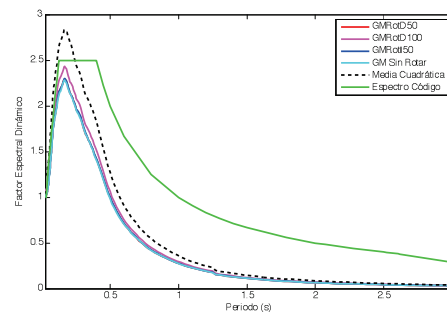


Figura 7. Comparación de los promedios calculados para cada medida de intensidad para todos los registros de Costa Rica.

La línea verde representa el espectro elástico de código (5 % de amortiguamiento). Se observa

que el promedio calculado se ajusta bastante bien al espectro del código y que la media cuadrática supera las otras medidas, siendo ésta la única medida que supera claramente el espectro del código para periodos bajos.

5. Conclusiones

Se presentan aquí las principales conclusiones con especial énfasis en el análisis de direccionalidad.

La ventaja teórica de las medidas de intensidad basadas en la media geométrica de las componentes horizontales, es que eliminan los efectos de la orientación del sensor como contribuyente a la incertidumbre aleatoria de las medidas. Estos resultados son de gran interés en el desarrollo de ecuaciones predictivas del movimiento del suelo como son las leyes de atenuación en estudios de peligrosidad sísmica.

Aunque este tipo de estudios requieren un esfuerzo computacional alto cuando se compara con el uso de la media geométrica correspondiente a las componentes horizontales sin rotar, actualmente se dispone de programas y equipos informáticos que permiten abordar el problema de forma eficiente.

La GMRotI50, es en general, mayor que la GMRotD50 y que la GM sin rotar.

Un aspecto a mejorar de la metodología de cálculo de GMRotIpp, es que se requiere la selección de un rango de períodos para su computación y los resultados de la función de penalización pueden cambiar de acuerdo a la cantidad de períodos y la forma en que estos se distribuyen dentro del rango seleccionado. En este sentido sería conveniente definir funciones de penalización y, en consecuencia GMRotIpp por rangos de períodos.

Se han obtenido resultados similares a los obtenidos por Boore et al. [6] y Boore [12]; las relaciones entre GMRotD50 y GMRotI50, que en general son muy cercanas a la unidad, mientras que el valor de la GM Sin Rotar tiene una variación cercana al 1 % respecto al GMRotD50 y GMRotI50.

A pesar de que existe una diferencia pequeña

entre la GMRotD50, GMRotI50 y la GM sin rotar, es recomendable utilizar las medidas independientes de la orientación ya que disminuyen la incertidumbre epistémica en las leyes de predicción de movimiento del suelo [1]. Este tipo de análisis requiere recalculer los factores de regresión de las leyes de atenuación usando la misma base de datos, por lo que queda fuera de alcance de este estudio.

Comparando los valores obtenidos con la media cuadrática (QM) con los correspondientes a la media geométrica sin rotar y teniendo en cuenta que éste último es el valor empleado en las leyes de atenuación actuales, se estima que se puede llegar a subestimar la demanda entre un 20 y un 30 %.

Al comparar la medida GMRotD100 con respecto a las GMRotD50, GMRotI50 y la GM sin rotar se han hallado variaciones en la demanda entre el 5 y 6 % con respecto a la GMRotI50, 6 y 7 % con respecto a la GMRotD50 y entre 7 y 8 % con respecto a la GM sin rotar. Lo que demuestra que la demanda se puede llegar a subestimar entre un 7 y 8 % en las leyes de atenuación actuales.

Fue posible determinar factores multiplicativos, que pueden ser utilizados para esta base de datos específica, con el fin de transformar, de manera aproximada, las aceleraciones espectrales de una medida a otra, sin necesidad de realizar todos los cálculos masivos nuevamente y, en consecuencia, sin necesidad de recalculer las leyes de atenuación.

El cálculo de los máximos de la media cuadrática de la respuesta (QM), puede considerarse como la máxima respuesta posible, correspondiendo al caso más desfavorable. En consecuencia, estos valores, se pueden utilizar para el diseño o evaluación del riesgo de estructuras de especial importancia como por ejemplo edificios de patrimonio histórico-cultural u otras construcciones de alto riesgo, ya que se puede calcular el valor máximo para la base de datos disponible y esta envolvente se puede considerar que corresponde a un sismo de gran

período de retorno, al representar el percentil 100 de todos los espectros posibles para la base de datos disponible. Esta aplicación debe ser comparada con los estudios de peligrosidad sísmica, para verificar si existen valores espectrales mayores a los determinados con el procedimiento propuesto y ser conscientes de que, en este caso, nos situamos del lado conservador.

Al realizar el análisis comparativo de los resultados con los espectros de diseño, se obtuvo un acuerdo razonable con los espectros de diseño situándose estos del lado conservador. Otro punto a recalcar es que, la única medida que supera los espectros de código es la media cuadrática (QM), y esto ocurre en el rango de períodos bajos. Sin embargo los valores del espectro de diseño muestran un buen acuerdo con la GM sin rotar. Este tipo de media corresponde a la mayoría de los estudios realizados hasta la fecha.

6. Agradecimientos

Para el desarrollo de este trabajo, fue fundamental el aporte de datos realizado por las siguientes instituciones:

- El Salvador: SNET (Douglas Hernández), UCA (Reynaldo Zelaya)
- Nicaragua: INETER (Emilio Talavera)
- Costa Rica: LIS (Aarón Moya y Victor Schmidt), ICE (Álvaro Climent)

De igual forma quisiéramos agradecer al Comité Editorial de la Revista I+D Tecnológico y al grupo de Evaluadores por su atención y comentarios.

Referencias Bibliográficas

- [1] Beyer K., Bommer J.J. (2006) Relationships between Median Values and between Aleatory Variabilities for Different Definitions of the Horizontal Component of Motion. *Bull Seism. Soc. Am.* 96(4A):1512–1522. doi: 10.1785/0120050210.
- [2] Douglas J (2003) Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates. *Earth-Science. Rev.* 61(1-2):43–104. doi: 10.1016/S0012-8252(02)00112-5.
- [3] Boore D.M., Stewart J, Seyhan E, Atkinson GM (2013) NGA-West2 Equations for Predicting Response Spectral Accelerations for Shallow Crustal Earthquakes. 106.
- [4] Abrahamson N.A., Shedlock K.M. (1997) Overview *Seism. Res. Lett.* 68(1):9–23. doi: 10.1785/gssrl.68.1.9.
- [5] Spudich B.P., Chiou B.S.J., Graves R., et al. (2004) A Formulation of Directivity for Earthquake Sources Using Isochrone Theory. *U.S. Geol. Surv. Open-File Rept.* 2004-1268, 54pp.
- [6] Boore D.M., Watson-Lamprey J., Abrahamson N.A. (2006) Orientation-independent measures of ground motion. *Bull. Seism. Soc. Am.* 96(4A):1502–1511. doi: 10.1785/0120050209.
- [7] Bommer J.J., Abrahamson N.A., Strasser F.O., et al. (2004) The Challenge of Defining Upper Bounds on Earthquake Ground Motions. *Seism. Res. Lett.* 75(1):82–95. doi: 10.1785/gssrl.75.1.82.
- [8] Schmidt Diaz, V. (2010). Avances para estudios del riesgo sísmico a escala regional y local: aplicación a América Central y a la Bahía de Cádiz (Sur de España). *Universitat Politècnica de Catalunya*. Retrieved from <http://www.tdx.cat/handle/10803/6273>
- [9] Laboratorio de Ingeniería Sísmica U de CR (2014) Descarga de Registros. <http://www.lis.ucr.ac.cr>.
- [10] V. Schmidt, A. Dahle, and H. Bungum. Costa Rican spectral strong motion attenuation. Technical report, NORSAR, Kjeller, Norway, Nov. 1997. Reduction of Natural Disasters in Central America Earthquake Preparedness and Hazard Mitigation Phase II: 1996 2000, Part 2.
- [11] Rupakhety R., Sigbjörnsson R. (2013) Rotation-invariant measures of earthquake response spectra. *Bull. Earthq. Eng.* 11(6):1885–1893. doi: 10.1007/s10518-013-9472-1.
- [12] Boore D.M. (2010) Orientation-Independent, Nongeometric-Mean Measures of Seismic Intensity from Two Horizontal Components of Motion. *Bull. Seism. Soc. Am.* 100(4):1830–1835. doi: 10.1785/0120090400.
- [13] Pinzón-Ureña, L.A. (2014). Evaluación de medidas de intensidad del movimiento del suelo independientes de la orientación del sensor para una base de datos con acelerogramas de Costa Rica, El Salvador y Nicaragua. *Universitat Politècnica de Catalunya*. Retrieved from <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/24352>.
- [14] Shahi S.K., Baker J.W. (2013) NGA-West2 Models for Ground-Motion Directionality, *Tech. Rept. No. 2013/10*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California, 46pp.
- [15] Joyner W., Boore D.M. (1981) Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bull Seism. Soc. Am.* 71(6):2011–2038.
- [16] Abrahamson N.A., Youngs R. (1992) A Stable Algorithm for Regression Analyses using the Random Effects Model. *Bull. Seism. Soc. Am.* 82(1):505–510.
- [17] Huang Y-N., Whittaker A.S., Luco N. (2011) Establishing Maximum Spectral Demand for Performance-Based Earthquake Engineering: Collaborative Research with the University at Buffalo and the USGS, USGS Tech. Rept. Award Number 08HQGR0017, U.S. Geol. Surv, Reston, VA.

- [18] Watson-Lamprey J., Boore D.M. (2007) Beyond SaGMRotI: Conversion to SaArb, SaSN, and SaMaxRot. Bull. Seism. Soc. Am. 97(5):1511–1524. doi: 10.1785/0120070007.
- [19] Campbell K.W., Bozorgnia Y. (2007) Campbell-Bozorgnia NGA Ground Motion Relations for the Geometric Mean Horizontal Component of Peak and Spectral Ground Motion Parameters, Tech. Rept. No. 2007/02, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California.
- [20] Building Seismic Safety Council. (2009). NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures. FEMA P-750, 388. Retrieved from http://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1730-25045-1580/femap_750.pdf.
- [21] CFIA (2011) Código Sísmico de Costa Rica 2010, Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago, Cartago, 378pp.
- [22] Schmidt-Díaz V (2011) Clasificación de suelos basada en el cálculo de razones espectrales en sitios donde se ubican estaciones acelerográficas de América Central. Casos de El Salvador, Nicaragua y Costa Rica. Rev Geológica América Cent 44(1):9–26.