



e-ISSN 2215-2563

REVISTA GEOGRÁFICA DE AMÉRICA CENTRAL

61E (4) Especial

ESCUELA DE CIENCIAS GEOGRÁFICAS
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR



CONTENIDO

CONTENTS

	Pág.
Presentación	
Presentation	
<i>Jorge Herrera-Murillo</i>	7-9
Influencia de los patrones de uso de la tierra en la calidad de las aguas superficiales de la subcuenca del río Virilla, Costa Rica	
Influence of Land Use Patterns in the Quality of Surface Waters of the Virilla River Sub-Basin, Costa Rica	
<i>Jorge Herrera-Murillo</i>	
<i>Deivis Anchía-Leitón</i>	
<i>José Félix Rojas-Marín</i>	
<i>Diana Mora-Campos</i>	
<i>Alejandra Gamboa-Jiménez</i>	
<i>María Chaves Villalobos</i>	11-35
Fragmentación y conectividad de la cobertura natural a nivel cantonal en Costa Rica durante los años 2000 y 2015	
Fragmentation and Connectivity of Natural Coverage at the Cantonal Level in Costa Rica During 2000 and 2015	
<i>Carlos Morera-Beita</i>	
<i>Luis Fernando Sandoval-Murillo</i>	37-61
Recurrencia de sismos en el Valle Central de Costa Rica	
Recurrence of Earthquakes in the Central Valley of Costa Rica	
<i>Ronnie Quintero-Quintero</i>	
<i>Hernán Porrás-Espinoza</i>	63-80
Zonificación del conflicto de uso de la tierra en las áreas de protección de la red de drenajes de la cuenca del río Páez, Cartago, Costa Rica.	
Zoning of Land Use Conflicts in the Protected Areas of the Drainage Network of the Páez River Basin, Cartago, Costa Rica	
<i>Kevin Alfaro-Jiménez</i>	81-99

Determinación de los niveles de arsénico presentes en sistemas de abastecimiento de agua de las regiones Chorotega y Huetar Norte de Costa Rica, América Central Determination of Levels of Arsenic in Water Supply Systems in the Chorotega and Huetar Norte Regions of Costa Rica, Central America <i>Jorge Herrera-Murillo</i> <i>Diana Mora-Campos</i> <i>Andrea Suarez-Serrano</i> <i>María Chaves-Villalobos</i> <i>Pablo Salas-Jiménez</i> <i>Alejandra Gamboa-Jiménez</i> <i>Deivis Anchía-Leitón</i>	101-121
Sismo de Capellades 01 diciembre 2016, Cartago, Costa Rica December 1, 2016 Capellades Earthquake, Cartago, Costa Rica <i>Ronnie Quintero-Quintero</i> <i>Hernán Porras-Espinoza</i>	123-143
Alternativas en gestión local del riesgo en cantones sin plan regulador: caso de Alajuelita. Alternatives in Local Risk Management in Cantons Without a Regulatory Plan: The Case of Alajuelita <i>Luis Nelson Arroyo-González</i>	145-154
Transformaciones geomorfológicas radicales del cráter del Volcán Poás: erupciones de abril 2017. Radical Geomorphological Transformations of the Poas Volcano Crater: Eruptions in April 2017 <i>Eliécer Duarte-González</i>	155-174

Creación de mapas acústicos en los cantones de Heredia, Alajuela y Belén, como indicadores de la contaminación sónica.

Creation of Acoustic Maps in the Cantons of Heredia, Alajuela, and Belén, Costa Rica, As Indicators of Noise Pollution

Ligia Bermúdez-Hidalgo

José Castro-Solis

Karla Vetrani-Chavarría

Igor Zúñiga-Garita

Manfred Murrell-Blanco

Douglas Barraza-Ruiz

Manuel Méndez-Flores 175-195

Normas de publicación 197-208



PRESENTACIÓN

A lo largo de sus casi cuarenta y cinco años de existencia, la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar de la Universidad Nacional ha logrado consolidar una capacidad importante en materia de gestión de programas, proyectos y actividades académicas, los cuales no solo han propiciado la generación de nuevo conocimiento, sino también la formación de recurso humano con competencias de investigación y extensión en las áreas de gestión del riesgo y variabilidad climática, sistemas sostenibles de producción, manejo y conservación de los recursos naturales y el territorio, así como en gestión y salud ambiental.

Como parte de su accionar, la Facultad promueve un diálogo constante entre las diversas disciplinas y enfoques metodológicos que comprenden las ciencias de la tierra y el mar, con el fin de garantizar un abordaje integral de los objetos de estudio. Adicionalmente, se reconoce la importancia de propiciar espacios de intercambio de experiencias y diálogo de saberes, en procura de alcanzar abordajes multi e interdisciplinarios que permitan generar un mayor impacto en los procesos de construcción de las soluciones de los principales problemas y desafíos que enfrentan el país y la región centroamericana. En este sentido, dentro del programa anual de actividades para el año 2017, se celebró la primera edición del Congreso Centroamericano de Ciencias de la Tierra, el cual tenía como propósito difundir y divulgar a los diversos actores sociales, los resultados obtenidos en los programas, proyectos y actividades académicas ejecutadas en las Escuelas e Institutos de Investigación que la integran.

La presente edición contiene una muestra de algunas ponencias en extenso, presentadas durante el evento. En el primer artículo, se analiza la influencia de los patrones de uso de la tierra en la calidad de las aguas

superficiales de la subcuenca del río Virilla, donde se utilizan herramientas de estadística multivariada para determinar la existencia de seis categorías diferentes de microcuencas en relación con la composición químicas de las aguas de los ríos.

El segundo artículo, plantea la formulación de un índice de fragmentación/conectividad que valora la condición de las coberturas naturales a nivel de cantón para Costa Rica, basado en la distribución espacial, considerando las variables: superficie del cantón, la superficie de cobertura natural, el número de fragmentos y distancia de vecindad entre los fragmentos de la cobertura natural, para los años 2000 y 2015.

Como parte del tercer artículo, se realiza un análisis de la posible influencia de los eventos que ocurren en la Península de Osa sobre la ocurrencia de ciclos de sismos en el Valle Central de Costa Rica, como un proceso normal de reajuste de una zona de cizalla.

En el artículo cuarto, se presenta una caracterización biofísica de la subcuenca del río Páez, ubicado en la provincia de Cartago, encontrando que las características físicas de los suelos en los que se encuentra la subcuenca; en combinación con las elevadas pendientes favorecen la generación de deslizamientos, así como una acelerada erosión del suelo incidiendo en el deterioro de los recursos disponibles.

El quinto artículo, introduce los resultados de un diagnóstico preliminar de los niveles de Arsénico (As) registrados en sistemas de abastecimiento de agua de las Regiones Huetar Norte y Chorotega de Costa Rica. Al analizar los parámetros de correlaciones significativas registradas entre el As y las otras especies analizadas se obtiene información valiosa, relacionada con los procesos hidrogeoquímicos que determinan la presencia de este metaloide.

Como parte del sexto artículo, se estudia la actividad sísmica asociada al sismo de Capellades de Alvarado en Cartago, ocurrido el 1 de diciembre del 2016, donde la relocalización de las réplicas mostró una tendencia epicentral con dirección NO-SE.

En el séptimo artículo, se presentan resultados que evidencian como la situación de deterioro ambiental y la ausencia de un Plan Regulador en el cantón de Alajuelita han motivado el establecimiento de alternativas de Gestión del Riesgo para los pobladores de algunos vecindarios mediante la formación de Comités de Emergencias vecinales; en donde la participación

ciudadana ha establecido una diferencia sustancial en la identificación; vigilancia y atención de sitios de riesgo; con mejoras evidentes en la organización comunal y el autocuidado.

Por último, el octavo artículo, realiza una visión comparativa de las condiciones geomorfológicas antes de este periodo eruptivo del Volcán Poás con las actuales. Distintas secuencias de fotografías; de distintos ángulos y con referencias de posición; dimensión y orientación servirán para interpretar la magnitud de los cambios generados por la actividad reciente y sus implicaciones para el futuro eruptivo de este volcán.

Por último el noveno artículo corresponde a la conformación de mapas acústicos basados en la toma de datos de ruido en los cascos urbanos de los cantones de Heredia, Alajuela y Belén en Costa Rica. Para esto se realizó un muestreo, utilizando sitios de denuncia por contaminación sónica en Alajuela y Belén, mientras que en Heredia se utilizaron los vértices de cada uno de los cuadrantes que conforman el distrito Central como sitio de muestreo. El resultado más importante obtenido en este estudio, está referido a la identificación en su mayoría de sitios con niveles de ruido que sobrepasan los límites permisibles establecidos en el Reglamento de control de ruido que se pueden observar gráficamente en los mapas acústicos. Esto lleva a la conclusión de que los mapas acústicos representan una herramienta fundamental para el control de ruido y planificación de estrategias de mitigación y confinamiento de áreas de impacto por contaminación sónica.

Jorge Herrera-Murillo

Vicedecano

Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar

Universidad Nacional, Costa Rica



Influencia de los patrones de uso de la tierra en la calidad de las aguas superficiales de la subcuenca del río Virilla, Costa Rica

Influence of Land Use Patterns in the Quality of Surface Waters of the Virilla River Sub-Basin, Costa Rica

Jorge Herrera-Murillo¹
Deivis Anchía-Leitón²
José Félix Rojas-Marín³
Diana Mora-Campos⁴
Alejandra Gamboa-Jiménez⁵
María Chaves Villalobos⁶
Universidad Nacional, Costa Rica

Resumen

Se analizó la relación existente entre los patrones de uso de la tierra y la calidad química de los cuerpos de agua superficial que conforman la subcuenca del Río Virilla, Costa Rica. Para ello, se seleccionaron un total de 64 sitios de monitoreo, distribuidos en las 15 microcuencas que la integran, donde se realizaron un total de 04 muestreos, en el período comprendido entre noviembre 2014 a

- 1 Coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica, jorge.herrera.murillo@una.cr
- 2 Investigador del Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica, deivis.anchia.leiton@una.cr
- 3 Investigador del Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica, jose.rojas.marin@una.cr
- 4 Directora de Calidad del Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica diana.mora.campos@una.cr
- 5 Directora de Análisis Físicoquímicos del Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica, alejandra.gamboa@una.cr
- 6 Investigadora del Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica, maria.chaves.villalobos@una.cr

Este artículo corresponde a la ponencia presentada en el I Congreso Centroamericano de Ciencias de la Tierra y el Mar, realizado en San José, Costa Rica, del 13 al 16 de noviembre de 2017.

diciembre 2015. A las muestras recolectadas se les analizaron los siguientes parámetros: Potencial de Hidrogeno (pH), conductividad, turbiedad, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos sedimentables, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), amonio (NH_4^+), nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-), nitrógeno total, cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), sodio, calcio, potasio, magnesio, aluminio, hierro, manganeso, cobre, cromo, níquel, zinc, plomo, fósforo total, oxígeno disuelto y temperatura. El análisis de clúster basado en los resultados de los análisis químicos en las muestras de agua superficial, evidenció que las 15 microcuencas se pueden agrupar en seis clústers, donde los grupos I-IV mostraron una mayor contribución de contaminantes derivados de la descarga de aguas residuales provenientes de las áreas urbanizadas. El estudio de correlación de Spearman reveló, que con el incremento de la urbanización, la carga contaminante de DQO, DBO, SST, NH_4^+ y NO_2^- en los ríos aumentó en comparación con aquellos en donde predomina el uso agrícola de la tierra y los bosques.

Palabras clave: contaminación del agua, cuenca hidrográfica, nutrientes, análisis clúster

Abstract

We analyzed the relation between land use patterns and chemical quality of surface water bodies that make up the sub-basin of the Virilla River, Costa Rica. For this purpose, a total of 64 monitoring sites were selected, distributed in the 15 micro-basins that make up the sub-basin, where a total of four samples were drawn between November 2014 and December 2015. The following parameters were analyzed for the samples collected: Hydrogen potential (pH), conductivity, turbidity, total suspended solids (TSS), sedimentary solids, Biochemical Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), ammonium (NH_4^+), nitrite (NO_2^-), nitrate (NO_3^-), total nitrogen, chloride (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}), sodium, calcium, potassium, magnesium, aluminum, iron, manganese, copper, chromium, nickel, zinc, lead, total phosphorus, dissolved oxygen and temperature. Cluster analysis, based on the results of chemical analyses of surface water samples, showed that the 15 micro watersheds could be grouped into six clusters, where groups I-IV showed a greater contribution of pollutants derived from the discharge of wastewater from urbanized areas. The Spearman correlation study revealed that, with increasing urbanization, the pollutant load of COD, BOD, TSS, NH_4^+ , and NO_2^- in rivers increased, compared to those where agricultural land and forest use predominate.

Keywords: water pollution, basin, nutrients, cluster analysis.

Introducción

Las condiciones hidrológicas de una cuenca dependen de la interrelación entre factores geológicos, geomorfológicos, así como de los patrones de uso de la tierra predominantes. De esta forma, la calidad de los cuerpos de agua que integran la cuenca se ven afectados por factores, tanto de origen natural como antropogénico (Songyan et al., 2016). Para entender la compleja relación entre los patrones de uso del suelo y la calidad del agua se deben integrar dos dimensiones de análisis, primero, los efectos de las categorías de uso del suelo en las variables de calidad del agua, y posteriormente, las escalas espaciales en las que existen los vínculos más

fuertes (Uriarte et al., 2011). En este análisis se debe tomar en cuenta la variación espacial de las actividades antropogénicas que son responsables de la generación y transporte de contaminantes terrestres, tanto a partir de fuentes puntuales de descarga que son fáciles de evaluar como por la contaminación difusa, que implica la escorrentía de contaminantes a los cuerpos de agua superficial. Las actividades desarrolladas por el hombre alteran los procesos ya existentes, de manera que, incorporan nuevas fuentes de contaminación a los cuerpos de agua superficial, lo que provoca que el carbono, los nutrientes y otros contaminantes, como el cloruro y el calcio registren un comportamiento más dinámico (Kaushal y Belt, 2012).

Los cambios en los patrones de uso de la tierra, incluyendo la deforestación, la fragmentación de hábitats continuos, la canalización y cambios en el cauce de los ríos han dado como resultado la erosión del suelo, la pérdida de biodiversidad acuática, la disminución de caudales y la degradación de la calidad del agua (Walling y Fang 2003, Tong et al. (2009), Miserendino et al. (2011)). Adicionalmente, el crecimiento de las áreas urbanas y con ello las presiones asociadas al desarrollo y la falta de planificación del uso del suelo, contribuyen continuamente a la degradación de los recursos hídricos (Saroj et al., 2013), lo que se traduce en trastornos ambientales que modifican los ecosistemas acuáticos, manifestándose sobre la productividad de sistemas naturales donde se da interacción humana (Carbone et al., 2013).

El desarrollo urbano causa modificaciones significativas en el tiempo y el volumen de las escorrentías (Wear et al., 1998). Cuando una cuenca hidrográfica se encuentra cubierta, en un alto porcentaje, por infraestructuras como edificaciones, concretos y pavimentos se produce una mayor escorrentía superficial (Quesada, 2012), lo que propicia el aporte en menor tiempo y mayor cantidad de contaminantes producidos. Por su parte, las áreas agrícolas y ganaderas que ocupan gran parte del paisaje en las cuencas, son fuentes importantes de contaminación y en general representan efectos que incluyen aumento en la carga de sedimentos, las concentraciones de sales, metales (sodio, potasio, calcio, magnesio, manganeso, hierro, etc), productos agroquímicos y agentes patógenos, así como cambios en el régimen térmico (Cisneros, 2005). Esta capacidad se ve acelerada debido a las precipitaciones que transportan el suelo erosionado con restos de plaguicidas, principalmente en zonas de fuerte pendiente.

En Costa Rica se han generado diversos instrumentos de gobernanza que no garantizan una verdadera sustentabilidad del recurso hídrico, ya que adolecen de la incorporación de la dimensión del ordenamiento territorial donde se establezca claramente las regiones de producción y de recarga hídrica, y que permita, a partir de estas premisas, planificar el desarrollo agropecuario, industrial, inmobiliario y turístico. Estas carencias en materia de planificación aunadas a la falta de un enfoque integrado de gestión de cuencas, causan efectos ambientales que repercuten en la potencialidad hídrica del país.

Los cambios en las características de calidad del agua dentro de las cuencas, han generado preocupación e interés por llevar a cabo estudios que permitan conocer cuáles son los factores que motivan dichos cambios y que tan significativo es el aporte de cada uno de ellos (Sangani et al., 2015). El presente estudio analizó la influencia de los diferentes tipos de uso del suelo asociados con la actividad antrópica, sobre las características químicas de los cuerpos de agua superficial y por ende, su calidad en las 15 microcuencas que integran la subcuenca del Río Virilla (Tabla 1). Este se llevó a cabo con el fin de generar un insumo que permita orientar el proceso de toma de decisiones públicas en materia de gestión integrada de cuencas hidrográficas en el país.

Tabla 1. Porcentajes de área por tipo de uso de la tierra para cada microcuenca. 2015

Microcuenca	Porcentaje de área por tipo de uso de la tierra							
	Código	Agrícola	Urbana	Bosque	Charral y Tacotal	Pastos	Terreno descubierto	Sin identificar
Río Bermúdez	BE	33	43	14	3	7	0	0
Río Segundo	RS	31	19	30	2	16	0	2
Río Tibás	TIB	34	7	21	4	33	0	1
Río Ciruelas	CI	23	23	21	2	24	0	7
Río Uruca	UR	12	5	59	4	18	1	0
Río Pará	PAR	1	4	31	2	60	0	2
Río Macho	MA	0	4	14	3	72	0	7

Microcuenca	Porcentaje de área por tipo de uso de la tierra							
	Código	Agrícola	Urbana	Bosque	Charral y Tacotal	Pastos	Terreno descubierto	Sin identificar
Quebrada San Francisco	SF	16	71	12	1	0	0	0
Río Ipi98*/	IP	2	87	4	2	5	0	0
Río Durazno	DU	0	3	36	4	54	0	2
Río Virilla	VI	15	26	28	5	18	0	9
Río Jaris	JA	1	0	79	0	20	0	0
Río Picagres	PI	11	4	52	5	23	3	2
Río Pacacua	PA	9	6	50	4	30	0	0
Río Torres	TO	12	38	31	6	12	0	1

Fuente: Elaboración Propia

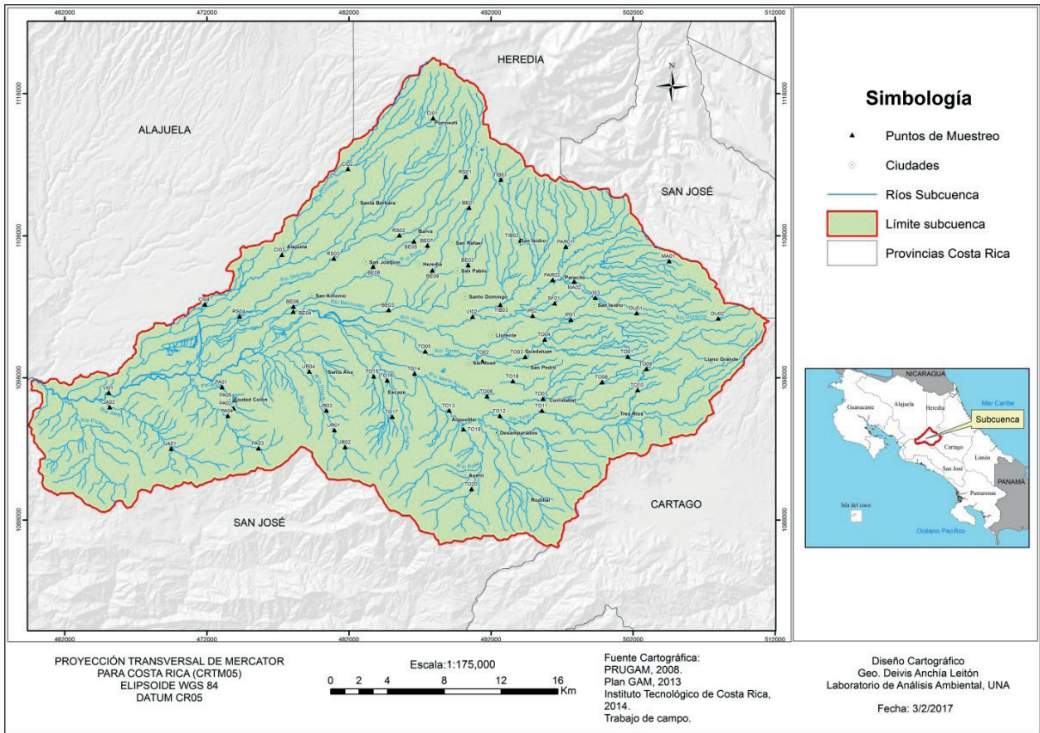
Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

La sub-cuenca del Río Virilla es un contribuyente importante de la cuenca del río Grande de Tárcoles en la vertiente del Pacífico. Cuenta con una extensión territorial de 917.6 km², aproximadamente, y se encuentra sobre todo al norte de la provincia de San José (520.4 km²) y sur de la provincia de Heredia (235.1 km²), con pequeñas áreas en las provincias de Cartago (72.1 km²) y Alajuela (89.1 km²). En esta subcuenca habitan 2 063 935 habitantes, aproximadamente, lo que representa el 48 % de la población del país (INEC, 2017).

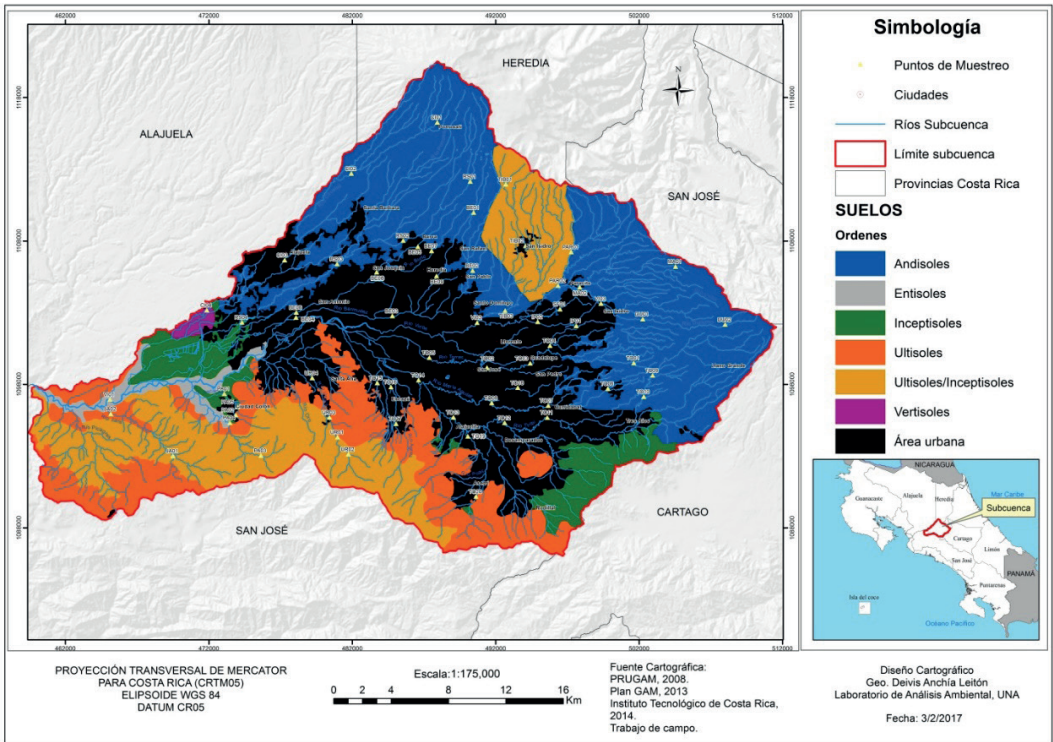
El río Virilla se origina al norte del Gran Área Metropolitana de Costa Rica (GAM), en las cercanías de la Cordillera Volcánica Central. El mismo nace a 2 380 msnm y su parte más baja se encuentra a 280 msnm. Es la zona más desarrollada del país, lo que significa que tiene una gran cantidad de industria y un alto porcentaje de uso urbano. Además, este río provee numerosos servicios ecosistémicos, incluyendo una fuente de agua para uso doméstico, industrial y agrícola, desempeñando así, un papel importante para el desarrollo de la economía y la sociedad (Figura 1).

Figura 1. Ubicación geográfica de la subcuenca del río Virilla, Costa Rica



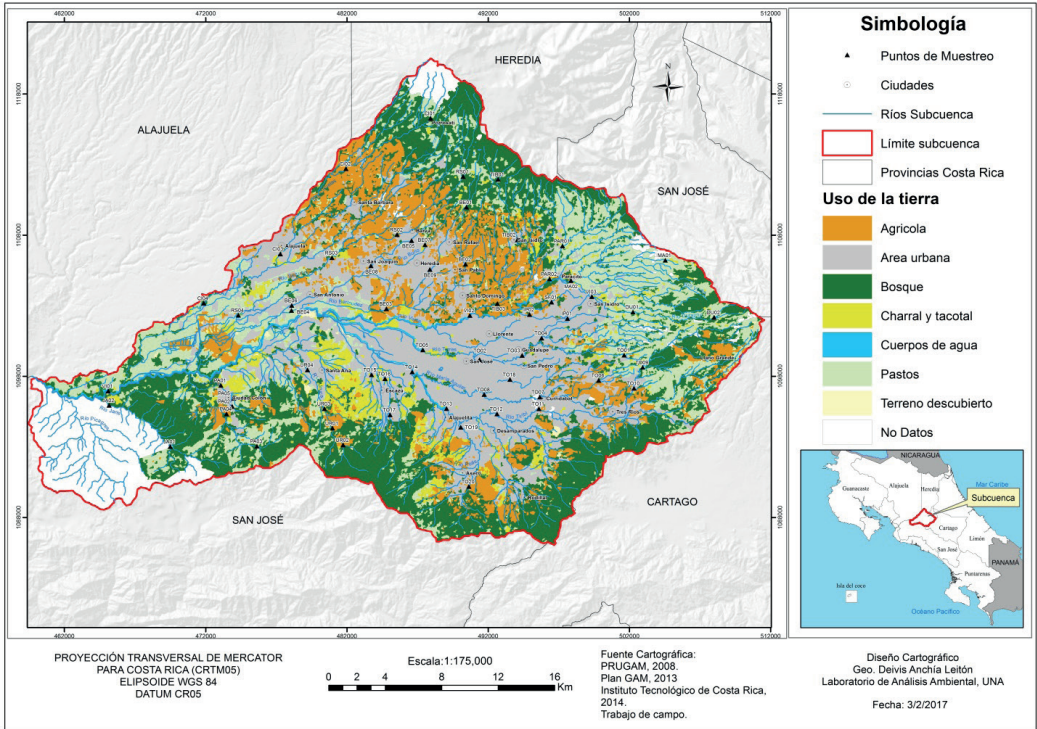
El régimen de precipitación de la subcuenca es de tipo Páccico, con un periodo seco y lluvioso bien definidos. La época seca se registra normalmente entre mediados de noviembre a, inclusive, el mes de abril y la época lluviosa inicia en mayo y concluye a mediados de noviembre. La precipitación media anual va desde los 1 500 a los 4 000 mm, marcándose una media anual de hasta los 4 000 mm y 2 000 mm, en las partes altas y bajas, respectivamente. Los meses de setiembre y octubre suelen ser los más lluviosos, aportando aproximadamente de 17 a 18 %, respectivamente, de la precipitación promedio anual (IMN, 2017). Con relación al tipo de suelo existente en el área de estudio, domina el orden Andisol con 31.5 % del área total de la subcuenca. Le siguen Urbano (30.7 %), Ultisoles/ Inceptisoles (16.9 %), Ultisoles (12.8 %), Inceptisoles (11.7 %), Entisoles (1.8 %) y Vertisoles (0.4 %) (CIA, 2017) (Figura 2).

Figura 2. Distribución del orden de los suelos en la subcuenca del río Virilla, Costa Rica



El uso del suelo fue creado por el Plan Regional de Ordenamiento Territorial de la Gran Área Metropolitana en el año 2013, donde se indica que dentro de la subcuenca se presentan ocho categorías, principalmente: áreas urbanas con un 27.6 %, bosques 25.9 %, tierras agrícolas 14.8 %, áreas donde no existen datos 7.8 %, charrales y tacotales 5.5 %, cuerpos de agua 0.7 %, pastos 18.1 % y terrenos descubiertos representan 0.3 % del área total de la cuenca (Figura 3).

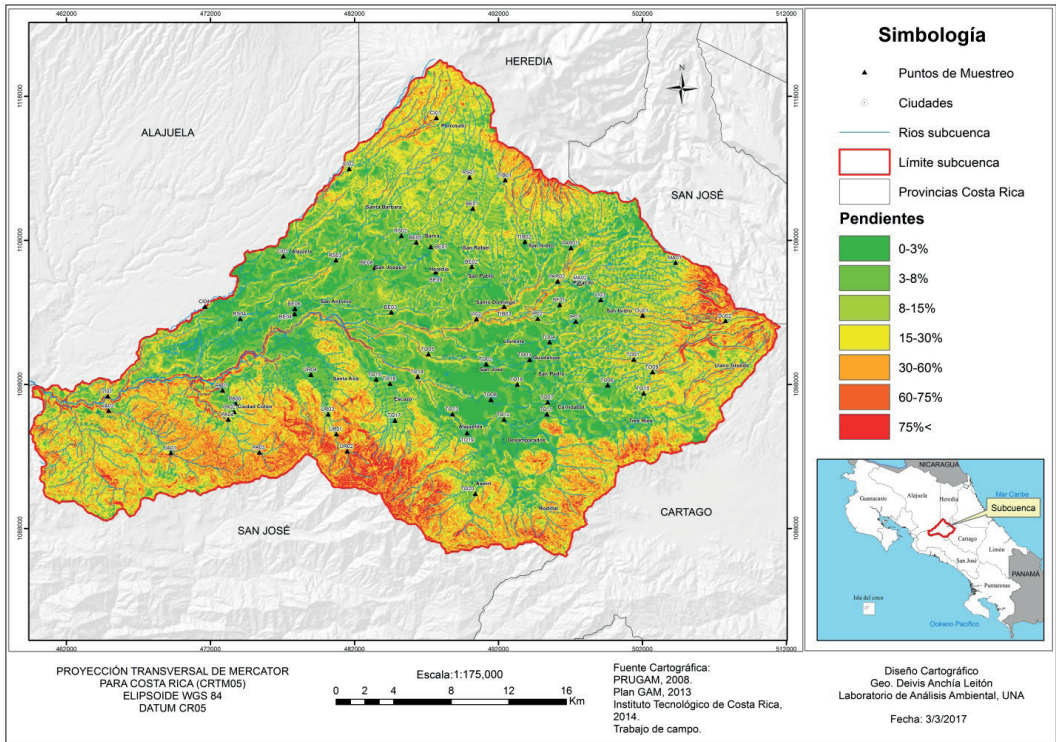
Figura 3. Patrones de uso de la tierra en la subcuenca del río Virilla, Costa Rica 2015



Pendientes

Utilizando el software ArcGis se generó el mapa de pendientes mediante el uso de las curvas de nivel 1:50 000 con proyección CRTM05, las cuales fueron obtenidas del Atlas Cantonal elaborado por el Instituto Tecnológico de Costa Rica. A partir de estas, se creó un modelo digital de elevación (MDE) 10 x 10 m² para delinear el área de la subcuenca, obtener la red de drenaje y así obtener, tanto las características topográficas como las pendientes en el área de estudio y la pendiente media (Figura 4).

Figura 4. Nivel de pendientes en la subcuenca del río Virilla, Costa Rica



Del MDE se extrajeron siete categorías de pendiente y su porcentaje de representatividad en el área de la subcuenca:

- Categoría I (0–3 %): 13.9 %
- Categoría II (3–8 %): 21.8 %
- Categoría III (8–15 %): 16.5 %
- Categoría IV (15–30 %): 20.0 %
- Categoría V (30–60 %): 21.9 %
- Categoría VI (60-75 %): 4.2 %
- Categoría VII (> 75 %): 2.3 %

Según indica el Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica, dependiendo del porcentaje de pendiente, las áreas pueden ser clasificadas de la siguiente forma (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de áreas según su pendiente, 2016.

Pendiente	Superficie
0–3 %	plana o casi plana
3–8 %	ligeramente ondulada
8–15 %	moderadamente ondulada
15–30 %	ondulada
30–60 %	fuertemente ondulada
60-75 %	escarpada
75 % <	fuertemente escarpada

Fuente: Elaboración propia según datos del (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2016).

Sitios de muestreo y calidad del agua

Se seleccionaron un total de 64 sitios de monitoreo distribuidos en las 15 microcuencas que integran la subcuenca del río Virilla, a saber: río Ciruelas (CI), río Segundo (RS), río Bermúdez (BE), río Tibás (TIB), río Para (PAR), río Macho (MA), río Durazno (DU), Quebrada San Francisco (SF), río Ipís (IP), río Torres (TO), río Rivera (RIV), río Uruca (UR), río Jaris (JA), río Picagres (PI) y río Pacacua (PA). La ubicación de los sitios respondió a criterios, como cambios importantes en el nivel de pendientes, uso del suelo, entrada y salida a importantes centros urbanos. Se realizaron un total de 4 periodos de muestreo distribuidos entre noviembre 2014 a diciembre 2015. En la toma de muestras para el análisis físico-químico por cada sitio se usaron botellas de polietileno de alta densidad de 3.78 L para recolectar muestras compuestas. Durante cada muestreo se recolectaron 2 submuestras de 1.89 L cada una en diferentes horas del día (mañana y tarde), y posteriormente se conservaron a 4°C en hieleras para transportarlas al laboratorio. Las muestras se tomaron de 0.5 a 1.0 m de distancia de la orilla del río y a una profundidad promedio de 20 cm, donde no existiera turbulencia y descargas próximas de aguas residuales.

Para el análisis de metales pesados se utilizaron botellas de polietileno de baja densidad de 100 mL, las cuales se colocaron al menos 24 h en un baño de ácido nítrico al 10 % y se enjuagaron varias veces con agua

desionizada antes del muestreo. Durante la ejecución del muestreo se exponía un frasco con 100 mL de agua MiliQ al ambiente (primera muestra del día), cumpliendo una función de blanco. Seguidamente, utilizando otro frasco recolector se realizaban tres enjuagues con la misma agua a muestrear y por último se tomaba la muestra directamente del cauce del río, conservándola a 4 °C en la hielera, para su posterior traslado al laboratorio. Las muestras de metales pesados se colectaron durante la primera toma de muestra compuesta (submuestra) en cada sitio y para cada campaña. Cada una de las muestras se identificó adecuadamente con una etiqueta que contenía un número asignado en el correspondiente plan de muestreo.

Para la medición de oxígeno disuelto (mg/L) y temperatura del agua (°C) se usó el equipo Multiparámetro HQ40d en cada toma de submuestra. La determinación de los caudales se efectuó para los 64 sitios monitoreados en los cuatro periodos usando el método de área transversal y velocidad promedio con la ayuda de un Caudalímetro marca FLOWATCH.

Los análisis químicos realizados a las muestras recolectadas se indican en la Tabla 3. El análisis de metales trazas se efectuó en muestras sin filtrar (totales) y en muestras filtradas con filtros de nitrato de celulosa de 0,45 micras (disueltos). Antes de las mediciones, las muestras de agua fueron digeridas por acidificación con HNO₃ (2,5 mL de ácido concentrado a 25 mL de la muestra).

Tabla 3. Métodos analíticos empleados en la evaluación de las muestras de agua recolectadas

Variable	Método	Límite de detección	Unidades
Demanda química de oxígeno	Método estándar 5220 D	6	mg O ₂ /l
Demanda bioquímica de oxígeno	Método estándar 5220 D	3	mg O ₂ /l
pH	Método estándar 4500-H+ B	NA	Unidades pH
Conductividad	Método estándar 2510 B	NA	μS/cm
Oxígeno disuelto	Método estándar 4500-O	0.10	mg O ₂ /l
Sólidos sedimentables	Método estándar 2540	0.1	mL/l
Sólidos suspendidos totales	Método estándar 2540 D	0.6	mg/l
Turbiedad	Nefelométrico	Na	NTU
Fósforo total	Método estándar 4500-P C	0.7	mg/l
Nitrógeno Total	Método estándar 4500-N C	2	mg/l

Variable	Método	Límite de detección	Unidades
Nitrito	Método estándar 4500-NO2-	8	µg/l
Amonio	Método estándar 4500-NH3	14	µg/l
Cloruro	Método estándar 4110	0.10	mg/l
Sulfato	Método estándar 4110	0.14	mg/l
Nitrato	Método estándar 4110	0.05	mg/l
Na	Método estándar 3111	0.11	mg/l
K	Método estándar 3111	0.07	mg/l
Ca	Método estándar 3111	0.8	mg/l
Mg	Método estándar 3111	0.01	mg/l
Zn	Método estándar 3111	0.02	mg/l
Al	Método estándar 3111	1.1	µg/l
Fe	Método estándar 3111	4	µg/l
Cr	Método estándar 3111	3	µg/l
Cu	Método estándar 3111	1.5	µg/l
Ni	Método estándar 3111	2.4	µg/l
Pb	Método estándar 3111	1.8	µg/l
Mn	Método estándar 3111	2	µg/l

Fuente: Elaboración propia

Análisis de los datos

A partir de los datos obtenidos, se utilizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov para determinar la normalidad de los parámetros individuales de calidad del agua, así como la prueba de Kruskal-Wallis para determinar si había diferencias significativas en la calidad del agua entre microcuencas y en las diferentes épocas del año, a un nivel de significancia de 0.05. Para la interpretación de los resultados, se realizó un análisis jerárquico de conglomerados para agrupar las microcuencas en clases, según el uso del suelo y la química del agua. El análisis de conglomerados se corrió en conjuntos de datos normalizados por medio del método Ward y utilizando distancias euclidianas como medida de similitud. Las relaciones existentes entre los patrones de usos del suelo y los parámetros de calidad del agua fueron evaluadas a partir de la elaboración de una matriz de correlación de Spearman y un análisis de factor.

Resultados y discusión

Los resultados promedio obtenidos para los parámetros fisicoquímicos evaluados durante las campañas de muestreo, en cada una de las microcuencas que integran la subcuenca del río Virilla, se muestran en las Tablas 4 y 5. La normalidad de los datos de la calidad del agua se evaluó mediante la aplicación de la prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S), resultando que todos los parámetros, con excepción del oxígeno disuelto, presentaron una distribución no normal. Tal como se puede apreciar las microcuencas ubicadas en el sector noroeste de la subcuenca del río Virilla (RS, BE, CI y TIB) presentan concentraciones de Ca y Mg menores a las registradas para aquellas localizadas en el sureste (PI, JA, PA y UR). Esta diferencia se podría explicar debido al hecho de que el primer grupo se encuentra asentado en suelos de tipo andisol a diferencia del segundo donde predominan los suelos ultisoles, los cuales poseen condiciones de agregamiento que favorecen la lixiviación de nutrimentos, especialmente las bases Ca, Mg y K, presentando problemas de acidez. De igual forma, los valores de pH entre ambos grupos de microcuencas resultaron ser significativamente diferentes ($p < 0.01$).

Para determinar el nivel de contaminación de cada microcuenca debido a la presencia de metales se utilizó el índice de metal (IM), el cual entre mayor sea la concentración de un metal en comparación con su valor máximo permisible, peor es la calidad del agua. Un valor de IM > 1 es un umbral de advertencia. Según (Tamasi y Cini, 2004), el IM se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Donde: } \text{IM} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(VMP)} \quad (1)$$

C_i = concentración de cada metal

VMP= valor máximo permitido para cada metal

Tabla 4. Promedio de los resultados obtenidos para los parámetros de calidad del agua superficial evaluados por microcuenca. 2014-2015

Micro-cuenca	pH	Turb (NTU)	Cond (µScm ⁻¹)	DBO (mgL ⁻¹)	DQO (mgL ⁻¹)	SS (mLL ⁻¹)	SST (mgL ⁻¹)	Cl ⁻ (mgL ⁻¹)	NO ₃ ⁺ (mgL ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ (mgL ⁻¹)	NO ₂ ⁻ (µgL ⁻¹)	NH ₄ ⁺ (µgL ⁻¹)	P Total (mgL ⁻¹)	N Total (mgL ⁻¹)	T (°C)	OD (mgL ⁻¹)
BE	7.38	19.71	350.00	44.6	101	0.46	23.53	16.8	4.3	22.7	699	5624	25.2	13.3	21.5	4.64
RS	7.30	22.80	187.50	22.8	54	0.28	38.24	4.3	4.7	7.0	248	297	17.2	14.4	19.0	7.68
TIB	7.39	1.75	78.33	9.7	28	0.10	2.65	3.3	2.3	3.6	21	154	28.0	14.2	18.9	7.47
CI	7.12	13.34	170.50	9.2	64	0.28	20.77	7.7	6.4	12.1	413	852	36.6	9.9	18.9	7.70
UR	7.48	6.15	265.75	7.8	57	0.26	19.77	9.3	5.9	12.8	174	448	18.4	16.5	20.6	7.49
PAR	7.24	1.65	59.00	5.5	23	0.10	8.74	2.3	1.6	2.0	28	364	21.5	9.4	19.4	7.59
MA	7.47	3.71	152.00	7.0	48	0.13	5.18	3.6	4.2	7.6	82	203	25.4	6.7	18.8	7.53
SF	7.43	5.43	436.50	7.0	35	0.13	6.81	20.3	4.4	28.7	685	2309	21.7	29.7	20.6	4.88
IP	7.60	2.65	371.75	8.0	32	0.15	4.13	13.0	15.6	27.8	579	586	23.0	14.0	20.5	7.00
DU	8.07	7.80	322.75	10.0	36	0.12	8.60	3.2	2.5	85.6	36	77	13.0	4.0	18.8	7.73
VI	7.90	19.67	237.33	13.3	48	0.30	31.36	9.2	4.5	21.8	310	405	21.9	11.7	22.9	8.13
JA	8.22	3.01	315.00	9.5	42	0.34	7.49	8.4	3.2	11.5	141	202	5.6	4.0	24.3	7.72
PI	8.31	1.22	239.50	9.0	32	0.10	11.17	6.3	1.7	8.7	45	380	16.1	5.2	25.8	8.27
PA	7.67	5.46	261.10	10.0	48	0.28	15.50	10.1	4.9	15.7	171	256	10.9	7.5	20.9	7.53
TO	7.55	26.07	326.65	24.2	74	0.38	35.40	10.8	5.9	18.6	837	3947	30.7	11.9	21.1	5.37

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Promedio de los resultados obtenidos para la concentración de metales evaluados por microcuenca. 2014-2015

Microcuenca	Na (mgL ⁻¹)	Ca (mgL ⁻¹)	Mg (mgL ⁻¹)	Zn (mgL ⁻¹)	Al (µgL ⁻¹)	Fe (µgL ⁻¹)	Cr (µgL ⁻¹)	Cu (µgL ⁻¹)	Ni (µgL ⁻¹)	Pb (µgL ⁻¹)	Mn (µgL ⁻¹)	K (mgL ⁻¹)
BE	36.2	9.2	5.0	0.09	1148	1609	11.8	7.5	39	7.9	633	7.1
RS	6.3	3.5	3.8	0.11	3656	3686	20.1	10.4	24	15.2	241	1.8
TIB	4.5	3.6	1.9	0.08	364	795	3.7	6.7	10	18.5	33	1.3
CI	9.2	4.7	4.5	0.25	3353	1777	16.8	6.5	71	33.7	372	3.0
UR	12.1	25.2	6.2	0.09	321	445	5.2	7.3	7.2	5.7	27	2.1
PAR	2.8	3.4	2.1	0.08	493	1464	9.3	4.0	15	22.0	20	1.1
MA	6.2	7.3	7.6	0.08	220	1899	8.0	5.3	7.8	16.5	134	4.4
SF	35.7	29.3	13.7	0.11	285	2333	10.0	12.0	42	4.1	219	6.1
IP	26.5	20.5	11.2	0.10	992	788	10.0	4.7	7.5	6.0	105	5.0
DU	7.4	25.2	7.6	0.80	369	2146	5.5	5.6	7.4	5.8	294	5.4
VI	13.9	12.3	6.6	0.12	3649	3781	16.3	5.8	35	35.9	173	3.5
JA	20.4	27.1	8.2	0.08	138	944	4.8	6.6	6.6	5.2	89	2.8
PI	9.8	26.3	7.3	0.05	194	1012	13.0	6.3	7.4	4.8	21	1.5
PA	7.7	18.5	12.4	0.87	48	62	4.5	10.1	4.9	15.7	171	4.2
TO	24.0	14.4	7.3	0.10	3174	1274	12.1	6.9	11.4	11.8	264	5.5

Fuente: Elaboración propia

Para la estimación del índice se tomaron en cuenta los siguientes metales: Al, Cr, Cu, Ni, Pb y Mn, así como los respectivos valores máximos permitidos, según el tipo de uso, contenidos en el Decreto 33903-MINAE-S *Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales*. Según los valores del índice obtenidos (Tabla 6), todas las microcuencas están seriamente amenazadas con contaminación metálica para el abastecimiento de agua y la preservación de la vida acuática ($MI > 1$), principalmente en BE, RS, CI y TO. En el caso del riego, TIB, UR, PAR, JA y PI presentan condiciones adecuadas para su uso sin riesgo. Sin embargo, la tasa de adsorción de sodio (TAS), que es una medida de la idoneidad del agua para su uso en el riego agrícola (Myers, 1991), mostró valores entre 0.23 y 2.55 para la totalidad de las microcuencas. La TAS cuantifica la proporción relativa de sodio a iones de calcio y magnesio. En general, cuanto mayor es la relación de adsorción de sodio, menos adecuada es el agua para riego, ya puede requerir enmiendas del suelo para evitar daños a largo plazo (Bahnasawy et al., 2011).

Tabla 6. Índice de metal para las microcuencas que integran la subcuenca del río Virilla, 2015

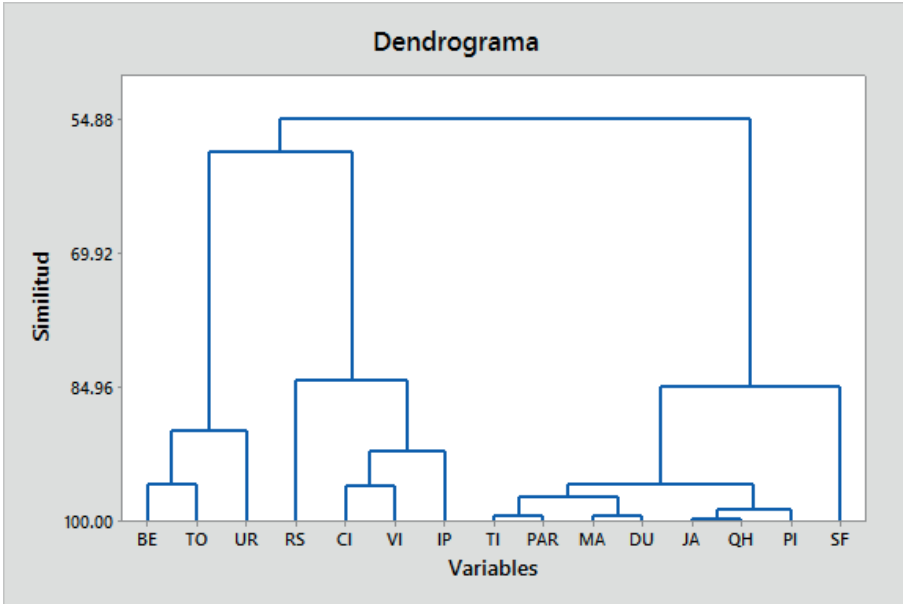
Microcuenca	Índice de metal			TAS
	Abastecimiento Humano	Riego	Vida Acuática	
BE	20.5	4.0	25.9	2.55
RS	21.9	2.6	39.2	0.86
TIB	4.3	0.7	4.7	0.82
CI	24.8	4.0	38.3	1.00
UR	2.7	0.4	3.8	0.39
PAR	5.6	0.8	6.3	0.51
MA	3.6	1.2	3.7	0.42
SF	4.6	1.7	5.1	0.83
IP	6.3	1.0	11.0	0.84
DU	3.5	1.8	5.6	0.23
VI	24.3	2.8	39.6	0.74
JA	1.8	0.7	2.2	0.58

Microcuenca	Índice de metal			TAS
	Abastecimiento Humano	Riego	Vida Acuática	
PI	2.1	0.4	2.6	0.29
PA	2.5	1.3	2.1	0.25
TO	18.4	2.4	33.9	1.11

Fuente: Elaboración propia

La Figura 5 muestra el dendrograma resultante del análisis de clúster basado en los datos de los parámetros fisicoquímicos evaluados en las muestras de agua superficial. A partir del dendrograma, se puede determinar que las 15 microcuencas que integran la subcuenca del río Virilla se agrupan en seis clústers, con el 90 % de la varianza explicada. El primer grupo incluye los ríos BE y TO que se caracterizan por poseer un fuerte componente urbano, con aportes secundarios de bosque y agricultura (Tabla 7). En el segundo (UR), tercer (RS) y cuarto grupo (CI, VI, IP) se encuentran microcuencas que se caracterizan por poseer una contribución de similar en proporción para los usos agrícolas, urbano y bosque. El quinto grupo se divide a su vez en dos subgrupos integrados por las microcuencas TIB, PAR, MA, DU y JA, QH, PI caracterizadas por tener una mayor aporte de bosques y pastizales. La diferencia entre ambos subgrupos se encuentran en el hecho de que en el primer caso la predominancia es del uso destinado a pastos sobre bosques, mientras que para el segundo subgrupo se invierte la relación. En la última agrupación se puede encontrar a SF. En este último caso, la separación con respecto al resto de microcuencas se puede deber al hecho de que a pesar de que se presentan tres usos del suelo generalizados, la proporción entre el área urbana con respecto al destino agrícola y bosque es mucho mayor que en las categorías I-IV.

Figura 5. Dendrograma resultante del análisis de clúster de las 15 microcuencas que integran la subcuenca del río Virilla



Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Distribución de los porcentajes de área por tipo de uso de la tierra para cada microcuenca. 2015

Código	Microcuenca	Porcentaje de área por tipo de uso de la tierra						
		Agrícola	Urbana	Bosque	Charral y Tacotal	Pastos	Terreno descubierto	Sin identificar
BE	Río Bermúdez	33	43	14	3	7	0	0
RS	Río Segundo	31	19	30	2	16	0	2
TIB	Río Tibás	34	7	21	4	33	0	1
CI	Río Ciruelas	23	23	21	2	24	0	7
UR	Río Uruca	12	5	59	4	18	1	0
PAR	Río Pará	1	4	31	2	60	0	2
MA	Río Macho	0	4	14	3	72	0	7
SF	Quebrada San Francisco	16	71	12	1	0	0	0
IP	Río Ipís	2	87	4	2	5	0	0

Código	Microcuenca	Porcentaje de área por tipo de uso de la tierra						
		Agrícola	Urbana	Bosque	Charral y Tacotal	Pastos	Terreno descubierto	Sin identificar
DU	Río Durazno	0	3	36	4	54	0	2
VI	Río Virilla	15	26	28	5	18	0	9
JA	Río Jaris	1	0	79	0	20	0	0
PI	Río Picagres	11	4	52	5	23	3	2
PA	Río Pacacua	9	6	50	4	30	0	0
TO	Río Torres	12	38	31	6	12	0	1

Fuente: Elaboración propia

La agrupación obtenida del análisis clúster permite una mayor comprensión del comportamiento de los parámetros fisicoquímicos dentro de la subcuenca del río Virilla. Así por ejemplo, los valores de DBO, DQO y SST tiende a ser menores conforme se avanza en las categorías, indicando que los grupos I, II, III y IV tienen un mayor aporte antropogénico proveniente de la descarga de aguas residuales de origen urbano. Los resultados obtenidos en el análisis de clúster coinciden con los datos derivados de la matriz de correlación de Spearman, la cual se aplicó dada la distribución no normal de los datos. En la Tabla 8, se muestra que para los grupos I y II se registra una correlación positiva con el pH, DBO, DQO, SST y los metales Cr, Cu, Pb y Zn. Sin embargo, en estos grupos, donde predomina el uso urbano de la tierra, se correlacionó negativamente la turbiedad y DQO. Adicionalmente, se observó una relación no significativa del uso del suelo urbano con la temperatura, la conductividad, amonio, nitrato, fosfato, entre otros. En el caso de los grupos III y IV donde se presenta un uso de la tierra mixto (urbano-agrícola-bosque), se obtuvo un patrón similar a los grupos I y II en el caso del DBO, DQO y SST con la incorporación de una correlación positiva significativa con turbidez-nitrato, Ptotal-nitrato, magnesio-nitrato y correlación negativa de Ca y Mg con la DQO. Sin embargo, la correlación con otros parámetros, a saber, temperatura, conductividad, pH, DBO y fosfato, no fue significativa. El Mg y el NO_3^- son nutrientes provienen principalmente de la agricultura (tierras cultivables y pastizales) (Bahar et al., 2008).

Tabla 8. Patrones de correlación de Spearman significativos de acuerdo con la clasificación de microcuencas obtenidas por análisis de clúster.

Grupos derivados del análisis de clúster			
I y II	III y IV	V	VI
DBO vrs DQO (0.825)	DBO vrs DQO (0.748)	Na vrs K (0.885)	DBO vrs DQO (0.781)
DBO vrs SST (0.827)	DBO vrs SST (0.703)	Na vrs Turbiedad (0.917)	DBO vrs SST (0.767)
DQO vrs SST (0.842)	DQO vrs SST (0.815)	K vrs Turbiedad (0.832)	DQO vrs SST (0.840)
pH vrs DQO (0.677)	Turbiedad vrs NO ₃ ⁻ (0.792)	Turbiedad vrs Cl ⁻ (0.753)	Turbiedad vrs Cl ⁻ (0.693)
Cr vrs DQO (0.651)	P total vrs NO ₃ ⁻ (0.648)	Ca vrs Mg (0.719)	Turbiedad vrs NO ₃ ⁻ (0.715)
Cu vrs DQO (0.572)	Mg vrs NO ₃ ⁻ (0.871)	Ca vrs SST (0.839)	Zn vrs SST (0.725)
Pb vrs SST (0.625)	Ca vrs DQO (-0.594)	Zn vrs SST (0.793)	
Zn vrs SST (0.688)	Mg vrs DQO (-0.547)	Conductividad vrs Na (0.718)	
Turbiedad vrs DQO (-0.706)		Turbiedad vrs NO ₃ ⁻ (0.747) P total vrs NO ₃ ⁻ (0.711)	

Fuente: Elaboración propia

Para el grupo V, el patrón de correlaciones presentó diferencias importantes con respecto a los anteriores, relacionando parámetros como Na-K, Na-turbiedad, K-turbiedad, Ca-Mg, turbiedad-cloruro, Ca-Mg, entre otros, los cuales evidencian el aporte de la litología de los cuerpos de agua,

así como el aporte de fuentes difusas relacionadas con procesos de erosión (Miller et al., 2011). En el último grupo (VI) se evidenciaron correlaciones entre DBO, DQO, SST, turbiedad, cloruro y nitrato.

Con el fin de identificar las principales fuentes de contaminación, se realizó un análisis de factor sobre los datos normalizados obtenidos para los grupos mediante el análisis de clúster. El análisis de factor es un método estadístico multivariado que se puede utilizar para describir la variabilidad entre los parámetros observados en términos de un menor número de mensurandos no observados llamados factores (Tabachnick y Fidell, 2001). Los resultados del análisis de factor junto con los tipos de fuentes probables se presentan en la Tabla 9. Según Liu et al. (2003), cargas factoriales > 0.75 , $(0.5-0.75)$ y $(0.3-0.5)$ se consideran como fuertes, moderadas y débiles, respectivamente. Para los grupos 1 y 2, se obtuvieron tres varifactores que explican el 84.3 % de la varianza total. El primer varifactor (VF1), representa el 18.1 % de la varianza total y presenta una fuerte correlación entre turbiedad, cloruro, Na, K y Ca que relaciona los factores naturales como la litología y los tipos de suelo. El segundo varifactor (VF2), definió el 52.5 % de la varianza total e incluyó la pH, DQO, DBO y SST. Este factor representa múltiples fuentes de contaminación y puede ser generado, principalmente por la escorrentía urbana y aguas residuales industriales. Por su parte el VF3 relaciona el Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , Ca y Mg puede provenir de las actividades agrícolas que se desarrollan en las microcuencas. En el caso de los grupos 3 y 4, se generan factores que explican la variabilidad de los datos semejantes al primer caso, sin embargo, el porcentaje de contribución de cada uno presenta variaciones con respecto al grupo 1 y 2, sobre todo, debido a la reducción del aporte urbano. Para las microcuencas localizadas en el grupo 5, la situación resulta totalmente diferente, ya que la variabilidad de los datos se explica por dos factores mayoritariamente, factores litológicos y actividades agrícolas, representando el 80.5%.

Tabla 9. Factores Varimax rotados para los distintos grupos derivados del análisis de clúster

Parámetro	Grupos 1 y 2			Grupos 3 y 4			Grupo 5			Grupo 6		
	VF1	VF2	VF3	VF1	VF2	VF3	VF1	VF2	VF3	VF1	VF2	VF3
pH	0.042	0.854	0.273	0.118	0.692	0.011	-0.077	0.244		0.132	0.704	0.455
Turbiedad	0.738	0.161	0.568	0.643	0.207	0.438	0.872	0.387		0.833	0.033	-0.237
SS	0.102	0.325	0.067	0.099	0.418	-0.105	0.044	0.156		0.273	0.174	0.244
SST	0.365	0.815	0.184	0.227	0.847	0.055	0.480	0.442		0.094	0.765	0.372
DQO	-0.073	0.882	0.241	-0.025	0.793	0.392	0.126	0.076		0.115	0.669	0.481
DBO	0.022	0.829	0.120	-0.136	0.838	0.469	0.322	0.381		-0.083	0.913	-0.095
Cl ⁻	0.815	0.155	0.178	0.733	-0.273	0.233	0.755	0.227		0.768	0.246	-0.192
SO ₄ ²⁻	0.141	-0.090	0.817	0.207	-0.041	0.912	0.281	0.775		0.341	0.180	0.868
NO ₃ ⁻	0.275	0.035	0.732	0.684	0.139	0.794	0.816	0.842		0.846	-0.094	0.795
Na ⁺	0.702	-0.127	-0.066	0.757	0.208	0.133	0.795	0.011		0.785	0.132	0.251
K ⁺	0.846	-0.094	0.007	0.747	0.062	0.104	0.813	-0.415		0.811	0.155	0.381
P Total	0.091	0.407	0.435	0.148	0.176	0.557	-0.078	-0.167		0.415	0.328	0.183
NO ₂ ⁻	0.105	0.371	0.188	0.283	0.445	0.272	0.217	0.230		0.277	0.281	0.429
NH ₄ ⁺	0.201	0.645	0.521	0.076	0.739	0.673	0.421	0.671		0.469	0.764	0.730
Ca	0.864	0.209	0.745	0.819	0.297	0.849	0.807	0.873		0.799	0.418	0.829
Mg	0.730	0.155	0.817	0.672	-0.084	0.900	0.773	0.846		0.842	-0.031	0.793
Zn	0.047	0.057	0.416	0.244	0.198	-0.255	0.151	0.392		0.112	0.095	0.374
Mn	0.356	0.210	0.352	0.190	0.135	0.183	0.290	0.268		0.189	0.142	0.445
Al	0.092	0.154	0.273	-0.046	0.274	0.492	0.172	0.129		0.142	0.294	-0.128
Fe	0.151	0.337	0.173	0.204	0.348	0.094	0.341	-0.094		0.209	0.397	0.076
Cr	-0.065	0.765	0.204	0.027	0.710	0.163	0.019	0.173		0.027	0.805	0.189
Cu	0.003	0.819	0.141	-0.226	0.862	0.271	-0.165	0.229		0.192	0.763	0.395
Pb	0.017	0.729	0.056	0.090	0.664	0.162	0.186	-0.132		-0.102	0.651	-0.033
% Varianza explicada	18.1	52.5	13.7	27.5	41.1	16.6	32.6	47.9		12.2	60.4	9.7

Fuente: Elaboración propia

Para la microcuenca SF, incluida en el grupo 6, el análisis de factor dio como resultado la presencia de un factor VF2 que explica el 60.4 % de la variabilidad y que contiene parámetros como el pH, DBO, DQO y SST, que como se mencionó anteriormente está asociado a la descarga de aguas residuales sin tratamiento.

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en la presente investigación, se puede concluir que las microcuencas que componen la subcuenca del río Virilla pueden ser clasificadas en seis categorías según el análisis de conglomerados. Estas categorías corresponden directamente con las diferencias en los patrones de uso de la tierra que predominan en cada una de ellas, de forma tal que las áreas que poseen importantes entornos urbanos se rigen por el aporte de la descarga de aguas residuales sin tratamiento, lo que se refleja en la presencia de altas concentraciones de DBO, DQO y SST en los cuerpos de agua superficial. Por otra parte, las microcuencas con predominio de bosques y pastos, presentan una variabilidad química en la calidad de sus aguas que puede ser explicada mayoritariamente por el aporte litológico y la escorrentía de sedimentos provenientes de zonas agrícolas y pastizales.

Dado que la dependencia de los impactos del uso del suelo en la escala espacial es diferente para los distintos contaminantes, es importante identificar y evaluar el aporte de las diversas fuentes de variabilidad como insumo para ser considerado en la generación de políticas que promuevan una gestión y conservación integral de la tierra, implementada en toda la subcuenca para abordar las múltiples preocupaciones relacionadas con la calidad del agua.

Referencias

- Bahar, M., Ohmori, H. y Yamamuro, M. (2008) Relationship between river water quality and land use in a small river basin running through the urbanizing area of Central Japan. *Limnology*, 9 (1), 19-26.
- Bahnasawy, M., Khidr, A., Dheina, N. (2011) Assessment of heavy metal concentrations in water, plankton and fish of Lake Manzala, Egypt. *Turk. J. Zool.*, 35 (2), 271-280

- Carbone, M. E., García, B., Piccolo, M. C. & Perillo, G. M. (2013). Impacto Antrópico en la Calidad del Agua Superficial de la Cuenca Media del Arroyo Claromeco. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 556 – 563.
- Centro de investigaciones Agronómicas (CIA) (2017). *Mapa Digital de Suelos en Costa Rica*. Recuperado de <http://www.cia.ucr.ac.cr/10/03/2017>
- Cisneros, R. C. (2005). *Uso del suelo y calidad del agua en quebradas de fincas con sistemas silvopastoriles en la Subcuenca del Río Jabonal, Costa Rica*. Turrialba, Turrialba, Costa Rica.
- Kaushal, S. & Belt, K. T. (2012) The urban watershed continuum: evolving spatial and temporal dimensions. *Urban Ecosyst.* 15, 409-435.
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN) (2017). Régimen de precipitación en Costa Rica. *a*. Recuperado de <https://www.imn.ac.cr/web/imn/inicio> 13/04/2017
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) (2011). Censo Nacional de Población 2011. Recuperado de <https://www.inec.go.cr/08/06/2017>
- Liu, C.W., Lin, K.H. & Kuo, Y.M. (2003). Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a Blackfoot disease area in Taiwan. *Science in the Total Environment* 313(1-3), 77-89.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) (2007). *Reforma Metodología Determinación Capacidad Uso Tierras osta Rica*, Decreto N° 23214-MAG-MIRENEM. Procuraduría General de la República de costa Rica. Recuperado de http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NR TC&nValor1=1&nValor2=60982&nValor3=69013&strTipM=TC 05/06/2017
- Miller, J. D., Schoonover, J.E., Williard, K. & Hwang, C. (2011) Whole catchment land cover effects on water quality in the Lower Kaskaskia River Watershed. *Water Air Soil Pollut*, 221, 337-350.
- Miserendino, M. L., Casaux, R., Archangelsky, M., Di Prinzio, C. Y., Brand, C. & Kutschker, A. M. (2011). Assessing land-use effects on water quality, in-stream habitat, riparian ecosystems and biodiversity in Patagonian northwest streams. *Sci. Total Environ.* 409(3), 612–624.

- Quesada, M. (2012). Dinámica territorial en el uso del suelo y el régimen hidrológico: región central, Costa Rica. *Espacio y Desarrollo*, 45-56.
- Sangani MH, Amiri BJ, Shabani AA, Sakieh Y. & Ashrafi S (2015) Modeling relationships between catchment attributes and river water quality in southern catchments of the Caspian Sea. *Environ Sci Pollut Res*. 22, 4985–5002
- Saroj, G., Techato, K., Monprapussorn, S. & Yuangyai, C. (2013). Integrating Land use and Water quality for Enviromental based land use planning for U-Tapao River Basin, Thailand. *Procedia - Social and Behavioral Sciences. Sciencedirect* (91), 556 – 563.
- Songyan, Y., Zongxue, X., Wei, W. & Depeng, Z. (2016). Effect of land use types on stream water quality under seasonal variation and topographic characteristics in the Wei River basin, *China. Ecol. Ind.* 60, 202-2012.
- Tabachnick, B. G. & Fidell, L. S. (2001). *Using Multivariate Statistics*. Boston. MA: Allyn and Bacon.
- Tamasi, G. & Cini, R. (2004). Heavy metals in drinking waters from Mount Amiata. Possible risks from arsenic for public health in the province of Siena. *Sci. Total Environ.* 327, 41-51
- Tong, S. T., Liu, A. J. & Goodrich, J. A. (2009). Assessing the water quality impacts of future land-use changes in an urbanising watershed. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 26(1), 3–18.
- Uriarte M, Yackulic CB, Lim, Y. & Arce-Nazario JA (2011) Influence of land use on water quality in a tropical landscape: a multi-scale analysis. *Landsc Ecol* 26,1151–1164
- Walling, D. E. & Fang, D. (2003). Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, 39(1–2), 111–126.
- Wear, D. N., Turner, M. G. & Naiman, R. J. (1998). Land cover along an urban–rural gradient: implications for water quality. *Ecological Applications*, 8(3), 619–630.



Fragmentación y conectividad de la cobertura natural a nivel cantonal en Costa Rica durante los años 2000 y 2015

Fragmentation and connectivity of the natural cover at county level in Costa Rica, during 2000 and 2015 years

Carlos Morera-Beita¹
Luis Fernando Sandoval-Murillo²
Universidad Nacional, Costa Rica

Resumen

En esta investigación se plantea la formulación de un índice de fragmentación/conectividad que valora la condición de las coberturas naturales a nivel de cantones para Costa Rica, basado en la distribución espacial, considerando las variables: superficie del cantón, la superficie de cobertura natural, el número de fragmentos y distancia de vecindad entre los fragmentos de la cobertura natural, para los años 2000 y 2015. Se utilizaron las imágenes Landsat 7 para el año 2000 y Landsat 8 para el año 2015, donde se derivaron las categorías de uso de la tierra para cada año mediante clasificación supervisada con el software ERDAS y con el ArcMap10.5, se estimaron los índices biométricos usando la ecuación de Vargas (2008), la cual para su aplicación fue modificada. Dentro de los resultados se identificó los cantones que presentan mayor o menor fragmentación y conectividad de su cobertura natural durante el periodo de estudio.

Palabras clave: cobertura natural, uso de la tierra, fragmentación, conectividad, índice biométrico

- 1 Académico, Escuela de Ciencias Geográficas. Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: cmorera@una.cr
- 2 Académico, Escuela de Ciencias Geográficas. Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: luis.sandoval.murillo@una.cr

Este artículo corresponde a la ponencia presentada en el I Congreso Centroamericano de Ciencias de la Tierra y el Mar, realizado en San José, Costa Rica, del 13 al 16 de noviembre de 2017.

Abstract

This research proposes the formulation of a fragmentation / connectivity index that assesses the condition of natural cover at the canton level for Costa Rica based on spatial distribution considering the variables: area of the county, the natural coverage area, the number of fragments and distance of neighborhood between the fragments of the natural cover, for the years 2000 and 2015. The images Landsat 7 for the year 2000 and Landsat 8 for the year 2015 were used where the land use categories for each year were derived through supervised classification with ERDAS software and with ArcMap10.5 biometric indices were estimated using the Vargas equation (2008) which was modified for its application. Within the results, we identified the cantons that present greater or lesser fragmentation and connectivity of their natural coverage during the study period.

Keyword: nature cover, land use, fragmentation, connectivity, biometric index.

Introducción

La conformación del paisaje refleja la impronta de las actividades humanas, las cuales determinan su heterogeneidad (Morera y Sandoval, 2018). Para evaluar los patrones espaciales que conforman los elementos del paisaje se han propuesto los índices biométricos que formulan ecuaciones matemáticas para valorar la disposición de las variables del paisaje (Liu, Li y Chen, 2010). En los últimos años el desarrollo de las tecnologías de Sistemas de Información Geográfica y teledetección (SIGT) han incidido en la proliferación de estudios que valoran los patrones espaciales del paisaje y algunas se han centrado en la formulación y la aplicabilidad de estos índices. En el caso de Costa Rica, autores como: Veldkamp y Fresco (1996); Calvo, Watson, Bolaños, Quesada, Sánchez, Gonzáles y Ramírez (1999); Sánchez, Foley, Hamilton, Calvo, Arroyo y Jiménez, (2002), Calvo y Ortiz (2011) Morera (2010); y Morera y Sandoval (2000, 2013, 2015) han abordado esta temática.

Los resultados de las anteriores investigaciones evidencian la recuperación de la cobertura boscosa en el país, sin embargo, no existen estudios que evalúen el comportamiento de la cobertura natural a nivel de cantones, para lo cual los índices biométricos son un método adecuado para este fin. Por lo que es necesario evaluar la distribución espacial de los ecosistemas naturales donde se considera no solo la superficie, sino aspectos relacionados a la disposición y grado de conectividad ecológica que se transforman en criterios considerados para la toma de decisiones, en cuanto a políticas de ordenamiento territorial orientadas a la conservación y conectividad ecológica.

Considerando la anterior necesidad, esta investigación plantea la formulación de un índice de fragmentación/conectividad que valora la condición de los ecosistemas naturales en cada cantón del país, basado en la relación entre: el área del cantón, con la superficie de cobertura natural, el número de fragmentos y distancia de vecindad entre los fragmentos de la cobertura natural, para los años 2000 y 2015 utilizando imágenes Landsat. Este permite la identificación de cuáles son los cantones que presentan mayor o menor fragmentación/conectividad de su cobertura natural durante este periodo de estudio.

Metodología

Como información básica de esta investigación, se elaboraron los levantamientos de las coberturas de uso de la tierra para los años 2000 y 2015, utilizando imágenes satelitales LandSat7 y LandSat8 con una resolución espacial de 30 metros. Las imágenes satelitales de acuerdo con Ambrosio, Gonzales y Arévalo (s.f.), idealmente, capturadas en dos diferentes imágenes de satélite (con el mismo sensor) deberían aparecer con los mismos valores de intensidad. En la práctica, lo anterior no sucede debido a las inevitables condiciones atmosféricas y de iluminación desiguales, por lo que se hace necesaria la corrección radiométrica de las imágenes, en la cual, según Martínez, Palá y Arbiol (2004) es necesaria para modelar adecuadamente parámetros físicos realistas y consistentes, al abordar estudios multi-temporales, mismos que facilitan el proceso de clasificación supervisada y de fotointerpretación.

El procesamiento de la imagen consistió en dos etapas. Primeramente, en la identificación de las coberturas a utilizar, de acuerdo con la resolución espacial como: áreas urbanas, cuerpos de agua, cultivos, vegetación anegada y manglares, las cuales fueron delimitadas por fotointerpretación. Para reducir la confusión con otras categorías por medio de una máscara, las coberturas se extrajeron de las imágenes principales, permitiendo clasificar únicamente aquellos sectores de la imagen que no habían sido procesadas.

En una segunda etapa se tomó las muestras en la imagen de cada firma espectral de las coberturas faltantes por clasificar como; bosques de alta densidad y bosque de baja densidad, pastos para las cuales se tomaron 70 muestras por cada una de ellas en las seis imágenes que conforman el territorio nacional, resultado 1260 puntos para ambos periodos. Con la

reclasificación supervisada se evidenció que no representan más de un 10 % de confusión entre ellas, procedimiento que se realizó con el software ERDAS. Posteriormente, cada categoría de uso se convirtió de ráster a vector y se integró en una capa vectorial para establecer el mosaico de uso por cobertura para el país. Posteriormente, se procedió a la limpieza del mosaico de acuerdo con su unidad mínima cartografiada, y según lo establecido por Priego, Bocco, Mendoza y Garrido (2008), permite lograr coherencia en la representación espacial, así como eficiencia en la lectura y utilidad del mapa en formato impreso. Para el área de estudio se utilizó como unidad mínima a representar cartográficamente un área de 3600 m² dada por la siguiente fórmula:

$$UMC = (Lpv \times E \times 3)^2$$

Donde:

UMC: Unidad Mínima Cartografiada, expresada en m².

Lpv: Límite de percepción visual (0.2 mm a escala del plano) expresado en m.

E: Escala del mapa.

La UMC permitió realizar uniones de las coberturas que no cumplen con dicha área, las cuales son agregadas a las más cercanas y para este caso la mayoría estaban inmersas dentro de polígonos más extensos, lo cual facilitó su agrupación. Este procedimiento se realizó en el software ArcGis con las extensiones (Layer and table views - Make Feature Layer) – (Generalization - Eliminate). Las categorías identificadas se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Categorías Coberturas de Uso de la Tierra, año 2000- 2015

Categoría	Caracterización
Bosque de alta densidad (BAD)	Ecosistemas boscosos caracterizados por la dominancia de las estratobosques K, un dosel abundante que limita la luminosidad en el estrato herbáceo y arbustivo, que presenta una limitada presencia de actividad antrópica, que se identifican en las imágenes como áreas con densa densidad del dosel.
Bosque de baja densidad (BBD)	Bosques que presentan una contundente intervención humana, generados por procesos de regeneración natural después de eliminarse total o de forma selectiva el bosque primario, debido a actividades antrópicas o por eventos naturales

Categoría	Caracterización
Páramo	Ecosistemas montano intertropical localizados a más de 3200 msnm, dominado por vegetación húmeda de tipo matorral (arbustos) de origen andinos con alta presencia de endemismos debido al aislamiento.
Manglar	Bosques pantanosos que ocupan espacios con alta sedimentación donde se mezcla el ambiente marino y el terrestre.
Vegetación anegada	Se presenta en lugares planos, donde los suelos pasan saturados varios meses del año debido a las altas precipitaciones.
Pasto arbolado	Eliminación parcial (menos del 50%) de los árboles y remplazado por vegetación de gramíneas debido razones antrópicas, especialmente ganadería extensiva.
Cultivos	Son áreas con ocupación agrícola que puede ser permanentes o estacionales.
Urbano y Residencias	Están representados por la ocupación urbano- residencial, acompañado de servicios públicos institucionales, industrial, comercial.

Fuente: Adaptado de Morera y Sandoval, 2015.

Las categorías de uso de la tierra en la tabla 1, se reclasificaron en dos grupos, una en condiciones naturales donde se consideraron coberturas de bosque, paramo, manglar y vegetación anegada; y otra no natural asociada a las actividades antrópicas como pastos arbolados, cultivos, y urbano como se muestra en la tabla 2, las cuales no fueron consideradas en el presente estudio.

Tabla 2. Coberturas clasificadas según categoría natural y no natural

Categoría	Coberturas
Natural	Bosque de alta densidad (BAD) Bosque de baja densidad (BBD) Páramo Manglar Vegetación anegada
No Natural	Pasto arbolados Cultivos Urbano y Residencias

Fuente: Elaboración propia

Con la agrupación en natural y no natural, se excluyeron las áreas protegidas bajo propiedad del estado como son las categorías de parques nacionales y reserva Biológica (mapa 1), lo cual se justifica por que los procesos de alteración y fragmentación son mínimos, así mismo generarían un sesgo, aparte que el objetivo de este índice es analizar los patrones de fragmentación/conectividad de la cobertura boscosa, el cual se centra en espacios con una fuerte actividad antrópica, que se aglutina fuera de estas áreas. Definida la estructura del paisaje, se procedió a realizar por cada cantón la estimación de los índices de paisaje considerando elementos como: tipo de cobertura, número de fragmentos, tamaño medio y distancia de vecindad de las coberturas naturales, aplicando la extensión PATCH ANALYST del software ArcGis para el cálculo de variables. Por otra parte, la escala de las imágenes utilizadas permitió la identificación de las coberturas comprendidas en la tabla 1, mismas que fue identificadas por Morera y Sandoval, (2016). Además, se modificó la ecuación de fragmentación/conectividad aplicada por Vargas (2008) a nivel de cada cantón donde la original era:

$\frac{IF: SPTA}{Nm * (\sum Sm / Dm)}$	<p>Dónde: <i>IF</i>: Índice de Fragmentación/ Conectividad <i>SPTA</i>: superficie total del área del cantón. <i>Nm</i>: número total de fragmentos con cobertura natural. <i>Sm</i>: Superficies de fragmentos con cobertura natural. <i>Dm</i>: Distancia media de los fragmentos de cobertura natural medidas desde el centro de cada uno.</p>
<p>Modificada</p> $\frac{IF: SPTA * 100}{Sm / (\sum Nm * Dm)}$	

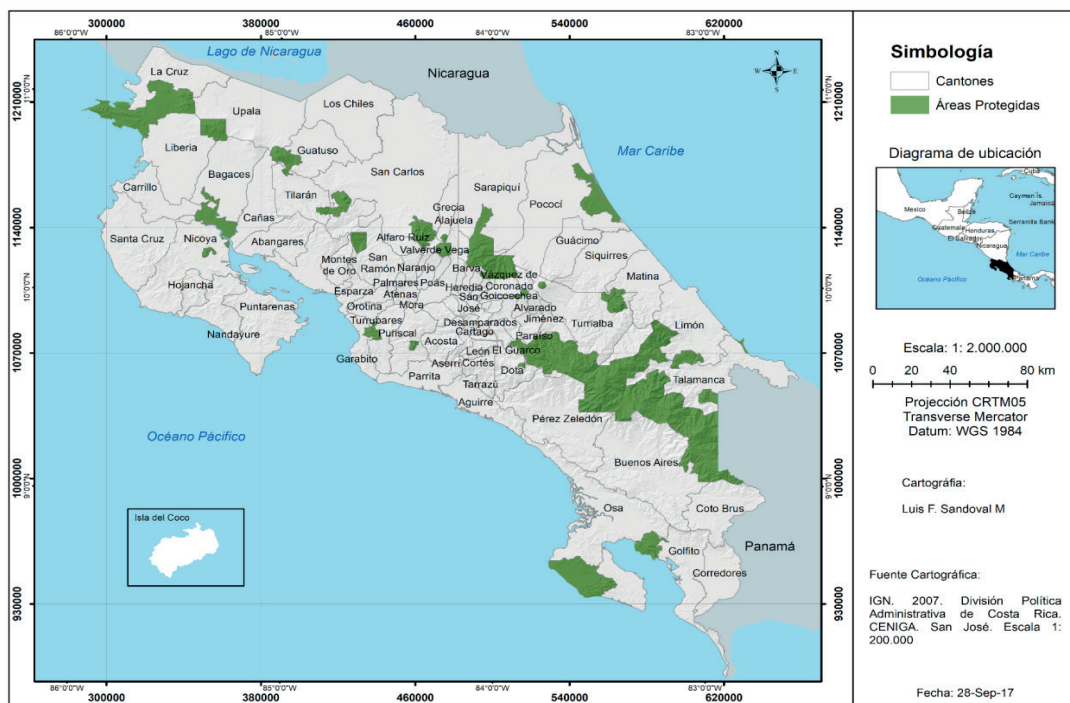
Los datos obtenidos a partir de la aplicación de la fórmula para cada cantón, se clasificaron en 3 clases (tabla 3) basada en la experiencia de otras investigaciones realizadas como Morera y Sandoval, (2013); Morera, y Sandoval, (2015) y Morera y Sandoval, (2016). La nivel bajo que tiene un rango de 0.00 a 3:00 y que se caracteriza por procesos mínimos de fragmentación, el nivel moderado que presenta valores entre 3.01 y 15:00 con un procesos medios de fragmentación y conectividad; y el alto que se caracteriza con valores de más 15:01 dominado por procesos intensos de fragmentación de los ecosistemas naturales.

Tabla 3. Rangos y valores del Índice de Fragmentación/Conectividad

Rango de Índice de Fragmentación/Conectividad	Valores del Índice de Fragmentación/Conectividad	Característica ecológica
Bajo	0.00- 3.00	Mínimos procesos de fragmentación.
Moderado	3.01 – 15.00	Procesos de fragmentación moderados
Alto	Más de 15.01	Altos procesos de fragmentación

Fuente: Elaboración propia.

Mapa 1. Áreas protegidas excluidas (Parque Nacionales y Reservas Biológicas)



Análisis de Resultados

Coberturas de uso de la tierra a nivel nacional

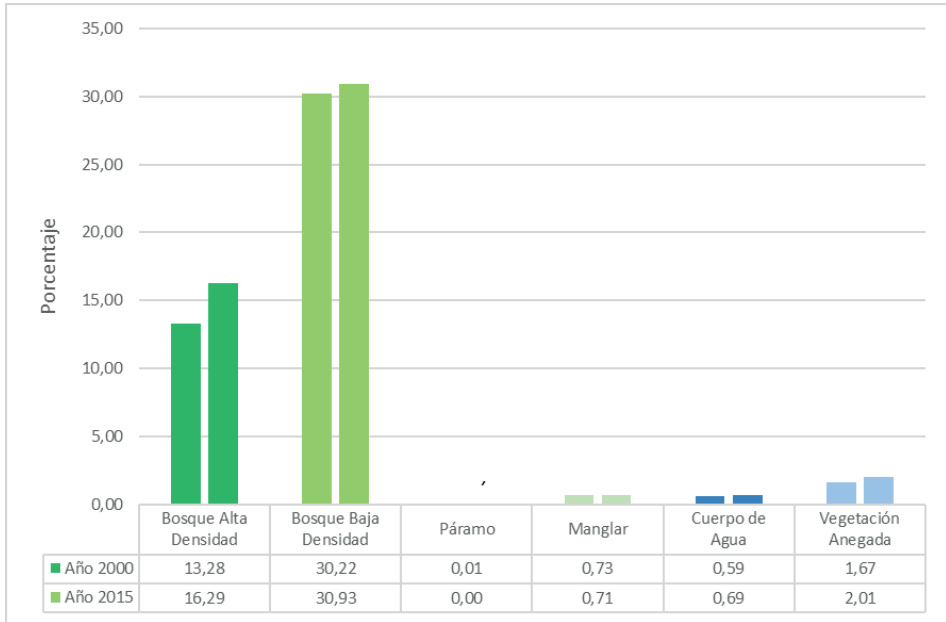
El gráfico 1, muestra la distribución de la cobertura de uso de la tierra para Costa Rica en el periodo 2000 – 2015. Donde se evidencia una recuperación de la cobertura boscosa, clasificada en alta densidad siendo 13% en el 2000 y 16% en el 2015, mientras que el bosque de baja densidad incremento en 0.7% y la vegetación anegada aumento su superficie en 0.35% durante este periodo (mapa 2 y mapa 3). Estas condiciones corroboran la tendencia de recuperación que presenta la cobertura boscosa en Costa Rica, la cual ha permitido al país remontar sus altas tasas de deforestación y ser el único país en condiciones tropicales que se presenta un proceso de recuperación como lo muestran estudios más recientes del Fondo de Financiamiento Forestal de Costa Rica (FONAFIFO), 2012).

Esta recuperación a nivel nacional de acuerdo al Estado de la Nación (sf), es producto de la combinación de factores en los que se destaca la disminución de mercados internacionales de carne y el impacto positivo del pago de servicios ambientales (PSA), las cuales representaron un 18% de la cobertura forestal en el periodo 1997 – 2005. No obstante, aunque se evidencia el aumento en la superficie de los bosques secundarios, la tala con fines agrícolas es continúa ya que algunos agricultores evitan la regeneración del bosque porque no desean perder la oportunidad de utilizar su tierra para la agricultura (FAO, 2016). De acuerdo con Morera y Sandoval (2013), las condiciones económicas y ecológicas, durante los últimos años, han transformando el comportamiento histórico de la cobertura boscosa del país, lo cual ha revertido las tasas de deforestación, hasta incrementar sus superficies forestales. El proceso anterior ha favorecido el surgimiento de paisajes salpicados con una alta presencia de conectividad ecológica (más de 60% en cobertura boscosa), donde se superan algunos limitantes de fragmentación.

Sin embargo, las interrogantes que emergen son, valorar sí la restauración es igual para todos los ecosistemas naturales y cuál es la calidad de estos ecosistemas restaurados, (Morera y Sandoval, 2016). Si bien los estudios realizados por Calvo, Watson, Bolaños, Quesada, Sánchez, Gonzáles y Ramírez (1999) muestran la tendencia hacia la recuperación de la

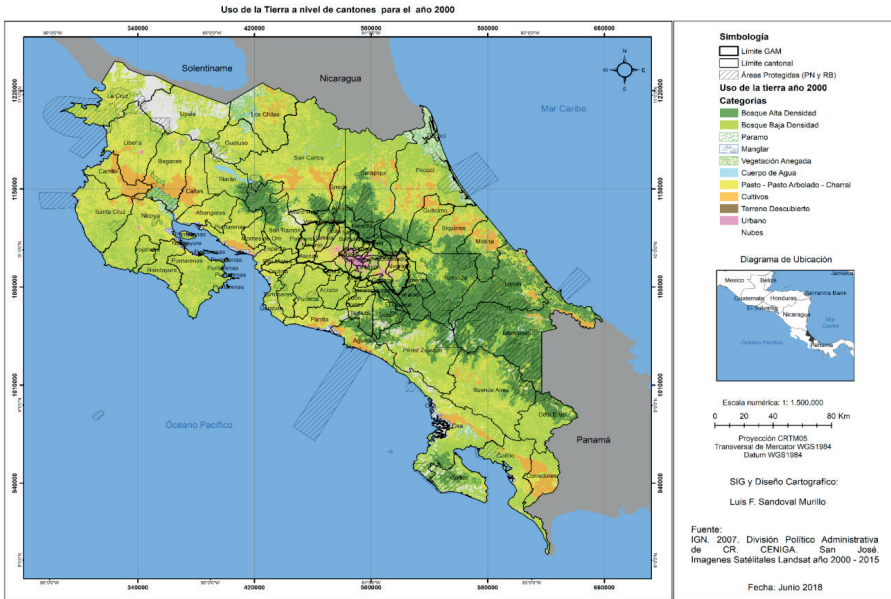
cobertura natural en el país, existen coberturas de uso de la tierra como los manglares que evidencian el decrecimiento de su superficie para el periodo 2000 – 2015, donde se reflejó una reducción de su superficie del 0.02% (682 ha) (Gráfico 1). Asociado a los procesos de cambios de uso de la tierra por actividades antrópicas como la construcción de puertos, hoteles y tala de la cobertura natural para su transformación a usos agrícolas y pastizales generan daños irreversibles en estos ecosistemas (Zamora y Cortés, 2009).

Gráfico 1. Costa Rica: Cobertura natural del uso de la tierra periodo 2000 - 2015

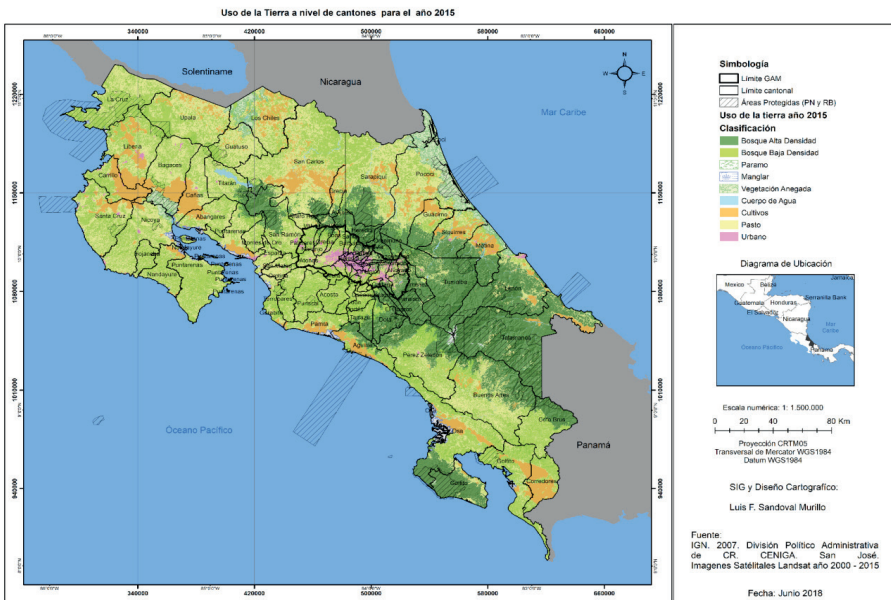


Fuente: Elaboración propia a partir de coberturas de uso de la tierra 2000 y 2015.

Mapa 2. Costa Rica: Uso de la tierra por cantones año 2000



Mapa 3. Costa Rica: Uso de la tierra por cantones año 2015



Aplicabilidad de índices biométricos por cantón

Los resultados de la ecuación del Índice de Fragmentación/ Conectividad para cada uno de los cantones muestran que a medida que aumenta el valor se incrementa el grado de fragmentación y decrece la conectividad de las coberturas naturales. En cantones con niveles mayores de 15.01 (Alta Fragmentación) donde se ubican 24 (29.6 %) de los 81 cantones con cobertura natural escasa en el año 2000, dominados por dinámicas rurales son: Orotina, Limón, Grecia, Alajuela, Sarapiquí, Nicoya, Pococí, San Ramón, Puntarenas, Guatuso, Cañas. Carrillo, Talamanca, Los Chiles, Pérez Zeledón, Osa, Golfito, Santa Cruz, Liberia, Bagaces, Buenos Aires, San Carlos, Upala y La Cruz (Mapas 4 y 5). Para el año 2015, la categoría de alta fragmentación se reduce y solo 8 (9.9 %) cantones presentan esta característica: Los Chiles, Osa, Bagaces, Golfito, Pococí, Guatuso, San José, San Carlos y Buenos Aires (Anexo 1). Destaca que para el 2015 se mantienen un número significativo (87.5 %) de los cantones que estaban dentro de esta categoría durante el 2000 con dinámicas rurales donde predomina actividades asociadas a monocultivos y pastizales, sin embargo, se presenta un caso urbano, que es el cantón de San José, donde los procesos urbanos se intensifican reduciendo los escasos ecosistemas naturales de relictos.

En el año 2000, los siguientes 32 (39,5 %) cantones: Jiménez, Poás, El Guarco, Mora, Tarrazú, San Mateo, Heredia, Vázquez de Coronado, Dota, Coto Brus, Valverde Vega, Oreamuno, Turrubares, Aguirre, Nandayure, Alvarado, Matina. Garabito, Paraíso, Cartago, Corredores, Montes de Oro, Siquirres, Puriscal, Guácimo, Esparza, Alfaro Ruiz, Atenas, Abandares, Parrita, Tilarán y Turrialba; presentaron una fragmentación moderada, siendo todos los cantones de tipo rurales con excepción de Cartago y Heredia (Anexo 2). Para el 2015, los siguientes cantones presentaron una fragmentación moderada: El Guarco, Nandayure, Escazú, Tibás, Desamparados, Aguirre, Tibás, Desamparados, Aguirre, Esparza, Alajuela, Coto Brus, Santo Domingo, Curridabat, Grecia, Guácimo, Vázquez de Coronado, Corredores, Talamanca, San Ramón, Alfaro Ruiz, Alvarado, Limón, Cañas, Orotina, Matina, Puntarenas, Liberia, Tilarán, Paraíso, Turrialba, Santa Cruz, Siquirres, La Cruz, Oreamuno, Cartago, Upala, Pérez Zeledón, Nicoya y Sarapiquí, siendo 47 % (38 cantones), una tendencia que aumenta en 15 cantones (47 %) durante estos quince años de estudio.

La categoría de baja fragmentación con valores entre 0.00 y 3.00 para el año 2000 incluye a 25 (31 %) de los cantones de: Acosta, Alajuelita, Aserri, Barva, Belén, Curridabat, Desamparados, Escazú, Flores, Goicochea, Hojanca, La Unión, León Cortés, Montes de Oca, Moravia, Naranjo, Palmares, San Isidro, San José, San Pablo, San Rafael, Santa Ana, Santa Bárbara, Santo Domingo y Tibás, siendo la mayoría espacios dominados por dinámicas urbanas (Anexo 3). Para el 2015, el número de cantones se incrementa a 33 (41 %) siendo estos: Acosta, Alajuelita, Aserri, Barva, Belén, Dota, Flores, Garabito, Goicochea, Heredia, Hojanca, Jiménez, La Unión, León Cortés, Montes de Oca, Montes de Oro, Mora, Moravia, Naranjo, Palmares, Parrita, Poás, Puriscal, San Isidro, San Mateo, San Pablo, San Rafael, Santa Ana, Santa Bárbara, Santo Domingo, Tarrazú, Turubares, Tibás y Valverde Vega. La tendencia en incrementar el número de cantones es un indicador de reducción de los procesos de fragmentación en el país, lo cual tiene su asidero en espacios urbanos, donde el impacto antrópico sobre el paisaje es menor comparado con espacios rurales donde dominan algunos monocultivos como la piña y el banano con una concentración espacial mayor.

Incremento y reducción en el índice de fragmentación-conectividad 2000-2015

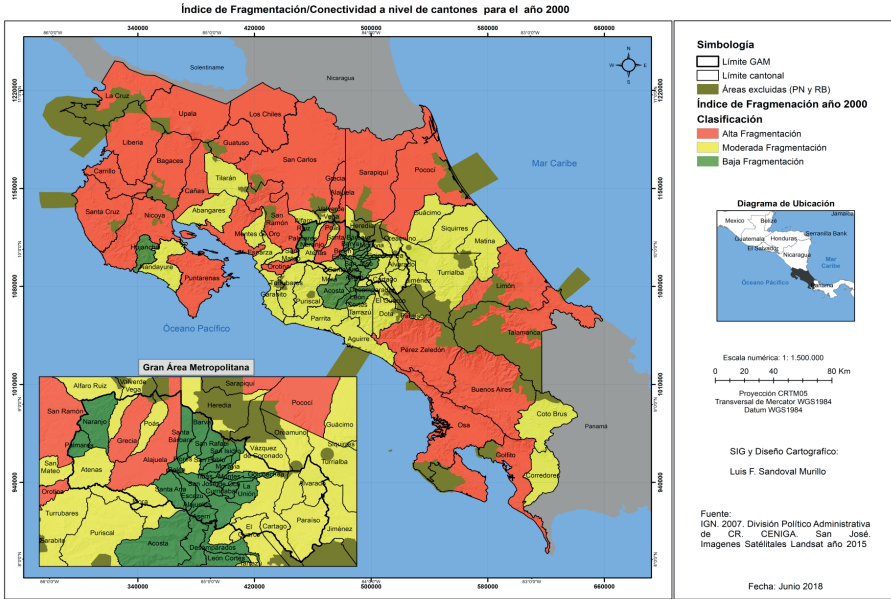
Comparando los resultados del 2000 y del 2015 se identifican que seis (7.4 %), de los cuales todos son cantones urbanos como: Curridabat, Desamparados, Escazú, Santo Domingo y Tibás, pasaron de una baja fragmentación a una moderada, mientras que San José fue el único cantón que paso de baja fragmentación a alta. Lo anterior se relaciona con los acelerados procesos de urbanización que presentan estos cantones, los cuales generan cambios en su cobertura eliminando las condiciones naturales para ser remplazadas por actividades urbanas (Tabla 4).

Por otro lado, ocho cantones mantuvieron sus procesos de alta fragmentación: Pococí, Guatuso, Los Chiles, Osa, Golfito, Bagaces, Buenos Aires y San Carlos, caracterizado por la presencia del cultivo de piña y palma africana, característica que se mantuvo durante los quince años de estudio. Mientras 18 (22.2%) cantones mantienen su condición de fragmentación moderada siendo estos: El Guarco, Vázquez de Coronado, Coto Brus, Oreamuno, Aguirre, Nandayure, Alvarado, Matina, Paraíso, Cartago,

Corredores, Siquirres, Guácimo, Esparza, Alfaro Ruiz, Abangares, Tilarán y Turrialba, los cuales combinan patrones de cantones rurales, urbanos y peri-urbanos. Asimismo, 19 (23.5 %) cantones mantuvieron la característica de baja fragmentación: El Guarco, Vázquez de Coronado, Coto Brus, Oreamuno, Aguirre, Nandayure, Alvarado, Matina, Paraíso, Cartago, Corredores, Siquirres, Guácimo, Esparza, Alfaro Ruiz, Abangares, Tilarán y Turrialba, que al igual que la anterior categoría combinan diferentes procesos tanto urbanos como rurales.

En cuanto a los cantones que redujeron sus niveles de fragmentación durante el periodo de estudio, 15 (18.5 %) pasaron de alta a moderada fragmentación siendo estos: Orotina, Limón, Grecia, Alajuela, Sarapiquí, Nicoya, San Ramón, Puntarenas, Cañas, Talamanca, Pérez Zeledón, Santa Cruz, Upala y La Cruz, caracterizados por ser espacios de dominio de procesos rurales. Únicamente, el cantón de Carrillo pasó de alta fragmentación a baja fragmentación, lo cual se puede deber al desarrollo turístico que valora más el paisaje natural, en relación con el dominio de actividades agro-productivas como ocurría anteriormente. En condición similar, los siguientes 14 (7.3 %) cantones: Jiménez, Poás, Mora, Tarrazú, San Mateo, Heredia, Dota, Valverde Vega, Turrubares, Garabito, Montes de Oro, Puriscal, Atenas y Parrita se transformaron de moderada a baja fragmentación.

Mapa 4. Costa Rica. Índice de Fragmentación/Conectividad a nivel de cantones para el año 2000



Mapa 5. Costa Rica. Índice de Fragmentación/Conectividad a nivel de cantones para el año 2015

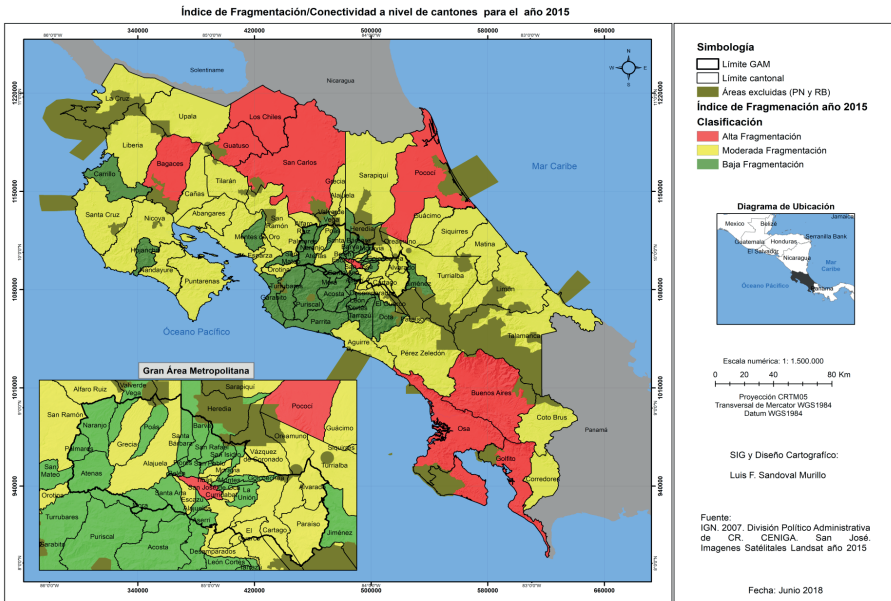


Tabla 4. Transformaciones del índice de fragmentación según cantones periodo 2000 – 2015

Cambios en el índice de fragmentación	Cantones
Alta Fragmentación – Moderada Fragmentación	Orotina, Limón, Grecia, Alajuela, Sarapiquí, Nicoya, San Ramón, Puntarenas, Cañas, Talamanca, Pérez Zeledón, Santa Cruz, Moderada, Upala y La Cruz.
Se mantuvo en Alta fragmentación	Pococí, Guatuso, Los Chiles, Osa, Golfito, Bagaces, Buenos Aires y San Carlos.
Alta fragmentación - Baja fragmentación	Carrillo
Moderada fragmentación - Baja fragmentación	Jiménez, Poás, Mora, Tarrazú, San Mateo, Heredia, Dota, Valverde Vega, Turrubares, Garabito, Montes de Oro, Puriscal, Atenas y Parrita.
Se mantiene en moderada	El Guarco, Vázquez de Coronado, Coto Brus, Oreamuno, Aguirre, Nandayure, Alvarado, Matina, Paraíso, Cartago, Corredores, Siquirres, Guácimo, Esparza, Alfaro Ruiz, Abangares, Tilarán y Turrialba.
Se mantiene en Baja Fragmentación	Acosta, Alajuelita, Aserrí, Barva, Belén, Flores, Goicoechea, Hojancha, La Unión, León Cortés, Montes de Oca, Moravia, Naranjo, Palmares, San Isidro, San Pablo, San Rafael, Santa Ana y Santa Bárbara.
Baja Fragmentación – Moderada Fragmentación	Curridabat, Desamparados, Escazú, Santo Domingo y Tibás.
Baja Fragmentación – Alta Fragmentación	San José

De acuerdo con lo expresado por Gurrutxaga y Lozano (2006) las principales tendencias que se generan en las dinámicas del paisaje rural en los últimos años son la reducción y fragmentación de hábitats naturales y la homogenización de los paisajes agro-pastoriles. Sin embargo, en el caso de Costa Rica, estos procesos se combinan con acelerados procesos de urbanización y expansión de monocultivos, así con el desarrollo concentrado de la actividad turística en espacios costeros. La tendencia se explica por el creciente desarrollo de las actividades como monocultivos, por ejemplo,

el cultivo de la piña, y de acuerdo con lo expresado por Valverde, Porras y Jiménez (2016) la expansión significativa de la producción piñera en Costa Rica se concentra en las siguientes regiones: Pacífico Sur, Caribe Norte y Zona Norte. Dicha expansión ha conducido a una modificación de realidades socio-ambientales: cambio paisajístico donde se instauran extensas regiones de un monocultivo. Generando cambios en el uso del suelo de miles de hectáreas que antes estaban destinadas a la protección del bosque y de mantos acuíferos. Asimismo, ha existido una invasión de las áreas de protección de ríos y manantiales (Acuña, 2006)

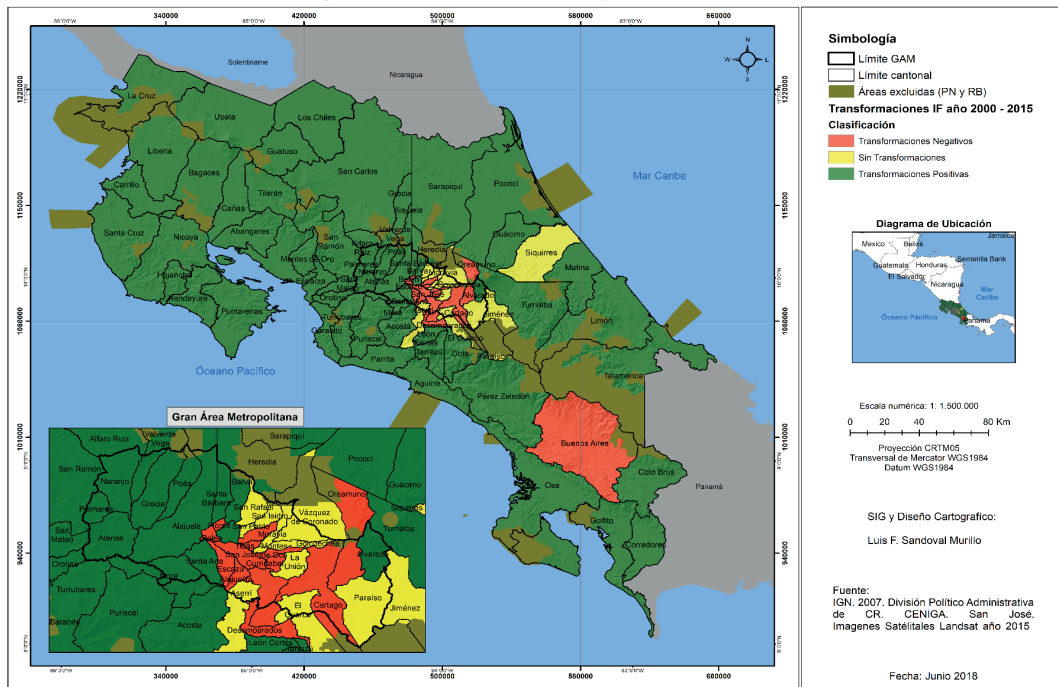
Conclusiones

En general, este artículo evidencia la recuperación de la cobertura natural durante las últimas décadas. Sin embargo, algunos cantones urbanos presentan un incremento de los procesos de fragmentación como: Curridabat, Desamparados, Escazú, Santo Domingo, Tibás y San José. Mientras otros cantones rurales como Pococí Guatuso, Los Chiles, Osa, Golfito, Bagaces, Buenos Aires y San Carlos, mantienen sus altos grados de fragmentación relacionado con la expansión de los monocultivos, especialmente, piña y palma africana.

La dinámica territorial asociada a las condiciones económicas en los últimos años ha generado transformaciones significativas en la estructura del paisaje natural, siendo los cantones con tendencias más urbanas los que presentaron transformaciones de índices de fragmentación/conectividad más negativa, lo cuales se localizan el Gran Área Metropolitana (GAM) (Mapa 6), los cuales se caracterizan por una concentración de actividades urbanas y a la eliminación de la coberturas naturales, debido a factores de crecimiento urbano. Los cambios de la sociedad costarricense de una sociedad rural a una urbana ha implicado dinámicas ambientales y sociales específicas que concentran los efectos antrópicos en los cantones que conforman el GAM. Además, continuando con este análisis comparativo entre 2000 y 2015, se identifica que fuera del GAM, dos cantones presentan patrones diferenciales. Por un lado, está el caso de Siquirres que mantuvo condiciones similares durante los dos años estudiados, mientras Buenos Aires, presentó condiciones negativas, relacionado con expansión del cultivo de piña.

Mapa 6. Costa Rica: Cambios en el Índice de Fragmentación/Conectividad a nivel de cantones para el año 2000 – 2015

Transformación en el índice de Fragmentación/Conectividad a nivel de cantones periodo 2000 - 2015



Referencias

- Acuña, G. (2006). Producción de piña en Caribe y Pacífico Sur de Costa Rica. *Ambientico, Revista mensual sobre la actualidad ambiental*, 158, 1-3. Heredia. Costa Rica, ISSN 1409-214X
- Ambrosio, G. González, J. y Arévalo, V. (s.f.). *Corrección radiométrica y geométrica de imágenes para la detección de cambios en una serie temporal*. Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Málaga.
- Calvo, A. y Ortiz, E. (2011). Fragmentación de la cobertura forestal en Costa Rica durante los periodos 1997-2000 y 2000-2005. En: *Revista Forestal Mesoamericana Kurù*, 9(22), 10-21.
- Calvo, J., Watson V., Bolaños, R., Quesada C., Sánchez, A, Gonzáles, P. y Ramírez, J. (1999). Estudio de la cobertura forestal de Costa Rica empleando imágenes Landsat 1986/1987 y 1996/1997. Documento

- presentado en el marco del *XI Congreso Agronómico Nacional y de Recursos Naturales*. San José, Costa Rica.
- Fondo de Financiamiento Forestal de Costa Rica (FONAFIFO). (2012). *Estudio de la Cobertura Forestal de Costa Rica 2009-2010*. En: <http://minae.go.cr/recursos/documentos/coberturas-forestal/estudio-cobertura-forestal-FONAFIFO-marzo-2012.pdf>.
- FAO. (2016). *La cubierta forestal se ha ampliado producto de prácticas agrícolas más sostenibles, la reversión de la deforestación y a los estrictos controles legales implementados*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Gurrutxaga, M. y Lozano, P. (2006). Efectos de la fragmentación de hábitats y pérdida de conectividad ecológica dentro de la dinámica territorial. Departamento de Geografía, Prehistoria y Arqueología. Universidad del País Vasco. Polígonos. *Revista de Geografía*, 16, 35-54
- Morera, C. (2010). Estructura del Paisaje y Desarrollo Turístico en la Fila Brunqueña, Costa Rica. En: *Revista Geográfica de América Central*, 44, 91-108.
- Morera, C. y Sandoval, L. (2013). Los procesos de fragmentación y la conectividad forestal en Costa Rica: Dos casos de estudios. En: *Geografía, Paisaje y Conservación. ECG - UNA*. (agregar número y páginas)
- Morera, C. y Sandoval, L. (2015). Aplicabilidad de indicadores de estructura de paisaje para evaluar transformaciones en escenarios tropicales. En: *Métodos y Técnicas Geográficas Aplicadas al Ambiente: Una Visión Latinoamericana*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México. EUNA, Heredia.
- Morera, C. & Sandoval, L. F. (2016). Evaluación de la cobertura boscosa en Costa Rica: un análisis a nivel de áreas de conservación en el año 2000. En *Revista Geográfica de América Central*, 56(2), 163-182.
- Liu, X., Li, X., Chen, Y., Tan, Z., Li, S. & Ai, B. (2010). A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data. In *Landscape Ecology*, 25, 671-682. <https://doi.org/10.1007/s10980-010-9454-5>
- Priego, A., Bocco, G., Mendoza, M. & Garrido, A. (2008). *Propuesta para la generación semi-automatizada de unidades de paisajes*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de

- Ecología Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental Universidad Nacional Autónoma de México. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat México.), México D.F.
- Salas, S. y Durán, A. (2015). Caracterización del uso del suelo en las principales áreas agrícolas de la Gran Área Metropolitana (GAM) de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 39(1). San Pedro de Montes de Oca.
- Sánchez, A., Foley, S., Hamilton, S., Calvo, C., Arroyo, P. y Jiménez, V. (2002). *Estudio de Cobertura Forestal de Costa Rica imágenes Landsat TM/ para el año 2000*. Centro Científico Tropical. San José, Costa Rica.
- Vargas, G. (2008). Fragmentación y conectividad de ecosistemas en el sector del proyecto geotérmico Miravalles y sus alrededores. 19752007. En *Revista Reflexiones*, 87(2), 9-38.
- Valverde, K., Porras, M. y Jiménez, A. (2016). La expansión por omisión: Territorios piñeros en los cantones Los Chiles, Upala y Guatuso, Costa Rica (2004 -2015. *Vigésimo Segundo informe estado de la nación en desarrollo humano sostenible*. San José. Costa Rica.
- Veldkamp, A. & Fresco, L. O. (1996). CLUE-CR: an integrated multi-scale model to simulate land use change scenarios in Costa Rica. *Ecological modelling*, 91(1), 231-248.
- Zamora, P. y Cortés, J. (2009). Los manglares de Costa Rica: el Pacífico Norte. *Revista Biología Tropical*, 57(3), 473-488. ISSN-0034-7744

Anexos

Anexo 1. Alta fragmentación por cantones para 2000 y 2015

Alta fragmentación año 2000					
Cantón	Área del Cantón	Cobertura Natural	Número de Fragmentos	Vecino más Cercano	Índice de Fragmentación
Orotina	14559.65	3074.59	293	1.16	16.05
Limón	176767.30	99946.70	1135	0.85	16.97
Grecia	39734.22	15957.65	705	0.98	17.26
Alajuela	39143.60	15413.69	697	1.02	18.04
Sarapiquí	214551.94	134350.28	1428	0.82	18.68
Nicoya	133925.18	63725.59	1175	0.88	21.75

Alta fragmentación año 2000					
Cantón	Área del Cantón	Cobertura Natural	Número de Fragmentos	Vecino más Cercano	Índice de Fragmentación
Pococí	238729.19	135166.26	1570	0.79	21.82
San Ramón	102072.92	59697.48	1340	0.96	21.91
Puntarenas	181929.30	99921.02	1472	0.88	23.69
Guatuso	75972.21	27098.81	924	0.95	24.66
Cañas	69082.22	14348.35	580	0.91	25.46
Carrillo	59940.75	12307.47	644	0.82	25.63
Talamanca	281639.91	94532.64	939	0.92	25.65
Los Chiles	133713.28	67465.57	1448	0.93	26.79
Pérez Zeledón	190091.42	103264.41	1694	0.88	27.40
Osa	189016.51	100732.89	1767	0.83	27.48
Golfito	174995.00	76383.99	1463	0.85	28.51
Santa Cruz	132084.12	56936.24	1351	0.94	29.55
Liberia	144306.62	38798.94	1033	0.87	33.56
Bagaces	127848.72	25776.06	1150	0.82	47.03
Buenos Aires	238324.60	125936.99	2771	0.90	47.16
San Carlos	335067.58	163081.89	2788	0.83	47.48
Upala	158328.82	41078.85	1563	0.89	53.64
La Cruz	138745.41	17615.32	839	0.87	57.27
Alta fragmentación año 2015					
Cantón	Área del Cantón	Cobertura Natural	Numero de Fragmentos	Vecino más Cercano	Índice de Fragmentación
Los Chiles	133713.28	59018.29	706	0.97	15.49
Osa	189016.51	118380.21	1606	0.64	16.45
Bagaces	127848.72	38721.98	678	0.75	16.77
Golfito	174995.00	87090.73	1357	0.69	18.82
Pococí	238729.19	110323.04	1061	0.84	19.36
Guatuso	75972.21	23720.02	612	1.03	20.25
San José	4474.38	168.81	126	0.67	22.49
San Carlos	335067.58	126030.77	1841	0.91	44.54
Buenos Aires	238324.60	128840.93	4272	0.79	62.15

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2. Fragmentación Moderada por cantones para 2000 y 2015

Moderada fragmentación año 2000					
Cantón	Área Cantón	Cobertura Natural	Numero de Fragmentos	Vecino más Cercano	Índice de Fragmentación
Jiménez	25068.48	15375.25	205	0.93	3.10
Poás	7441.07	3478.32	146	1.02	3.18
El Guarco	17285.46	9737.35	198	0.99	3.48
Mora	16364.88	8351.73	192	0.95	3.56
Tarrazú	29272.64	19899.69	298	0.88	3.87
San Mateo	12405.39	4652.43	151	1.00	4.02
Heredia	28291.82	9928.80	185	0.81	4.26
Vázquez de Coronado	22390.71	11405.52	278	0.91	4.99
Dota	40395.32	26634.35	370	0.91	5.11
Coto Brus	94267.04	62957.29	548	0.76	6.20
Valverde Vega	13685.42	6135.05	288	0.99	6.35
Oreamuno	20189.74	8671.04	307	0.90	6.45
Turrubares	41582.03	21290.01	373	0.91	6.63
Aguirre	55673.49	27970.81	397	0.86	6.80
Nandayure	56540.07	30815.07	463	0.91	7.72
Alvarado	7959.31	2061.34	197	1.05	8.02
Matina	77098.21	44774.61	637	0.84	9.17
Garabito	31331.12	11419.52	329	1.03	9.29
Paraíso	47737.64	12849.32	264	0.97	9.51
Cartago	27765.05	10901.38	360	1.04	9.52
Corredores	62467.34	18337.84	426	0.72	10.38
Montes de Oro	24806.23	10055.27	403	1.05	10.47
Siquirres	85481.31	45754.80	696	0.83	10.81
Puriscal	55607.57	24906.68	584	0.92	12.05
Guácimo	58031.35	32423.13	732	0.95	12.43
Esparza	21807.08	6397.83	353	1.15	13.82
Alfaro Ruiz	15772.14	3800.38	309	1.09	13.95
Atenas	12646.65	3510.96	323	1.20	13.98
Abangares	64453.77	26214.30	609	0.94	14.10
Parrita	47737.24	15573.64	468	1.00	14.34

Tilarán	66755.25	28369.42	630	1.01	15.03
Turrialba	158749.68	96723.63	1227	0.77	15.59
Moderada fragmentación año 2015					
Cantón	Área Cantón	Cobertura Natural	Numero de Fragmentos	Vecino más Cercano	Índice de Fragmentación
El Guarco	17285.46	10274.69	238	0.77	3.06
Nandayure	56540.07	34914.58	247	0.77	3.08
Escazú	3455.27	1077.39	119	0.87	3.31
Tibás	833.72	56.37	29	0.84	3.61
Desamparados	11939.62	7156.94	313	0.77	4.02
Aguirre	55673.49	33354.81	451	0.55	4.15
Esparza	21807.08	8425.93	155	1.04	4.17
Alajuela	39143.60	19612.93	225	0.94	4.21
Coto Brus	94267.04	70708.76	549	0.63	4.60
Santo Domingo	2522.20	1067.28	203	0.97	4.65
Curridabat	1619.50	228.35	71	0.97	4.90
Grecia	39734.22	17583.64	267	0.83	5.00
Guácimo	58031.35	32908.99	390	0.77	5.26
Vázquez de Coronado	22390.71	11134.62	296	0.93	5.51
Corredores	62467.34	24504.54	450	0.50	5.73
Abangares	64453.77	31663.84	348	0.86	6.06
Talamanca	281639.91	97896.67	379	0.57	6.18
San Ramón	102072.92	62517.80	475	0.80	6.20
Alfaro Ruiz	15772.14	5457.04	233	0.95	6.41
Alvarado	7959.31	4176.13	405	0.86	6.61
Limón	176767.30	102407.59	802	0.52	7.13
Cañas	69082.22	19522.29	263	0.79	7.37
Orotina	14559.65	2890.75	163	0.95	7.81
Matina	77098.21	49639.17	1052	0.50	8.15
Puntarenas	181929.30	112860.27	645	0.79	8.22
Liberia	144306.62	46978.46	344	0.80	8.41
Tilarán	66755.25	30086.82	403	0.97	8.70
Paraíso	47737.64	14677.37	395	0.72	9.22

Turrialba	158749.68	104552.08	1302	0.48	9.55
Santa Cruz	132084.12	60995.77	522	0.90	10.14
Siquirres	85481.31	46741.57	930	0.62	10.56
La Cruz	138745.41	38867.79	378	0.85	11.43
Oreamuno	20189.74	9657.97	630	0.88	11.60
Cartago	27765.05	12004.52	562	0.90	11.64
Upala	158328.82	66135.24	571	0.87	11.87
Pérez Zeledón	190091.42	131773.75	1311	0.63	11.89
Nicoya	133925.18	63593.76	699	0.92	13.61
Sarapiquí	214551.94	100028.63	679	0.98	14.23

Fuente: Elaboración propia

Anexo 3. Baja fragmentación para los cantones para los años 2000 y 2015.

Baja fragmentación año 2000					
Cantón	Área Cantón	Cobertura Natural	Numero de Fragmentos	Vecino más Cercano	Índice de Fragmentación
Acosta	34166.59	23190.17	180	0.66	1.76
Alajuelita	2148.24	1012.37	25	0.93	0.49
Aserrí	16689.52	10299.31	155	0.87	2.18
Barva	5599.31	3065.08	101	1.04	1.93
Belén	1245.76	82.62	8	0.38	0.45
Curridabat	1619.50	312.78	14	0.96	0.69
Desamparados	11939.62	6344.69	178	0.87	2.91
Escazú	3455.27	1084.11	57	0.90	1.63
Flores	674.22	100.94	7	0.84	0.39
Goicoechea	3164.96	1319.84	104	0.80	2.00
Hojancha	26255.28	16014.06	235	0.77	2.98
La Unión	4443.88	2554.86	63	1.16	1.27
León Cortés	12246.18	6740.97	159	0.98	2.83
Montes de Oca	1555.47	427.64	19	1.04	0.72
Moravia	2911.56	954.80	63	1.04	2.00
Naranjo	12687.08	6796.32	172	0.80	2.56
Palmare	3883.52	1649.48	80	1.07	2.01

San Isidro	2646.70	1028.69	90	1.05	2.43
San José	4474.38	295.17	17	0.24	0.62
San Pablo	833.17	172.86	13	1.11	0.69
San Rafael	4804.91	3008.66	114	0.95	1.73
Santa Ana	6135.24	2524.81	98	0.99	2.35
Santa Bárbara	5201.61	3336.03	148	1.06	2.44
Santo Domingo	2522.20	945.28	55	0.92	1.35
Tibás	833.72	98.60	17	0.97	1.39
Baja fragmentación año 2015					
Cantón	Área Cantón	Cobertura Natural	Numero de Fragmentos	Vecino más Cercano	Índice de Fragmentación
Carrillo	59940.75	20341.18	120	0.71	2.50
Acosta	34166.59	28372.69	56	0.61	0.41
Alajuelita	2148.24	1009.66	90	0.92	1.77
Aserrí	16689.52	13111.58	164	0.62	1.29
Barva	5599.31	3995.12	31	0.88	0.38
Belén	1245.76	93.43	17	0.68	1.55
Flores	674.22	42.89	14	0.69	1.53
Goicoechea	3164.96	1349.81	98	1.03	2.37
Hojancha	26255.28	18028.32	151	0.71	1.57
La Unión	4443.88	2232.48	135	0.84	2.26
León Cortés	12246.18	10582.27	104	0.57	0.68
Montes de Oca	1555.47	532.27	79	1.12	2.59
Moravia	2911.56	1250.62	107	0.89	2.22
Naranjo	12687.08	9795.40	39	0.57	0.29
Palmares	3883.52	2573.56	20	0.71	0.21
San Isidro	2646.70	1280.60	114	0.85	2.01
San Pablo	833.17	268.02	49	1.02	1.55
San Rafael	4804.91	3334.26	97	0.73	1.02
Santa Ana	6135.24	2770.61	45	1.10	1.10
Santa Bárbara	5201.61	4090.54	68	1.01	0.88
Atenas	12646.65	6149.83	52	1.00	1.07
Dota	40395.32	34358.84	94	0.76	0.84
Garabito	31331.12	16206.95	149	0.88	2.53

Heredia	28291.82	10257.76	134	0.80	2.94
Jiménez	25068.48	16702.86	237	0.60	2.14
Montes de Oro	24806.23	14646.60	143	0.76	1.85
Mora	16364.88	13401.53	27	0.98	0.32
Parrita	47737.24	24397.97	205	0.72	2.88
Poás	7441.07	4837.84	47	0.71	0.51
Puriscal	55607.57	40181.57	178	0.42	1.04
San Mateo	12405.39	5706.08	71	1.02	1.58
Tarrazú	29272.64	26785.17	82	0.71	0.63
Turrubares	41582.03	27709.84	154	0.62	1.43
Valverde Vega	13685.42	6445.50	103	0.88	1.93

Fuente: Elaboración propia



Recurrencia de sismos en el Valle Central de Costa Rica

Recurrence of Earthquakes in the Central Valley of Costa Rica

Ronnie Quintero-Quintero¹

Hernán Porrás-Espinoza²

Universidad Nacional, Costa Rica

Resumen

En los periodos 1910-1912, 1951-1955 y 1990-1993 se localizaron en el Valle Central de Costa Rica sismos superficiales importantes, por su magnitud y daños causados en la población, estructura y paisaje. La recurrencia de estos sismos es de aproximadamente cada 40 años y sucedieron entre 7 y 10 años, después de haber ocurrido los sismos mayores de subducción de 1904, 1941 y 1983 en la Península de Osa. En la zona central del país, también han ocurrido sismos esporádicos con magnitud de moderada a fuerte y que han causado daños. Por ejemplo, el sismo de Orotina de 1924, Pérez Zeledón de 1983, de Cinchona 2009 y Capellades del 2016. Si consideramos todos los sismos más importantes que han ocurrido en el interior de la parte central del país desde inicios del siglo XX y que han causado daños en el Valle Central; el período de recurrencia es de 21 años y la probabilidad de que el próximo se presente antes del 01/01/2038; 21 años después de haber ocurrido el sismo de Capellades el 01/12/2016, es mayor a 0.86 con un intervalo de confiabilidad del 95% de [0.71, 0.98].

Palabras clave: Valle Central, sismos, recurrencia, probabilidad condicional

Abstract

During the periods 1910-1912, 1951-1955, and 1990-1993, due to the magnitude and the damage caused to the population, structure, and landscape, important surface earthquakes were located in the Central Valley of Costa Rica. The recurrence of these earthquakes is approximately 40 years and

1 Académico, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. Correo electrónico: rquinter@una.cr

2 Académico, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. Correo electrónico: porrashernan@gmail.com

Este artículo corresponde a la ponencia presentada en el I Congreso Centroamericano de Ciencias de la Tierra y el Mar, realizado en el Hotel Aurola Holiday Inn en San José, Costa Rica, del 13 al 16 de noviembre de 2017.

happened between seven and ten years, after the major subduction earthquakes of 1904, 1941, and 1983 in the Osa Peninsula. In the central region of the country, sporadic earthquakes have also occurred, with moderate to strong magnitude, and have caused damages, such as the Orotina earthquake in 1924, Pérez Zeledón in 1983, Cinchona in 2009 and Capellades in 2016. If we consider all the most important earthquakes that have occurred in the interior of the central part of the country since the beginning of the 20th century and that have caused damage in the Central Valley, the recurrence period is 21 years and the probability that the next one will occur before January 1, 2038, 21 years after the Capellades earthquake on December 1, 2016, is greater than 0.86 with a 95% confidence interval [0.71, 0.98].

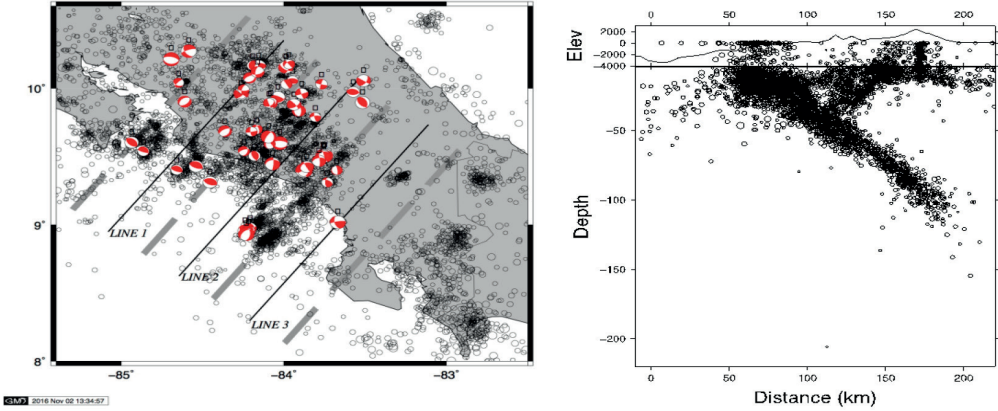
Keywords: Central Valley, earthquakes, recurrence, conditional probability

Introducción

El estudio sísmico que por 34 años ha realizado la red del OVSI-CORI-UNA (Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica – Universidad Nacional) en el país, nos indica que además de los sismos mayores y fuertes del tipo subducción a lo largo de la costa Pacífica de Costa Rica; tenemos sismicidad en la parte central del país que se presenta con sismos esporádicos moderados o fuertes; como los sismos de Cinchona del 2009 y el de Capellades del 2016, y otros que se dan agrupados en el tiempo (ver Tabla I y Figura 1). La sismicidad al interior del país es controlada e inducida por los sismos de subducción del Pacífico costarricense, tal y como lo sugiere el modelo de *sliver motion* propuesto para el noroeste (NW) de Costa Rica (Montero et al., 2017).

Los hipocentros de los sismos registrados en la zona central del país muestran sismicidad en la placa continental desde el antearco hasta el trans-arco, con profundidades que llegan hasta la base de la corteza; la sismicidad muestra la existencia de una zona en el antearco, asociada al promontorio de Herradura, donde la sismicidad es poca o nula (ver Figura 1). Esta zona de sismicidad en la parte central del país se conoce como Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (Marshall, 2000).

Figura 1. Mapa que muestra los epicentros de sismos en Costa Rica; registrados por la red del OVSICORI-UNA desde el 2010 hasta finales del 2017 (Figura de la izquierda).



Fuente: OVSICORI-UNA, 2010-2017

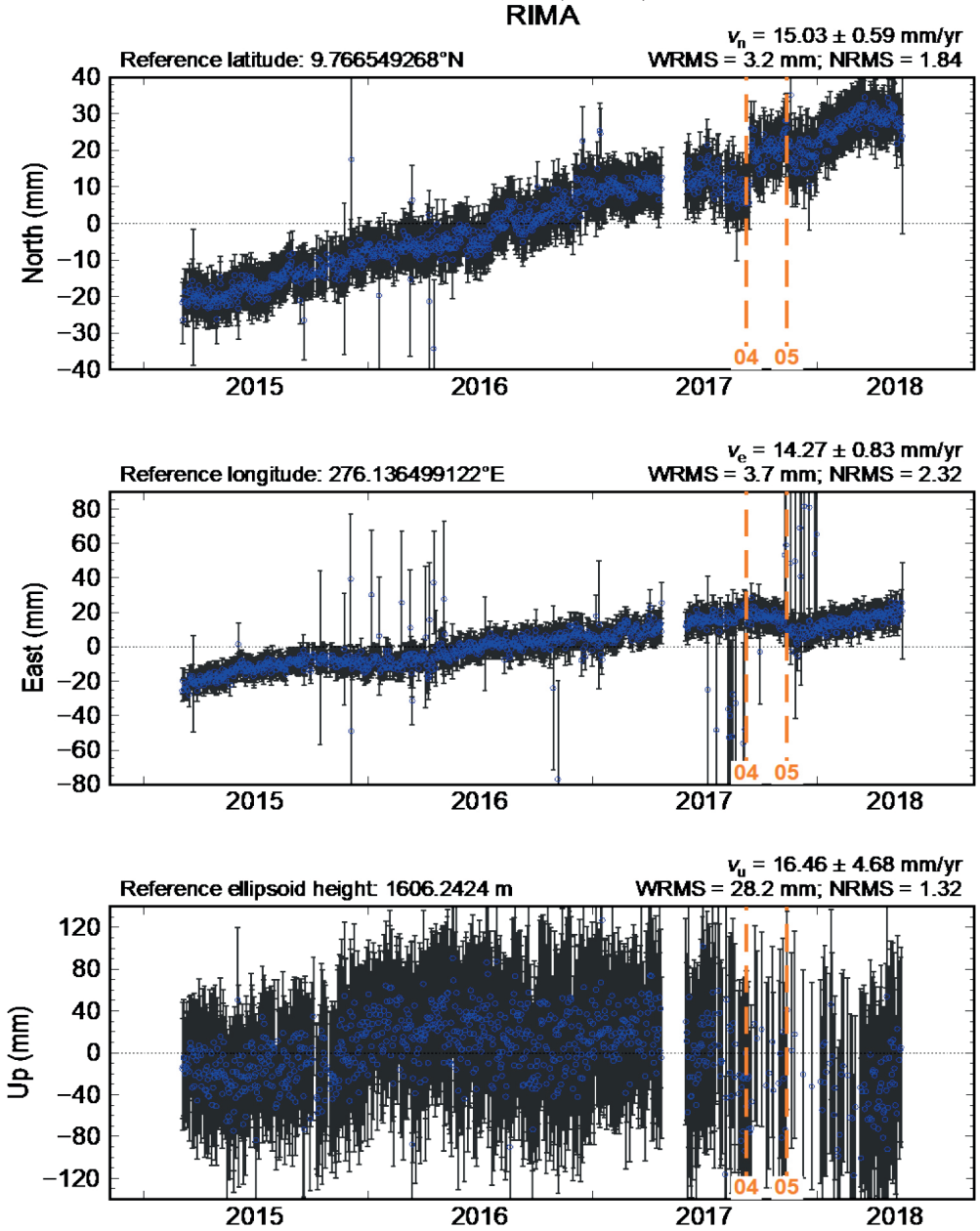
Los mecanismos focales se muestran por medio de esferas de color rojo y la proyección de la falla en el hemisferio inferior de la esfera focal. A la derecha, se muestra la proyección de estos sismos en la Línea 1; el eje de coordenada del gráfico muestra dos medidas, una en metros y la otra en km; desde la superficie hasta 4 km debajo del nivel del mar está dada en metros y de ahí hacia abajo en km. Los sismos proyectados son los que se encuentran entre las dos líneas grises y extremas del mapa epicentral. Los sismos en ambas figuras se representan por círculos no rellenos de color negro y con tamaño acorde a su magnitud.

La recurrencia de los sismos moderados y fuertes que se localizan al interior de la placa continental y que han afectado el Valle Central del país, es el tema de estudio en este trabajo. Queremos dar respuesta a las interrogantes: ¿cuándo ocurren los sismos destructivos en el Valle Central? como los de Cartago de 1910, y ¿cuál es la probabilidad de que ocurra un nuevo sismo que cause daños en la zona central del país después de haber ocurrido el sismo de Capellades del 2016? ¿están relacionados los sismos destructivos en el Valle Central con los sismos mayores de subducción que ocurren bajo la Península de Nicoya o la de Osa? Para tratar de contestar

esas preguntas, recurrimos a los catálogos sísmicos que existen a nivel local y global.

Para Costa Rica, se conoce que la velocidad de convergencia de la placa del Coco, respecto al Bloque de Panamá, es de 8-9 cm/a, con una dirección de convergencia de 20°-30° desde el norte (De Mets et al., 2010). La velocidad al interior del país es mucho menor, comparada con la velocidad de convergencia Coco - Bloque de Panamá y es de ~2.07 cm/a y con una dirección de 43.5° en la estación de río Macho, Orosí, Cartago (RIMA); como se puede ver en la Figura 2, que muestra la velocidad en las componentes norte, este y vertical de esa estación. Para una falla como la que generó el terremoto de Cartago de 1910, cercana al sitio de RIMA; si consideramos un sismo característico de magnitud 6.4 y que la tasa promedio de desplazamiento de la falla sea de ~.5 cm a⁻¹; el período de recurrencia es mayor a los 100 años.

Figura 2. Serie de tiempo para la componente norte, este y vertical de la estación continua de GPS (CGPS), RIMA.



Se indica la velocidad norte V_n , velocidad este V_e y velocidad vertical V_u (milímetro/año). La figura muestra algunos huecos donde la estación CGPS no trabajó. La ubicación de la estación está indicada por latitud, longitud y altura en la parte de arriba e izquierda del gráfico.

Período de recurrencia

Haciendo uso de los catálogos sísmicos para el país (ver Tabla I); podemos decir que, desde que hay información más confiable de éstos a partir del siglo XX; varios sismos destructivos localizados en el Valle Central se han presentado en forma de ciclos sísmicos. Estos ciclos se han presentado de 1910 a 1912, con varios terremotos al interior, siendo el más dañino el de Cartago; luego está el segundo ciclo del siglo XX, que se da entre los años del 1951 a 1955, y el tercero entre los años 1990 a 1993 (Protti et al., 2001).

Tabla I. Sismicidad Histórica de Costa Rica. Las intensidades están dadas en la escala Mercalli Modificada (MM). AAAA/MM/DD se refiere a año, mes y día; HH:MI:SEC a la hora en que ocurrió el sismo (hora UTC) y MAG a la magnitud.

AAAA/MM/DD	HH:MI:SE	MAG	Ubicación	Característica
1900/06/21	20:52:00	7.1	17.4 km sur de Nicoya, Guanacaste	Precedido por sismos menores. Causó daños generalizados en Guanacaste. Daños en la iglesia de Filadelfia y en los techos de varias casas de ese pueblo. Daños menores en Nicoya, La Cruz y Puntarenas. Daños en la iglesia de Rivas, Nicaragua
1904/12/20	05:44:18	7.5	En zona sur de Costa Rica	El área donde se reporta el sismo se extendió más allá de los límites del país. $M_0 = 2.3 \times 10^{27}$ dyne-cm. Causó pequeños daños en San José, Sentido VII en Bocas del Toro, David, Bugaba, todos de Panamá; en Limón y Coto, Costa Rica. Localización $8.7^\circ N, 83.6^\circ W$

AAAA /MM/DD	HH:MI:SE	MAG	Ubicación	Característica
1910/04/13	18:37:00.0	5.8	Sur este de San José. (Tablazo)	Sismo violento, sentido en el Valle Central, principalmente en Cartago y San José. Objetos caídos en casas y tiendas. Daños producto de deslizamientos. Seguido de muchas réplicas. Intensidad de IX en Coralillo, Cartago.
1910/05/05	00:50:00.0	6.4	Cartago	Segunda destrucción de Cartago, reportan 600 fallecidos; la primera destrucción fue en 1841. Reportes de daños también en San José, Heredia, San Rafael, Tarrazú y Orosí. Intensidad máxima de VII en Cartago Centro. Se considera que el sismo estuvo asociado a la falla de Aguacaliente, ubicada en Cartago.
1911/08/29	04:06:00.0	5.8	Bajos del Toro, Valverde Vega, Alajuela	Daños en casas de Toro Amarillo, daños menores en Grecia y Alajuela. Sentido fuerte en San José, pero sin reportes de daños. Numerosos deslizamientos cercanos al Volcán Poás. Región epicentral se estimó a 6-9 km NO del cráter del Volcán Poás. Intensidades de IX en Toro Amarillo, VII en Naranjo y Grecia, VI en Alajuela y V en San José.
1912/02/21	08:20:00.0	5.6	Tres Ríos	Daños en casas de Tres Ríos. Sentido fuerte en el Valle Central. Intensidad VI-VII Tres Ríos de la Unión, Cartago.
1912/06/06	18:40:00.0	5.1	Sarchí, Toro Amarillo	Daños en la zona de Sarchí, San Pedro, Grecia y Toro Amarillo, deslizamientos, avalanchas y 7 muertos. Intensidad máxima de IX en zona epicentral, VII en Toro Amarillo, VI en Naranjo y Grecia.

AAAA /MM/DD	HH:MI:SE	MAG	Ubicación	Característica
1924/03/04	10:07:42.0	7.0	Orotina	Daños en toda la región occidental del Valle Central, más de 70 fallecidos. Intensidad máxima de X en zona epicentral; IX en Orotina y San Mateo; VIII en Puriscal, Atenas y Esparza.
1941/12/05	20:46:57.6	7.5	Península de Osa	Sentido fuerte en la zona fronteriza con Panamá y en el Valle Central de Costa Rica. Intensidad máxima de IX en Puerto Cortés, Puerto Jiménez y Península de Osa. Intensidad VIII en Golfito y Palmar.
1948/11/19	01:04:24.0	6.3	Región Central	Daños leves en el Valle Central
1950/10/05	16:09:30.5	7.7	Península de Nicoya	Daños en Puntarenas y Valle Central. La Catedral y algunas casas en Nicoya con daños; además, se reportaron daños en Filadelfia, Santa Cruz y Paraíso de Santa Cruz. Intensidades máximas de VIII en Nicoya. No cobró vidas humanas.
1951/08/22	05:41:33.4	5.7	Sur de Cartago	Destrucción en Paraíso y Orosí; daños en San José. Intensidad máxima de VII en Paraíso, Cartago.
1952/12/30	12:07:03.0	6.2	Nor-oeste del Volcán Irazú. Terremoto de Patillos	Deslizamientos en las faldas del Volcán Irazú, 21 muertos. Coronado es el pueblo con mayor afectación. Daños menores en Cartago. Intensidad máxima de VIII en San Isidro de Coronado.
1955/09/01	17:33:00.0	5.3	Toro Amarillo - Zarcero	Daños en Toro Amarillo y norte de Alajuela, 10 muertos. Muchos de los daños producto de deslizamientos. Daños se reportaron en Cartago, Naranjo y otras partes al norte de Alajuela. Intensidad máxima VII en zona epicentral.

AAAA /MM/DD	HH:MI:SE	MAG	Ubicación	Característica
1983/04/03	02:50:03	7.4	Golfito	Daños en Golfito, Zona Sur y Valle Central, 1 muerto. Sismo de Subducción. Intensidad máxima de VIII en Sierpe, San Francisco de Tinoco y Villa Colón y de VII en Golfito, Ciudad Neilly, Río Claro y Palmar.
1983/07/03	17:14:26.8	6.3	Pérez Zeledón	Daños al Norte de San Isidro del General, deslizamientos, 1 muerto. Sismo Intraplaca. Intensidad Máxima VIII-IX en zona epicentral. Daños en la carretera Interamericana entre San Isidro – Cartago. Por la ubicación produjo muchos deslizamientos en la zona epicentral.
1989/02/26	12:21:11.0	5.3	Los Santos	Daños y deslizamientos en Acosta, San José. Sismo Intraplaca. Intensidad Máxima de VI en zona epicentral y V en San José y Cartago Centro. MI 4.4 y Mw 5.3.
1990/06/30	14:51:07.2	5.5	Puriscal	Enjambre sísmico en la zona de Puriscal. Daños en Puriscal, deslizamientos en Fila de Picagres. Sismo Intraplaca. Intensidad máxima de VI-VII en Santiago de Puriscal y V en San José Centro.
1990/12/22	11:27:54.1	5.9	Puriscal	Daños en el Valle Central, especialmente en el sector oeste (Alajuela, La Guácima, Atenas, Ciudad Colón, Turrúcares, Puriscal), 1 muerto. Intensidad máxima de VIII en Santiago de Puriscal y VII en Alajuela Centro.
1991/08/09	09:33:49.3	5.2	Los Santos	Daños en Frailes de Desamparados, San Pablo de León Cortés y Corralillo de Cartago. Sismo por Fallamiento Local de Corrimiento Lateral. Intensidad máxima de VII en Frailes y Corralillo de Desamparados, San José.

AAAA /MM/DD	HH:MI:SE	MAG	Ubicación	Característica
1992/03/07	01:53:36.8	6.5	1.5 km sur este de Naranjo	Daños en la zona epicentral. Ocurre dentro de la placa del Coco a 71 km de profundidad. Sentido con intensidad V en San Ramón, Naranjo, Atenas, Alajuela y Heredia.
1993/07/10	20:41:00.0	5.8	12 km sur de Turrialba	Daños en la zona epicentral y Turrialba. Sismo de Pejiballe, intraplaca de corrimiento lateral. Intensidad máxima VII en Pejibaye y Humo de Jiménez, Cartago.
2009/01/08	19:21:34.0	6.1	Cinchona, Alajuela	6 km este del Volcán Poás. Intensidad máxima de VIII-IX en Cinchona y zona epicentral. Causó deslizamientos, casas destruidas, pueblo de Cinchona destruido, corte de agua y luz; edificios públicos dañados. Daño edificios en Alajuela centro y Heredia Centro (en la Universidad Nacional se tuvo que demoler edificio por daños causados). 30 Personas entre fallecidas y desaparecidas. Bosques afectados, ríos con daños. Perdidas en Turismo y en la producción. Sismo de Corrimiento Lateral, intraplaca Caribe, superficial. Aceleración máxima en Heredia Centro de 17 % de g y en Alajuela Centro de 22 % de g; ambas a 22 km del epicentro. En Batán de Limón con aceleración máxima de 13 % de g, 90 km del epicentro.

AAAA /MM/DD	HH:MI:SE	MAG	Ubicación	Característica
2012/09/05	14:42:03	7.6	Océano Pacífico, frente a Sámara, Nicoya, Guanacaste	Daños sentido fuerte en la mayor parte del territorio Nacional. Casas con fracturas; igual que edificios gubernamentales. Hospital de la Anexión en Nicoya y Monseñor Sanabria, Puntarenas con problemas estructurales. Municipalidad de Santa Cruz con daños. Afectó zonas alejadas de Grecia, Zarcero y vecindades del Volcán Arenal. Intensidad máxima de VIII-IX.
2016/12/01	00:25:19.5	5.2	Capellades de Alvarado, Cartago	Daños en algunas casas cercanas al epicentro, causó pequeños deslizamientos que quedaron en fondo de quebradas y riachuelos y agrietamiento de suelo. Provocó que Fuertes Lluvias durante la última semana de setiembre 2017 (antes de la tormenta NATE del 5 de octubre) causara desbordamientos de ríos, caída de puentes y deslizamientos en la zona de Cartago. El sismo no disparó cambios en la actividad volcánica del Volcán Turrialba. Muchas réplicas el primer y segundo día y decayendo rápidamente conforme pasaron los días; ya al quinto día pocas réplicas. Intensidades de IV-VII en zona epicentral (MM).

Fuente: Guendel, F. (1986); Pacheco & Sykes (1992), Ambraseys & Adams (1996), Montero (1999); Protti et al. (2001); Fernández & Montero (2002); Linkimer, et al. (2013); Segura et al. (2014); International Seismological Centre (ISC, 2015); Campos & Quintero (2017); OVSICORI-UNA (2018); RSN (2018).

Los tres ciclos sísmicos mencionados arriba, están correlacionados en el tiempo con los sismos mayores de subducción que ocurrieron en 1904, 1941 y 1983 en el sureste del país bajo la Península de Osa; pero, con un retardo de 7 a 10 años. La correlación temporal con los terremotos de Nicoya es menor, además, que los sismos de subducción del Pacífico norte tienen la

frontera noreste (NE) de cuñas, en las fallas de Hacienda-Chiripa ubicadas en la Cordillera Volcánica de Guanacaste (Montero et al., 2017); por lo que la correlación con los sismos del Valle Central no es directa.

Para saber cómo están relacionados los sismos mayores de subducción de la Zona Sur con los sismos que producen daño al interior del país; debemos de procurar conocer el período de retorno de los sismos que han causado daños en el Valle Central. Revisando los datos mostrados en la Tabla I, han sido 20 los sismos que han causado daños en la zona central del país (ver Figura 3).

Figura 3.

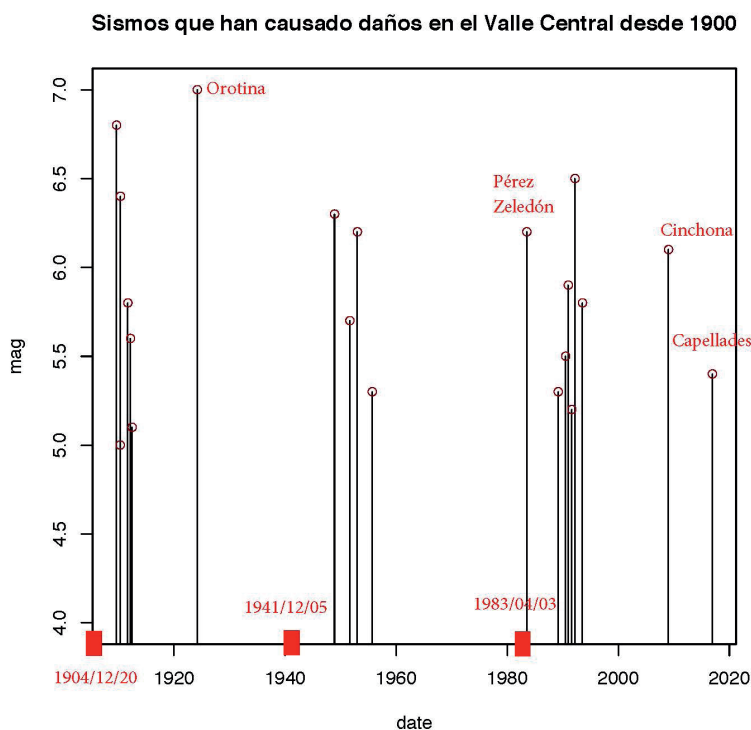


Gráfico que muestra la ocurrencia (fecha) de los sismos desde inicios del siglo XX en Costa Rica y que han afectado la zona central del país con su respectiva magnitud. También se indican con rectángulos de color rojo

los sismos de OSA de 1904, 1941 y 1983. Para cuatro de los sismos; se indica en el gráfico el nombre como se nombró al sismo.

Tomando en cuenta los sismos mostrados en la Figura 3, y agrupando con una media de tiempo aquellos sismos que se encuentran cercanos en el tiempo; obtenemos seis fechas de sismos que han causado daños en el centro del país; a saber 01/01/1911, 04/03/1924, 26/04/1952, 22/12/1990, 08/01/2009, 01/12/2016. Estos sismos nos dan un período de retorno de 21 años; si nosotros no tomamos en cuenta los sismos de Cinchona y Capellades (Figura 3), por encontrarse alejados en el tiempo del sismo 03/04/1983, el período de retorno es de 27 años, y si, además, descartamos el sismo de Orotina, el período es de 40 años. Esta es la única forma que coincida el período de retorno de los sismos de la Zona Sur, con los sismos que han causado daños en el Valle Central del país. Lo que notamos de la Figura 3, es que existen tres periodos 1910-1912, 1951-1955 y 1990-1993; donde hay concentración de sismos superficiales que han afectado la parte central del país y que se encuentran muy cercanos en el tiempo con los sismos mayores de la zona sur de 1904, 1941 y 1983.

Conociendo el período de retorno de los sismos que causaron daños en el Valle Central; ¿cuál es la probabilidad de que ocurra un sismo dentro de 21 años, partiendo del sismo de Capellades del 01/12/2016?

Para contestar esta pregunta, usando un período de retorno de 21 años; como encontramos arriba y conociendo que el último sismo que causó daños en la zona central fue el sismo de Capellades; obtenemos que para el 2037, existe una alta probabilidad (64 %) de que ocurra un sismo que cause daño en el Valle Central del país (ver Figura 4). Para calcular la probabilidad de ocurrencia de un sismo importante que pueda ocasionar daños en el Valle Central es $p=1/T$, donde T es el período de retorno; entonces la probabilidad de que no ocurra cualquier año es $(1-p)$ y al cabo de n años es $(1-p)^n$ y de que ocurra es $P=1-(1-p)^n$. Esta última fórmula es la que se utiliza para realizar el gráfico mostrado en la figura 4.

Figura 4.

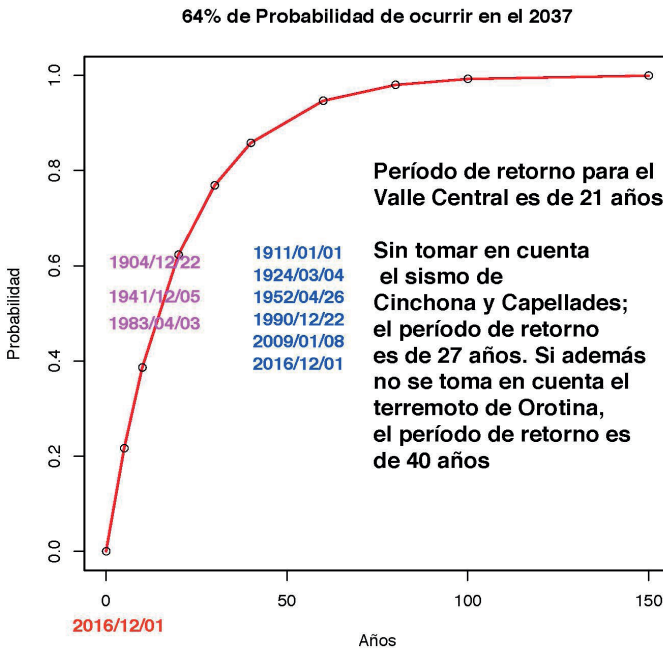


Gráfico que muestra la probabilidad de ocurrencia de un sismo que cause daños en el Valle Central de Costa Rica; tomando como referencia el último sismo el de Capellades del 01/12/2016 y un período de retorno de 21 años.

Ahora, ¿cuál sería la probabilidad de que ocurra un sismo en los siguientes 21 años; después de ocurrido el sismo de Capellades del 01/12/2016 y que cause daños en el Valle Central del país? Para estimar la probabilidad condicional de recurrencia de sismos destructivos en el Valle Central, usamos el modelo empírico de Savage (1994); en general, el modelo empírico de Savage (1994) es una distribución beta con parámetros $P(p|m,n)=\text{Beta}(m+1,n-m+1)$. De la Tabla I (ver también Figura 3), seleccionamos aquellos sismos superficiales que han causado algún grado de daños en el Valle Central; los cuales son: 1909.02, 1910.28, 1910.34, 1911.66, 1912.14, 1912.43, 1924.17, 1948.88, 1951.64, 1952.99, 1955.66, 1983.50, 1989.15, 1990.49, 1990.97, 1991.60, 1992.18, 1993.52, 2009.02, 2016.91; con intervalos de recurrencia de 0.65, 0.06, 1.31, 0.48, 0.29, 11.73, 24.70,

2.75, 1.35, 2.66, 27.83, 5.64, 1.34, 0.48, 0.63, 0.58, 1.34, 15.49 y 7.88 años. La probabilidad de que el siguiente sismo ocurra antes del 2038.00: implicando un intervalo de recurrencia de 21.08 años, se calcula usando 17 intervalos de recurrencia que cumplen esta condición de un total de 19. Por lo que la media \bar{P} es de 0.86, donde el intervalo de confianza del 95 % está dado por [0.71, 0.98]; por lo que podemos considerar que existe una alta probabilidad de que ocurra un sismo que cause daños en el Valle Central del país, antes del 01/01/2038. ¿Qué sucede, si consideramos que el sismo no ocurrió hasta el 23/05/2018? Desde el 01/12/2016 hasta el 23/05/2018 corresponde a un intervalo de 1.47 años. Eliminando los intervalos de recurrencia menores a 1.47; tenemos que 6 intervalos cumplen la condición de un intervalo de recurrencia de 21.08 años de un total de 8; por lo que la distribución es $\beta(7,3)=P(p|6,8)$, dando como resultado una media \bar{P} de 0.7 con un intervalo de confianza del 95 % de [0.45, 0.97]; mostrando una probabilidad e incertidumbre alta de que ocurra un sismo que cause daños en el Valle Central.

Conclusiones

Costa Rica ha presentado periodos de levantamiento y de subsidencia, como resultado de la interacción entre los procesos tectónicos regionales y los ciclos sísmicos de la zona de subducción. Estos ciclos sísmicos en la actualidad se han identificado al norte en la Península de Nicoya (en los años, 1900, 1950 y 2012) y en la Península de Osa (en los años, 1904, 1941 y 1983). La frecuencia y magnitud de estos sismos depende de diversos factores en la placa subductante, tales como asperezas, edad, velocidad y ángulo de convergencia y ángulo de subducción, entre otros. Los sismos más importantes por su magnitud, que han ocurrido en el interior del país, se dieron en los periodos de 1910-1912, 1951-1955 y 1990-1993. Estos sismos tienen una recurrencia de aproximadamente 40 años, similar al ciclo sísmico en la Península de Osa. Sin embargo, los sismos en el interior del país ocurren entre 7 y 10 años, después de haber ocurrido los eventos de la Península de Osa. Ahora, si consideramos los sismos superficiales que han ocurrido en Costa Rica desde inicios del siglo XX y que se han caracterizado por producir daños en el Valle Central del país; aunque con fuentes sísmicas diferentes; obtenemos 20 sismos de moderados a fuertes,

desde 1900 hasta el 2016. Esos 20 sismos tienen un período de recurrencia de 21 años, que es menor a los 40 años de recurrencia de los sismos mayores de subducción en la Península de Osa. Tomando en consideración esos 20 sismos; podemos calcular que la probabilidad de que ocurra un sismo fuerte en el Valle Central en los próximos 21 años es bastante alta. Por lo tanto, aunque hay una estrecha relación en el tiempo entre los sismos mayores en la zona sur y ciclos de sismos en el Valle Central de aproximadamente 40 años, siempre han ocurrido otros sismos esporádicos que nos indican un período de recurrencia menor; que indica que no hay que esperar los sismos mayores de subducción en el SE de Costa Rica para que se produzcan sismos moderados o fuertes al interior del país y que causen daños en el Valle Central.

Agradecimientos

Las figuras se generaron usando el programa computacional GMT (Wessel and Smith, 1995), y R (R Core Team, 2013). Los datos fueron tomados del catálogo sísmico del ISC (2015), OVSICORI-UNA (2018) y RSN (2018).

Referencias

- Ambraseys, N.N. & Adams, R.D. (1996). Large-magnitude central American earthquakes, 1898–1994. *Geophys. J. Int.*, 127 (1996), 665-692. Recuperado de <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb04046.x>
- Campos, D. & Quintero, R. (2017). Mapa de Intensidades e implicaciones socioambientales del sismo de Capellades. Nov. 30, 2016; Costa Rica. *I Congreso Centroamericano de Ciencias de la Tierra y el Mar*. Llevado a cabo del 13 al 16 de noviembre, 2017. San José, Costa Rica.
- De Mets, C., Gordon, R.G. & Argus, D.F. (2010). Geologically Current Plate Motions. *Geophys. J. Int.* 181: 1-80.
- Fernández, M. & Montero, W. (2002). Fallamiento y Sismicidad del área entre Cartago y San José, Valle Central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 26: 25-37.
- Guendel, F. (1986). *Seismotectonic of Costa rica: an analytical view of the souther terminus of the Middle American trench*, PhD thesis, UCSC, USA.

- International Seismological Centre. (2015). *On-line Bulletin*, Recuperado de <http://www.isc.ac.uk>, Internatl. Seismol. Cent., Thatcham, United Kingdom.
- Marshall, J.S., Fisher, D.M. & Gardner, T.W. (2000). Central Costa Rica deformed belt: kinematics of diffuse faulting across the western Panama block, *Tectonics*, 19, 468-492.
- Montero, W. (1999). El terremoto del 4 de marzo de 1924 (Ms 7.0): Un gran temblor interplaca relacionado al límite incipiente entre la placa Caribe y la microplaca de Panamá. En *Revista Geológica de América Central*, 22: 25-62.
- Montero, W., Lewis, J. C. & Araya, M. C. (2017). The Guanacaste Volcanic Arc Sliver of Northwester Costa Rica. *Scientific Reports*, SP 1797, VI 7, IS 1. DOI: 10.1038/s41598-017-01593-8.
- Linkimer, L., Arroyo, I., Mora, M., Vargas, A., Soto, G. J., Barquero, R., Rojas, W., Taylor, W. & Taylor, M. (2013). El terremoto de Sámara (Costa Rica) del 5 de Setiembre del 2012 (Mw 7,6). *Revista Geológica de América Central*, 49, 73-82.
- Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional (2018). Recuperado de <http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php/sismologia/sismicidad-historica>. Último acceso 22 mayo, 2018.
- Pacheco, J. F. & Sykes, L. R. (1992). Seismic moment catalogue of large, shallow earthquakes 1900 to 1989. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82 (3), 1306-1349.
- Protti, M, Guendel, F. & Malavassi, E. (2001). *Evaluación del Potencial Sísmico de la Península de Nicoya*. Editorial Fundación UNA, Heredia, C. R.
- Red Sismológica Nacional (RSN) (2018). Sismos históricos. Recuperado de <http://rsn.ucr.ac.cr/actividad-sismica/sismos-historicos>. Último acceso 08 junio, 2018.
- Savage, J. C. (1994). Empirical earthquake probabilities from observed recurrence intervals. *Bulletin of the Seismological Society of America* 84, 219-221.
- Segura, J. D., Quintero, R., Burgoa, R. B. & Jiménez, U. W. (2014). Análisis de la actividad sísmica en Costa Rica durante el 2010 y resumen de los eventos sísmicos más importantes presentados en Costa

Rica de 1983-2012. *Revista Geográfica de América Central*, 52(2), 71-102.

R Core Team (2013). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Recuperado de URL <http://www.R-project.org/>.

Coast and Geodetic Survey, Washington, D.C, Science Service & Asociación Jesuita Sismológica (1935). Seismological notes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 25(4), 387-389. Recuperado de <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article/25/4/387/115140/seismological-notes>

Wessel, P. & Smith, W.H.F. (1995). *New version of the generic mapping tools released*. EOS 76, 329.



Zonificación del conflicto de uso de la tierra en las áreas de protección de la red de drenajes de la cuenca del río Páez, Cartago, Costa Rica.

Zoning of the land use conflict in the protection areas of the drain network of Páez river basin, Cartago, Costa Rica.

Kevin Alfaro-Jiménez¹
Universidad Nacional, Costa Rica

Resumen

El estudio presenta una zonificación de los conflictos de uso de la tierra en las áreas de protección (AP) de los drenajes de la cuenca del río Páez. Dicha zonificación se delimitó y cuantificó mediante procesos de análisis espacial, con base en las curvas de nivel (1:10.000) y la digitalización de ortofotos. Resultando un 59 % del área total de las AP (7,397 km²) bajo algún conflicto de uso. La zonificación del área con conflictos de uso (4,374 km²) se distribuyó: un 4 % en la categoría I (cultivo permanente), un 81 % en la categoría II (agropecuario y cultivos) y por último la categoría III un 16 % (viviendas, infraestructuras, otros). El conflicto generado por los cultivos y en menor grado por el uso agropecuario predomina en la degradación de las funciones de las AP de la cuenca. Apoyando lo anterior, el índice de conflictividad de uso de la tierra (GC) propuesto por Danza y Sanabria (2008) resultó en -0.13, evidenciando una alta afectación en las AP por uso inadecuado de la tierra. Las subcuencas 3, 4, 5, 6, 14 y 20 indican una mayor conflictividad, por lo tanto, las medidas de mitigación deben ser prioritarias en estas áreas espaciales.

Palabras clave: zonificación, conflictos de uso de la tierra, cuenca río Páez.

¹ Investigador, Laboratorio de Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: kevin15aj@gmail.com
Este artículo corresponde a la ponencia presentada en el I Congreso Centroamericano de Ciencias de la Tierra y el Mar, realizado en San José, Costa Rica, del 13 al 16 de noviembre de 2017.

Abstract

This study presents a zoning of land use conflicts in protection areas (AP) of drainages of the Páez river basin. The zoning was delimited and quantified through spatial analysis processes, based on the level curves (1: 10 000) and the digitization of orthophotos. Resulting 59% of the total of AP (7,397 km²) which have a land use conflict. The zoning area with land use conflicts (4,374 km²) was distributed: an 4% in category I (permanent crop), an 81% in category II (agricultural and crops) and finally an 16% in category III (housing, infrastructure and others). The conflict generated by crops and smaller scale by the agricultural use predominate in the degradation of the AP functions at the basin. Confirming the anterior information, the index of land use conflicts (GC) proposed by Danza and Sanabria (2008) resulted in -0.13, evidencing a high affectation in the AP due to inadequate land use. The sub-basins 3, 4, 5, 6, 14 y 20 indicates a major conflict, therefore, mitigation measures should be a priority in this spatial area.

Keywords: zoning, land use conflict, Paéz river basin, watershed.

Introducción

El anárquico expansionismo poblacional ha ocupado los espacios vitales de los ciclos biogeoquímicos (Abbas, Bloch & Lamond 2012; Walsh et al., 2005; González 1996), especialmente el hidrológico. Los conflictos de uso de la tierra se dan por la discrepancia entre el uso que debería tener la tierra por su oferta ambiental (capacidad de uso), y aquel al que está expuesto por las actividades humanas o uso actual (IGAC y Corpoica, 2002). Estas situaciones degradan los ecosistemas y causan impactos ambientales negativos, acentuándose en las cercanías a las corrientes hídricas, al incrementar el riesgo de que los contaminantes lleguen al cuerpo de agua (Daza & Sanabria, 2008). Además, estos conflictos ponen en grave peligro la calidad del recurso suelo (IGAC 2007), al concurrir en situaciones en las que, una avanzada erosión, pueda dificultar las acciones de reforestación y recuperación ambiental del bosque ribereño, al reducirse la fertilidad y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo (González 1996).

La ley Forestal 7575 dispone en su artículo 33 la creación de un instrumento llamado áreas de protección (AP), que cumple una doble función: una de protección del recurso hídrico y otra como mecanismo de defensa contra amenazas naturales. Estas áreas deben estar cubiertas por la vegetación original o bosque ribereño, para atenuar los efectos erosivos y lixiviantes de la precipitación sobre el suelo, regular el flujo hídrico y reducir los procesos de sedimentación en los cursos de agua (Costa et al. 1996; Apan et al, 2002; Tabacchi et al., 1990), además, de permitir sus funciones de captación y remoción de contaminantes, almacenamiento de aguas de

inundación, regulación de la temperatura del agua, y provisión de hábitat, recreación y educación (Wender 1999).

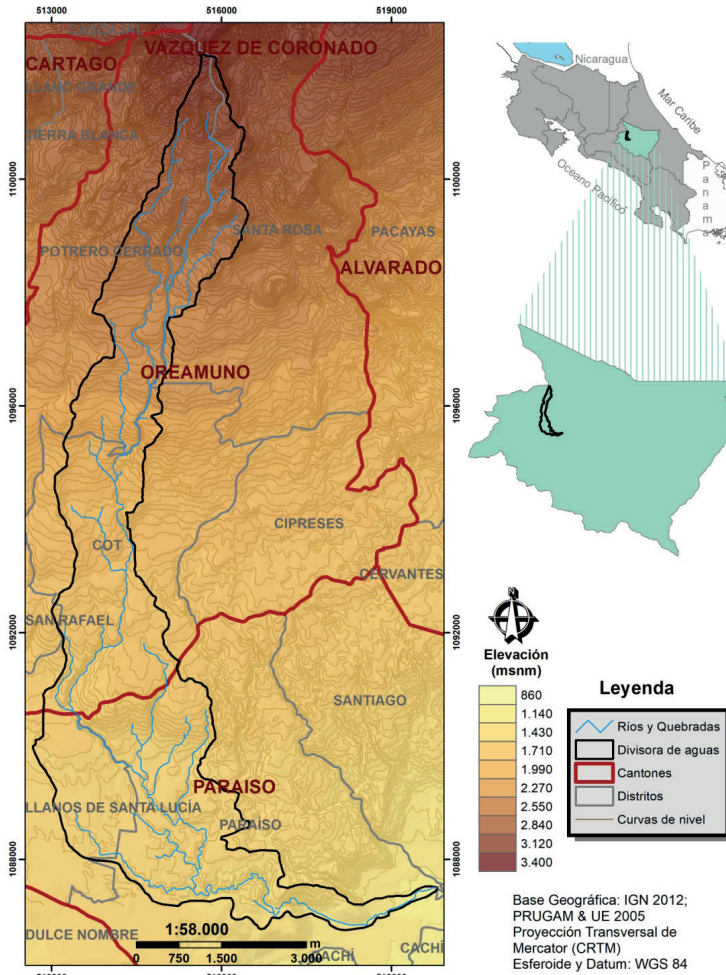
El artículo presenta la zonificación de los conflictos de uso de la tierra presentes en las AP de la red de drenaje de la cuenca del río Páez, Cartago, a partir del cual se podrán identificar zonas prioritarias de intervención (Redal et al. 2005), para mejorar la efectividad de los esfuerzos de rehabilitación de áreas. Este está dentro del marco del proyecto 0138-16 denominado “*Caracterización biofísica, morfométrica e hidrológica para proponer acciones de manejo de recursos hídricos en la subcuenca del río Páez, Cartago*” del Laboratorio de Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos, de la Escuela de Ciencias Ambientales, y constituye un resultado parcial en investigación técnica al mismo.

Área de Estudio

El área de estudio corresponde a la subcuenca del río Páez, ubicada en la zona central de la hoja cartográfica nacional Istarú (1:50 000), desde las faldas del volcán Irazú, atravesando la comunidad de Cot y Paraíso de Cartago, hasta llegar al Valle de Ujarrás, desembocando sus aguas a la cuenca alta del río Reventazón. Entre las coordenadas planas 515 682 y 519 780 m este y 1 102 192 y 1 087 436 m norte del sistema de Proyección Transversal de Mercator para Costa Rica (CRTM). Abarcando un área aproximada de 28,34 km², dedicada principalmente, a la agricultura de hortalizas y pastizales (Tencio 2013; Ledezma, 2009a).

Esta cuenca abarca territorios administrativos tanto del cantón de Oreamuno como de Paraíso de Cartago (Figura 1). El primero cubre las tierras altas de la cuenca, a las faldas del Volcán Irazú, su actividad económica principal es la agrícola de hortalizas: papas, cebollas, zanahorias, lechugas y pastizales (Tencio, 2013 y Ledezma, 2009a). El segundo cubre las tierras más bajas de la cuenca, en general, en los terrenos del sector sur de este cantón se da la producción cafetalera y el aprovechamiento de los abundantes recursos hídricos de la zona; en el sector norte, con la incorporación de los proyectos de parcelación, desarrollados por el Instituto de Desarrollo Agrícola, se da un crecimiento en el aprovechamiento de estas tierras para agricultura tradicional de legumbres y hortalizas (Ledezma, 2009b).

Figura 1. Ubicación geográfica y división territorial política intrínseca en la cuenca del Río Páez



Metodología

Red de drenaje y divisora de la cuenca

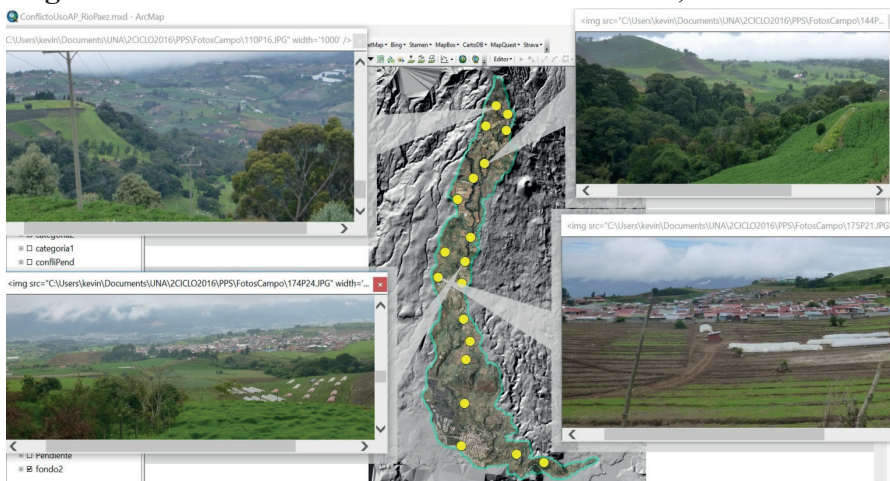
La cuenca hidrográfica es el espacio de terreno limitado por las partes más altas de las montañas, laderas y colinas, en él se desarrolla un sistema de drenajes superficiales que concentran sus aguas en un río principal, que a su vez se integra a otro río más grande, al mar o lago, este espacio

se puede delimitar en una carta altimétrica siguiendo las curvas de nivel (Faustino & Jiménez 2000; Jiménez 2001). Mediante las curvas de nivel digitalizadas previamente de las hojas cartográficas escala 1:10 000 del PRUGAM (PRUGAM & UE 2005), se creó un vector lineal para la red de drenajes y uno poligonal para la divisoria de aguas.

Uso Actual de la Tierra

La determinación del uso actual de la tierra se realizó desde la fotointerpretación de imágenes satelitales (Bing y Google EARTH), digitalizando y georreferenciando vectores poligonales de los usos de la tierra, clasificados en bosque, urbano, agropecuario/cultivo y cultivo permanente, vectores que fueron corroborados en campo, a lo largo y ancho de la subcuenca (Figura 2).

Figura 2. Puntos de verificación del uso de la tierra, cuenca Río Paéz



Áreas de Protección (AP)

Las AP se determinaron según lo dispuesto en la Ley Forestal (N° 7575), en su artículo 33 referente a ríos y quebradas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Consideraciones para definir las Áreas de Protección (AP)

Área Protegida (AP)	Pendiente	Zona de Amortiguamiento (buffer)
AP de ríos y quebradas	Superior a 40%	<ul style="list-style-type: none"> • 50 m horizontales ambos lados de borde.
	Inferiores a 40%	<ul style="list-style-type: none"> • 15 m horizontales ambos lados de borde en zonas rurales. • 10 m horizontales ambos lados de borde en zonas urbanas.

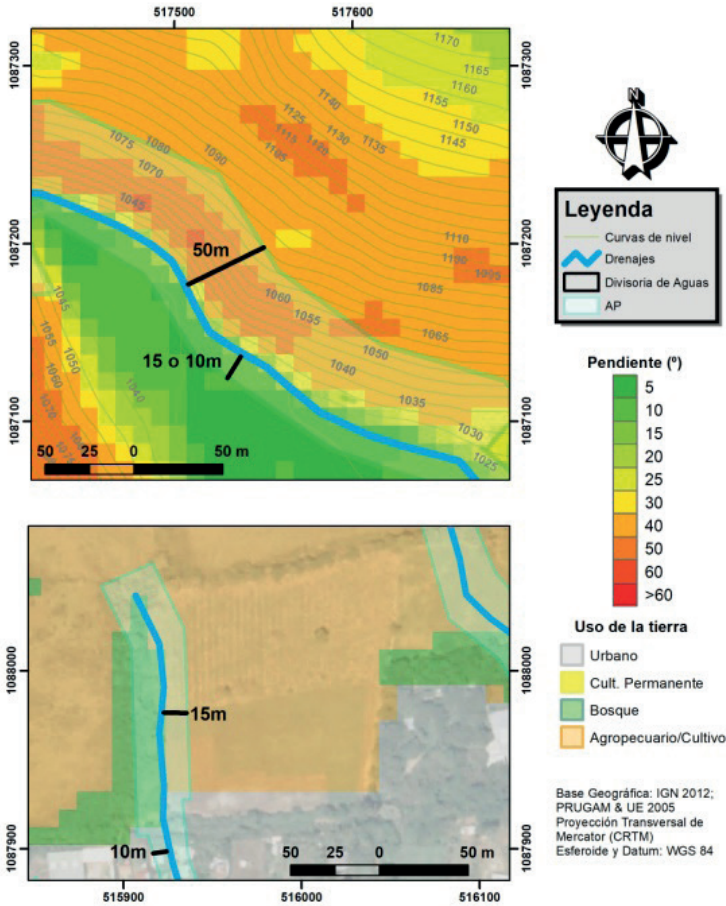
Fuente: Elaboración propia con datos de la Ley Forestal 7575 de Costa Rica.

Primeramente, se creó un mapa de pendientes en la cuenca (en dos rangos $\geq 40\%$ y $< 40\%$), mediante un modelado digital de las elevaciones (MED), basado en las curvas de nivel (1:10 000). Posteriormente, se establecieron las zonas de amortiguamiento con herramientas de geoprocésamiento, donde a partir del vector lineal (drenajes) se crea un vector poligonal (zona de amortiguamiento) que abarque una distancia de 10, 15 y 50 m a ambos lados del drenaje. Siguiendo con la conversión de las capas obtenidas (uso actual de la tierra, pendientes y zonas de amortiguamiento) a formato raster, permitiendo el empleo de álgebra de mapas, que con sus respectivas sentencias de operadores booleanos (Y/O) y operadores relacionales ($<$, \leq , $>$, \geq , $=$, \neq) se procedió a generar las respectivas AP para cada sección de la red de drenajes (Cuadro 2 y Figura 3).

Cuadro 2. Sentencias álgebra de mapas para generar las AP de la red de drenajes

Insumos de entrada	
Zonas amortiguamiento =	10 m = <i>Buffer10.grid</i> 15 m = <i>Buffer15.grid</i> 50 m = <i>Buffer50.grid</i>
Uso actual de la tierra =	<i>UsoActual.grid</i>
Pendientes $\geq 40\%$ y $< 40\%$ =	<i>Pend40.grid</i>
Sentencia de operadores en álgebra de mapas	
Producto	Sentencia
AP10.grid =	$((\text{"UsoActual"} == \text{urbano}) \& (\text{"Buffer10"} == 1))$
AP15.grid =	$((\text{"UsoActual"} == \text{cultivo_permanente}) (\text{"UsoActual"} == \text{agrove_cult}) \& (\text{"Buffer15"} == 1))$
AP50.grid =	$((\text{"Pend40"} == 1) \& (\text{"Buffer50"} == 1))$

Figura 3. Metodología para generar las AP de ríos y quebradas



Zonificación de conflicto de uso de la tierra

La cartografía de los conflictos de uso de la tierra en las AP se realizó mediante álgebra de mapa, usando de entrada el raster AP y el de uso actual de la tierra, cartografiándose como conflicto toda área dentro de las AP que no correspondan a bosque. Posterior y con las mismas herramientas usadas en la cartografía de los conflictos de uso se zonificaron los conflictos de uso de la tierra en las AP, de acuerdo con las categorías establecidas: I) cultivos permanentes y pastos en reposo; II) áreas con usos agropecuarios y cultivos anuales; III) presencia de viviendas, industrias y cualquier otro tipo de infraestructura (Cuadro 3). Con la premisa que a

mayor categoría así mayor será la prioridad de intervención, considerando que una alta conflictividad en el uso de la tierra está asociada con una alta degradación ambiental (IGAC & Corpoica 2002).

Cuadro 3. Sentencias en álgebra de mapas para generar la zonificación del conflicto de uso de la tierra

Insumos de entrada	
AP de la red de drenajes =	<i>AP.grid</i>
Uso actual de la tierra =	<i>UsoActual.grid</i>
Conflicto de uso de la tierra =	<i>Conflictos.grid</i>
Sentencia de operadores en álgebra de mapas	
Producto	Sentencia
Conflictos.grid =	((“AP” == 1) & (“UsoActual” == urbano) (“UsoActual” == cultivo_permanente) (“UsoActual” == agrope_cult))
Cat_I.grid =	((“Conflictos” == 1) & (“UsoActual” == cultivo_permanente))
Cat_II.grid =	((“Conflictos” == 1) & (“UsoActual” == agrope_cult))
Cat_III.grid =	((“Conflictos” == 1) & (“UsoActual” == urbano))

Para cuantificar la conflictividad presente en las AP se aplicó el indicador Grado de Conflicto de Uso de la Tierra (GC), propuesto por Danza y Sanabria (2008), cuya ecuación original (Ecuación 1) usa como variables las áreas de los conflictos bajo, medio, alto y crecimiento urbano; variables que en el estudio están dadas por: categoría I (bajo), categoría II (medio) y categoría III (alto y crecimiento urbano).

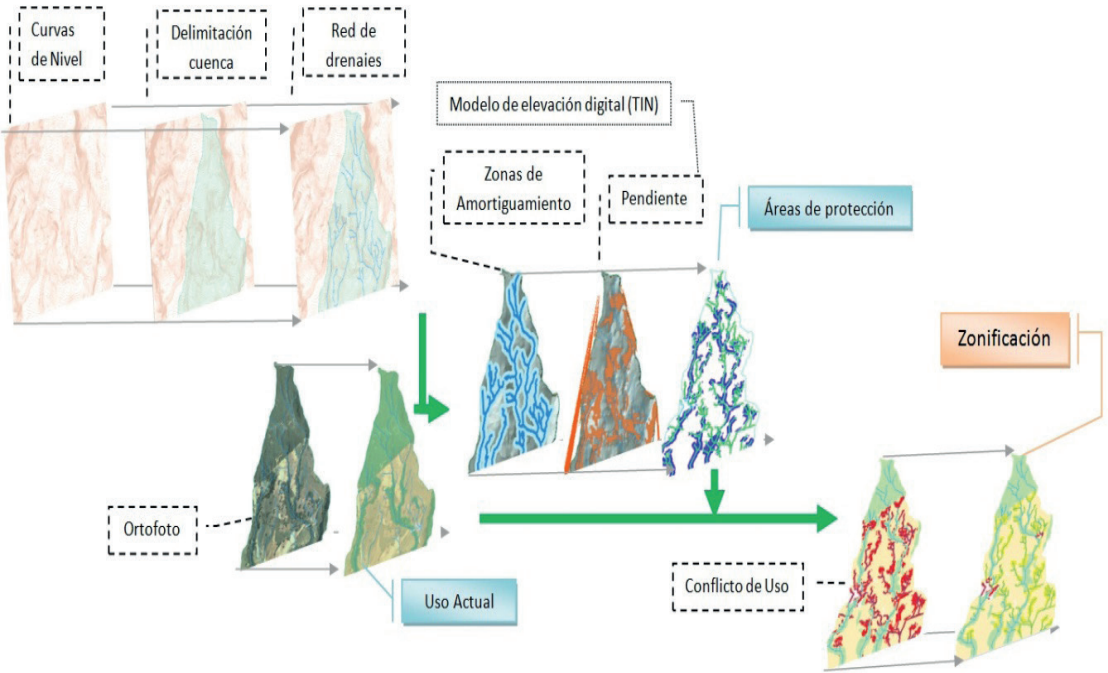
$$GC = \frac{(E + B) - (A + M)}{Av}$$

Ecuación 1

Donde: **E:** es el área sin conflicto, **B:** área con conflicto bajo (categoría I), **M:** área con conflicto medio (categoría II), **A:** área conflicto alto (categoría III, incluyéndose en este la variable crecimiento urbano) y **Av:** área total de las AP.

Los valores resultantes del indicador pueden variar de -1 a 1, valores cercanos a -1 indica un mayor grado de conflictividad de uso de la tierra, mientras que valores cercanos a 1 indica un menor grado de conflictividad. Interpretándose que 1, la totalidad de las AP se encuentran con cobertura arbórea (están en equilibrio), igual a 0, la categoría I y las áreas sin conflicto son iguales a las categorías más conflictivas (II y III). Además, siguiendo las la divisoria de agua, a partir de loa drenajes que desembocan sus aguas directamente al cauce principal de la cuenca, se delimitaron las subcuencas de la cuenca del río Paéz, a las cuales se les cuantificó el GC individualmente (Figura 4).

Figura 4. Diagrama representativo de los productos obtenidos por cada paso metodológico



Resultados

El análisis espacial y recorrido de campo generó en primera instancia el mapa de uso actual de la tierra y AP (Figura 5). Las figuras geográficas cartografiadas cuantificaron una longitud aproximada de 172,44 km de la red drenajes, una zona de 7,39 km² para AP, un uso de la tierra dominado por actividades agropecuario/cultivos, representando un 68 % del área de la cuenca (correspondiendo con lo visualizado en campo), mientras que el uso urbano, cultivo permanente y bosque representan un 14 %, 3 % y 15 % de la cuenca, respectivamente (Cuadro 4).

Cuadro 4. Área absoluta y porcentual por uso actual de la tierra

Uso Actual	Área	
	Km ²	%
Urbano	3,97	14%
Cultivo Permanente	0,71	3%
Agropecuario/cultivo	19,36	68%
Bosque	4,35	15%
Total	28,39	100%

En segunda instancia se generó el mapa de zonificación de conflictos de uso de la tierra en las AP (Figura 6), resultando un 59 % (4,374 km²) de las AP bajo algún conflicto de uso, área de la cual un 4% presenta conflictos categoría I (cultivo permanente), el 81 % en categoría II (agropecuario y cultivos) y por último un 16 % categoría III (viviendas, infraestructuras, otros; Figura 6). El cálculo del índice GC de la cuenca en general da como resultado -0,13, señalando que la cuenca presenta alta conflictividad.

Figura 5. Uso de la tierra y AP de los drenajes, cuenca del río Páez

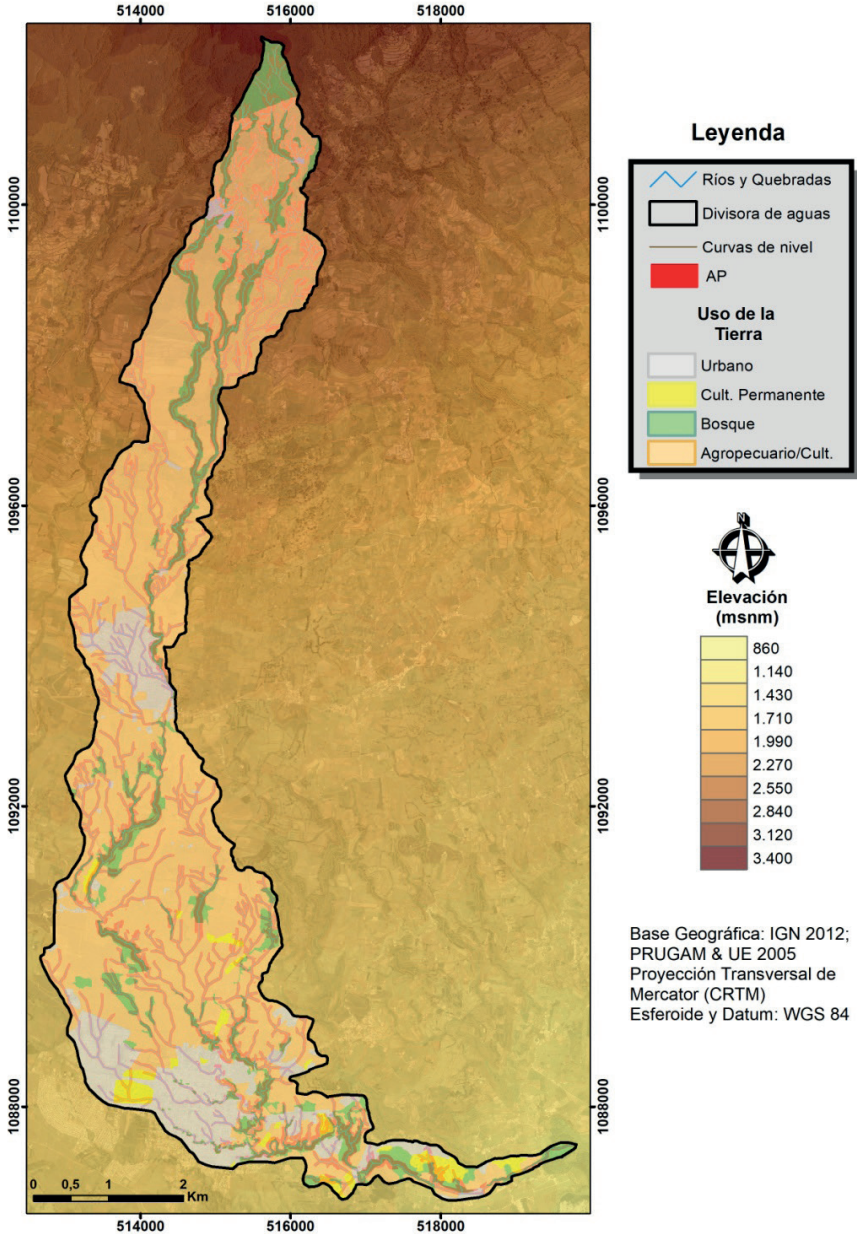
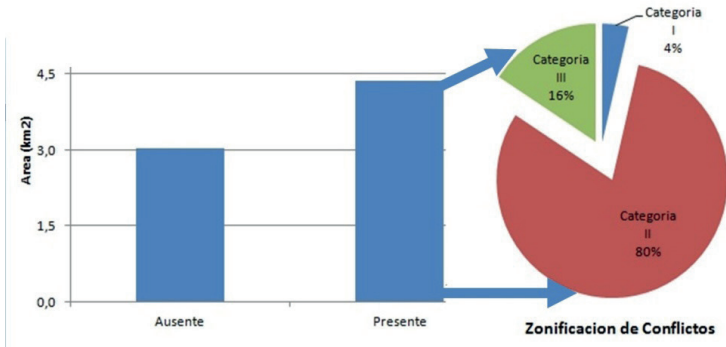


Figura 6. Área de protección en conflicto y distribución porcentual de la zonificación de conflictos

Conflicto	Área	
	Km2	%
Ausente	3,023	41%
Presente	4,374	59%
Total	7,397	41%



Además de la zonificación de los conflictos de uso, en las AP de la cuenca en general, se obtuvieron por cada una de las 22 subcuencas cartografiadas resultados detallados del área de cada categoría de zonificación de conflicto, longitud total de los drenajes e índice de GC, generando un mapa que permite focalizar la atención en subáreas de gestión (subcuencas con GC críticos) de la unidad de gestión, tal cual es la cuenca hidrográfica, lo cual permite trabajar secciones pequeñas de manera independiente y dentro de ellas trabajar en las AP con una categoría de zonificación mayor, al considerar estas como las áreas más críticas (Figura 7). Del análisis detallado de las subcuencas se rectifica el dominio de la categoría II en las AP, con excepción de las subcuencas 1 y 2 (la subcuenca 0 corresponde al cauce principal, por lo que no se toma en consideración, aunque es importante indicar que las AP de estos trayectos están dominados por una cubierta arbórea), que presentan una mayor cobertura de vegetación arbórea, por lo tanto, una mayor área sin conflicto de uso (Figura 8).

Figura 7. Distribución del uso de la tierra en las AP e índice GC por subcuenca

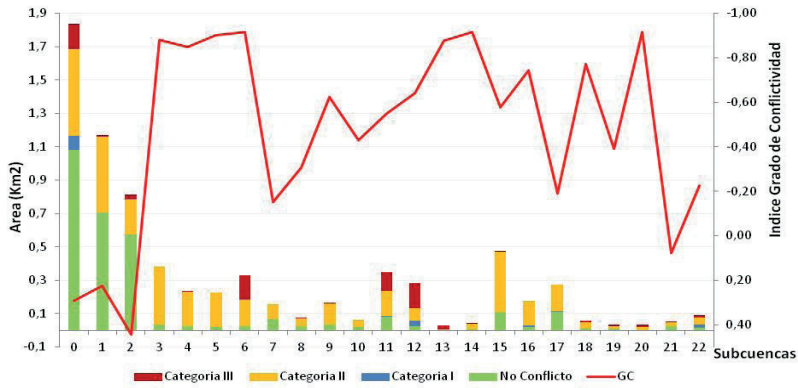
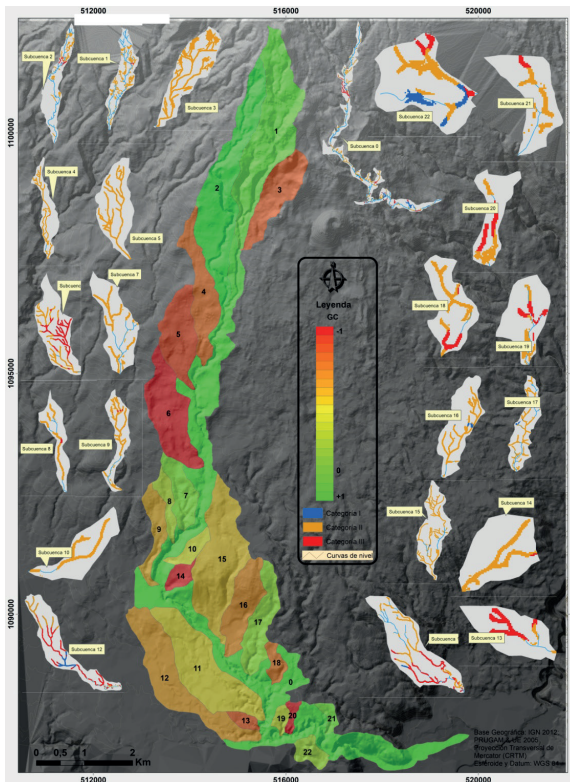


Figura 8. Índice de GC y zonificación del conflicto de uso en las AP de cada subcuenca



Discusión

En los resultados obtenidos del presente estudio el conflicto de uso imperante es la categoría II, que corresponde a uso agropecuario/cultivo, por lo tanto, se infiere que el principal causante de la pérdida de ecosistemas riparios es dicha actividad (Esquivel y Valerio 2013); esto provoca la fragmentación del ecosistema, al dejar pequeños fragmentos de bosque que dificultan la conectividad ecológica y disminuyen la capacidad de brindar servicios ecosistémicos (Tabacchi et al. 1990), consecuentemente, se da la modificación de la capacidad de retención hídrica de la cuenca, en la torrencialidad, la velocidad de respuesta, el tiempo de concentración, y el volumen de los caudales (Esquivel & Valerio 2013; Ferrando 2006; Morera, Pinto & Romero 2007; Sanchun et al. 2016), sin omitir que las concentraciones urbanas en las orillas de los ríos (14 % de la cuenca) representa otra causa importante de la degradación de las AP, principalmente por afectar la calidad de los cuerpos de agua (Buzolich et al. 2007).

El 59 % de las AP de la red de drenaje de la cuenca presenta algún conflicto de uso de la tierra, lo cual evidencia la pérdida del ecosistema ripario y consecuentemente un alto grado de conflictividad (-0,13), en expectativa, hay un mayor área cubierta por conflictos críticos, que zonas con conflictos menos críticos o sin conflicto. Esta situación inhibe la susceptibilidad de la cuenca a problemas de erosión, lixiviación de los suelos e irregularidad del flujo hídrico, además, aumenta los procesos de sedimentación de los cursos de agua (Costa et al. 1996), dificulta las acciones de reforestación y recuperación ambiental del bosque ribereño, al reducirse la fertilidad y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo (González 1996), y con ello, disminuye la capacidad amortiguadora de estos bosques a eventuales crecidas e inundaciones, que se tornan más frecuentes ante las precipitaciones (Wender 1999).

Las cuencas hidrográficas al ser sistemas naturales y dinámicos, que funcionan como unidades de gestión, en donde lo que se haga en una zona de esta repercutirá en determinado tiempo en el resto de ella (Ferrando, 2006), es la razón por la que la gestión integral de cuencas aparece como una herramienta que puede contribuir a la mitigación de los procesos de inundación (Ureña 2002), uno de los enfoques básicos es que los procesos que ocurren al interior de las cuencas, sean naturales o potenciados por acción humana, deben ser controlados desde su inicio (es decir, desde el

nacimiento de los cursos de agua), ya que resulta más difícil, que medidas aplicadas en las secciones medias e inferiores de los sistemas de drenaje tengan éxito si la causa del evento se viene potenciando desde la sección superior de las cuencas (Ferrando 2006). Por lo tanto, en consideración de lo anterior es prioritaria la intervención de las subcuencas 3, 4, 5, 6, 14 y 20 (Figura 7), en dicho orden.

Mantener o aumentar la capacidad de retención hídrica en las secciones superiores de las cuencas, mediante la protección y recuperación de la cobertura vegetal nativa u otra equivalente en las AP, reducirá las capacidades erosivas y de transporte de sedimentos de los flujos hídricos, también mejorará la efectividad de las medidas de mitigación ante eventos de crecidas y semejantes a esta naturaleza (Delgado & Villegas 2013; Ferrando, 2006). Cannata (1996) destaca una postura interesante para mitigar los problemas de inundaciones que se apoyan en lo anterior y que quizá sea más difícil de implementar, pero ciertamente más eficaz, deseable y ventajoso, consiste en favorecer un nuevo equilibrio dinámico, mediante el ordenamiento y protección con normas de uso de la tierra, al priorizar obras de restauración hidrológico-forestal, y limitar las grandes obras de regulación y restauración artificial. Esta postura fomenta los bosques de ribera como retardantes de la llegada de la escorrentía al cauce, en consecuencia, se reduce el volumen de las corrientes y se favorece la infiltración de aguas superficiales, además, mediante la implementación de pavimentos porosos o áreas especiales de infiltración en las áreas urbanas es posible incrementar los anteriores efectos (Ureña 2002; Kauffman & Brant 2000), este aspecto es muy importante realizarlo, no solamente con el espacio estrictamente urbano, sino con los espacios periurbanos y/o rurales anteriores y pertenecientes a la misma vertiente.

Las AP constituyen una figura jurídica importante en la protección del recurso hídrico, al presentar una doble función, 1) protección y conservación, y 2) como zonas de amortiguamiento ante eventos naturales (Valdés 2010; Delgado & Villegas 2013), sin embargo, es un área que se ha dejado de lado por la necesidad de un “desarrollo” (que amerita un enfoque al aspecto económico, no así un desarrollo sostenible), que requiere la creciente población, al menospreciar la importancia de las mismas para el ecosistema y al ignorar la importancia que posee estas como figura jurídica, volviéndose una norma más de la legislación.

En consecuencia, es recomendable incrementar el uso de la vegetación como técnica de estabilización de riberas, la creación de sobreelevaciones contra las inundaciones y de mejora de la calidad ambiental (Ureña 2002). La incorporación de sistemas agroforestales que logren un máximo beneficio al propietario sin causar deterioro en los recursos naturales apuntan a ser una alternativa al desarrollo sostenible. En miras de lo anterior el Gobierno de Costa Rica inició en 2013 un diálogo con el Banco Mundial sobre la posibilidad de colaborar en la preparación de una visión y estrategia de Crecimiento Verde e Inclusivo (CVI) para los paisajes rurales productivos del país, que permitan la diversificación de la productividad en el espacio rural, así como la disminución de la vulnerabilidad económica y ambiental (Vignola, Otarola, Majano, & Kilian 2014).

Conclusiones

La zonificación del conflicto de uso de la tierra es una herramienta que permite definir áreas prioritarias de intervención, *a priori* si se secciona la cuenca en unidades menores de gestión (subcuencas). La afectación de los conflictos de uso de la tierra en una cuenca puede ser reflejada con el índice de grado de conflictividad, el cual en la cuenca en estudio sugirió una alta degradación causada por la actividad agropecuaria/cultivo, en primera instancia, y en segunda instancia por el uso urbano, pudiéndose ver afectados directamente los cursos de agua en calidad y cantidad. Pese a que las áreas en categoría III suponen una menor degradación ambiental, no debe admitirse su uso actual, debido a que todo cambio de uso que implique la eliminación de cobertura natural de los corredores hídricos afecta la calidad y cantidad del recurso.

Cualquier medida o metodología que se tome en cuenta debe considerar el sistema completo (desde el origen hasta el desemboque), promoviendo el equilibrio dinámico de las corrientes mediante el incremento de la vegetación original como técnica de estabilización de riberas e implementación de obras difusas y limitadas de regulación y restauración artificial.

Referencias

Abhas, K., Bloch, R. & Lamond, J. (2012). *Ciudades e Inundaciones: Guía para la Gestión Integrada del Riesgo (Resumen para hacedores de*

- políticas*). Washington: International Bank for Reconstruction and Development /International Development Association.
- Apan, A., Raine, S. & Paterson, M. (2002). Mapping and analysis of changes in the riparian landscape structure of the Lockyer Valley catchment, Queensland, Australia. *Landscape and Urban Planning*, 59 (1), 43-57.
- Buzolich, G. (2007). *Capacidad potencial de las franjas ribereñas del río Bermudez para reducir la erosión. Recursos Naturales y Ambiente*, 51-52, 175-183. Turrialba, CR.: CATIE.
- Cannata, P. (1996). Ríos, cuencas hidrográficas y planificación territorial. En J. Martín, & J. Montalvo, *Agua y paisaje: naturaleza, cultura y desarrollo*. 175-198. España: Multimedia Ambiental.
- Costa, T., Souza, M., & Brites, R. (1996). La delimitación y caracterización de áreas de preservación permanente, a través de un sistema de información geográfica. *VIII Simposio Brasileño de Sensoramiento Remoto*. Salvador, Brasil
- Daza, O. & Sanabria, R. (2008). Identificación de conflictos de uso de suelo en rondas hídricas: herramienta para manejo ambiental. Caso de estudio municipio de Paipa. *Perspectiva Geográfica*, 13, 13–26.
- Delgado, V. & Villegas, M. (2013). Evaluación territorial sobre la disponibilidad de recurso hídrico y recurrencia de eventos extremos secos en la subcuenca del río Sandoval, Costa Rica. *Seminario de graduación de Licenciatura en Ciencias Geográficas*, Universidad Nacional de Costa Rica, Heredia.
- Esquivel, A. & Valerio, L. (2013). *Propuesta de restauración forestal de las áreas de protección de los principales afluentes del Corredor Biológico*. (Tesis Licenciatura en Restauración de Ecosistemas Forestales. Universidad Nacional de Costa Rica). Heredia.
- Faustino, J. & Jiménez, F. (2000). *Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Turrialba, CR.: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Área de Cuencas y Sistemas Agroforestales.
- Ferrando, F. (2006). Sobre inundaciones y anegamientos: Flood Disasters. *Revista de Urbanismo* (12), 25-42.
- González, M. (1996). Impacto de la agricultura en los sistemas fluviales. Técnicas de restauración para la conservación del suelo y del agua. *Agricultura y sociedad*, 78, 211-236.

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2007). *Subdirección de Agricultura: Estudio semidetallado de las coberturas terrestres*. Bogotá.: Imprenta Nacional de Colombia.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) & Corpoica. (2002). *Zonificación de los conflictos de uso de las tierras en Colombia*. Bogotá, D.C.
- Jiménez, F. (2001). *Conceptos, estrategias y diagnósticos en el manejo de la cuencas hidrográficas*. Turrialba, CR.: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Kauffman, G. & Brant, T. (2000). The Role of Impervious Cover as a Watershed-Based Zoning Tool to Protect Water Quality in the Christina River Basin of Delaware, Pennsylvania, and Maryland. *Water Res. Agency* .
- Ledezma, A. (2009a) *Diagnóstico Inicial de la Situación de los Residuos Sólidos en la Municipalidad de Oreamuno*. Cartago, CR.: Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). (b) *Diagnóstico Inicial de la Situación de los Residuos Sólidos en la Municipalidad de Paraíso*. Cartago, CR.: Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR).
- Morera, C., Pinto, J., & Romero, M. (2007). Paisajes procesos de fragmentación y redes ecológicas aproximación conceptual, (11-47) . *Corredores Biológicos: Acercamiento conceptual y experiencia en América*. Imprenta Nacional. San Jose, Costa Rica.
- PRUGAM, & UE. (2005). *Cartografía: Cuadrante Sur-Este* . San Jose, CR.: Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos.
- Redal, L., Carrasco, I., & Gordillo, A. (2005). *Influencia de los usos del suelo sobre la calidad en la cuenca alta del río Peñas Blancas, y estudio de alternativas de desarrollo rural más sostenible*. Centro Científico Tropical.
- Sanchún, A., Botero, R., Morera-Beita, A., Obando, G., & Ricardo, O. (2016). *Restauración funcional del paisaje rural: manual de técnicas*. UICN. San Jose, Costa Rica.XIV.
- Tabacchi, E., Planty-Tabacchi, A., & Decamps, O. (1990). Continuity and discontinuity of the riparian vegetation along a fluvial corridor. *Landscape Ecology* , 1 (5), 9-20.
- Tencio, R. (2013). *Información General de la Región Central Oriental*. San Jose, CR.: Ministerio de Ganadería y Agricultura (MAG).

- Urena, J. (2002). La ordenación de los espacios fluviales en las ciudades. (45-63). En P. De la Cal, & F. Pellicer, *Rios y ciudades: Aportaciones para la recuperación de los rios y riberas de Zaragoza*. Zaragoza: Institucion Fernando el Catolico.
- Valdes, M. (2010). *Las Areas de Proteccion del articulo 33 de la Ley Forestal: El caso de la quebrada Los Negritos en el sector de Montes de Oca*. (Tesis de Licenciatura en Derecho, Facultad de Derecho). Universidad de Costa Rica. San Jose..
- Vignola, R., Otarola, M., Majano, A. & Kilian, B. (2014). *Metodologia para la evaluacion del entorno politico, socioeconomico y ambiental para un programa de crecimiento verde e inclusivo: Estudio de caso en paisajes productivos de Costa Rica*. San Jose: CATIE, INCAE y Banco Mundial.
- Walsh, C., Roy, A., Feminella, J., Conttingham, P., Groffman, P. & Morgan, R. (2005). The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *J N Am Benthol Soc.* , 24, 706–223.
- Wender, S. (1999). *A review of scientific literature of riparian buffers width, extend and vegetation*. Institute of Ecology, University of Georgia, Athens, Georgia..



Determinación de los niveles de arsénico presentes en sistemas de abastecimiento de agua de las regiones Chorotega y Huetar Norte de Costa Rica, América Central

Arsenic levels present in water supply systems of Chorotega and Huetar Northern Regions of Costa Rica, Central America

Jorge Herrera-Murillo¹
Diana Mora-Campos²
Andrea Suarez-Serrano³
María Chaves-Villalobos⁴
Pablo Salas-Jiménez⁵
Alejandra Gamboa-Jiménez⁶
Deivis Anchia-Leitón⁷
Universidad Nacional, Costa Rica

- 1 Coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica, jorge.herrera.murillo@una.cr
- 2 Directora de Calidad del Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica diana.mora.campos@una.cr
- 3 Directora del Centro de Recursos Hídricos para Centroamérica y el Caribe, Sede Chorotega, Universidad Nacional, Costa Rica, andrea.suarez.serrano@una.cr
- 4 Investigadora del Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica maria.chaves.villalobos@una.cr
- 5 Director de Aguas del Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica, pablo.salas.jimenez@una.cr
- 6 Directora de Análisis Físicoquímicos del Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica, alejandra.gamboa@una.cr
- 7 Investigador del Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica, deivis.anchia.leiton@una.cr

Este artículo corresponde a la ponencia presentada en el I Congreso Centroamericano de Ciencias de la Tierra y el Mar, realizado en San José, Costa Rica, del 13 al 16 de noviembre de 2017.

Resumen

Se determinaron las concentraciones de Arsénico (As) presentes en muestras de agua para uso y consumo humano recolectadas en 106 operadores comunales de sistemas de abastecimiento en las regiones Chorotega y Huetar Norte de Costa Rica durante 2013-2017. A las muestras que registraron concentraciones de As por encima de la norma nacional se le evaluaron los restantes parámetros incluidos en el nivel N2 del Reglamento para agua potable de Costa Rica. La determinación de arsénico se hizo utilizando espectrometría de absorción atómica con horno de grafito. Los principales incumplimientos se registraron en los distritos de Bagaces y Cañas mientras que en la Región Huetar Norte se presentan en Agua Zarcas y Los Chiles. En estos distritos se registra un nivel de incumplimiento de la norma nacional (10 µg/l) que varía desde 66,7 % en el caso de Los Chiles hasta un 50 % en Cañas. Los sistemas que presentan incumplimientos no registraron variaciones temporales significativas en las concentraciones de As en el periodo 2013-2017. Al analizar los parámetros de correlaciones significativas registradas entre el As y las otras especies analizadas se obtiene información valiosa relacionada con los procesos hidrogeoquímicos que determinan la presencia de este metaloide.

Palabras clave: Arsénico, agua para consumo humano, Costa Rica, Región Chorotega, Región Huetar Norte

Abstract

Arsenic (As) concentrations in water samples for human consumption and use were determined in 106 communal supply system operators in the Chorotega and Huetar Norte regions of Costa Rica during 2013-2017. The samples that recorded As concentrations above the national standard were evaluated for the remaining parameters included in level N3 of the Regulation for drinking water of Costa Rica. The determination of arsenic was made using atomic absorption spectrometry with graphite furnace. The main non-compliances were registered in the districts of Bagaces and Cañas, while in the Huetar Norte region they are presented in Agua Zarcas and Los Chiles. In these districts there is a level of non-compliance with the national standard (10 µg / l) that varies from 66.7% in the case of Los Chiles to 50% in Cañas. The systems that present breaches by As did not register significant temporal variations in the 2013-2017 period. When analyzing the parameters of significant correlations recorded between the As and the other species analyzed, valuable information is obtained related to the hydrogeochemical processes that determine the presence of this metalloid.

Keywords: Arsenic, drinking water, Costa Rica, Chorotega Region, Huetar Norte Region

Introducción:

El arsénico (As) es un elemento metaloide que se distribuye ampliamente y su presencia en el medio ambiente podría deberse a fuentes naturales provenientes de la erosión de rocas y sedimentos, procesos de formación de minerales con origen hidrotérmico, erupciones volcánicas y actividad geotérmica (Abejón & Garea, 2015). Adicionalmente, es utilizado a nivel industrial para el tratamiento de la madera, la elaboración de pigmentos y el procesamiento de semiconductores. El arsénico y sus compuestos se acumulan en animales y plantas y se diseminan a través

de las cadenas alimenticias, dañando el medioambiente ecológico y a los seres humanos (IARC, 2009). Posee varios estados de valencia, variando desde 0 (As), -3 (AsH₃), a +3 (As₂O₃) o +5 (Na₃AsO₄) (Liang, 2007). El As en aguas subterráneas naturales, existe como arseniato, As (V) y arsenito, As (III). En condiciones de reducción, la especie predominante es el arsenito (H₃AsO₃) en un amplio rango de pH. La movilización de arsénico se controla con frecuencia mediante equilibrios de adsorción / desorción y las condiciones de redox y pH (Smedley, 2008).

La toxicidad de este elemento en los seres humanos depende de sus formas químicas, donde tanto las especies orgánicas como inorgánicas trivalentes son tóxicos más potentes que las pentavalentes (IARC, 2009). Es catalogado como un carcinógeno humano de clase 1, al cual se encuentran asociados una amplia gama de efectos agudos y crónicos sobre la salud. La principal fuente de exposición al arsénico es el agua potable (Chung et al., 2014), ya que este migra fácilmente del suelo contaminado al agua subterránea dependiendo de las condiciones geoquímicas (Michael, 2013). La exposición a altas concentraciones de este elemento en el agua potable (> 150 µg /L) está relacionada con un mayor riesgo de padecer enfermedades crónicas de diversas naturalezas: cardiovasculares, gastrointestinales, vasculares, respiratorios; diabetes mellitus; embarazo adverso y varios tipos de cáncer, incluidos: vejiga, pulmón, piel no melanoma, riñón e hígado (Bardach et al., 2015; Huang et al., 2015; Monrad et al., 2017; Wang et al., 2014).

A nivel latinoamericano, las estimaciones de la Organización Panamericana de la Salud indican que al menos 4 500 000 de personas están expuestas permanentemente a niveles de arsénico en agua que ponen en riesgo su salud. Así, por ejemplo, en Argentina, Chile, México, Perú, Nicaragua, Bolivia y Brasil, la presencia del arsénico se debe mayoritariamente a factores naturales de origen geológico así como a diversas actividades antropogénicas que incluyen la explotación minera, la refinación y los procesos electrolíticos de producción de metales y en menor proporción la agricultura a través de la utilización de plaguicidas arsenicales orgánicos (Castro de Esparza, 2006)

En el año 2012, el Gobierno de Costa Rica mediante el Decreto Ejecutivo N° 37072-S declaró emergencia sanitaria para poder atender la problemática generada por la presencia de arsénico en agua para uso y consumo humano en 24 comunidades de la Región Huetar Norte y la

provincia de Guanacaste, situación que afecta como mínimo a 12 mil personas, dada la toxicidad de este contaminante. Sin embargo, es importante aclarar que la magnitud real del problema se desconoce a ciencia cierta dados los escasos estudios existentes a nivel regional y nacional, así como a la incapacidad económica de los operadores de agua de poder realizar estudios de monitoreo de la calidad del agua que incluyan metales pesados y otros contaminantes orgánicos en forma regular.

En este artículo se presentan los datos de un diagnóstico realizado por el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional en un número representativo de operadores de servicios de abastecimiento de agua ubicados en las regiones Chorotega y Huetar Norte, con el fin de generar información base que permita orientar la toma de decisiones en procura de garantizar la reducción del riesgo de la población que pudiera estar expuesta a este contaminante.

Metodología

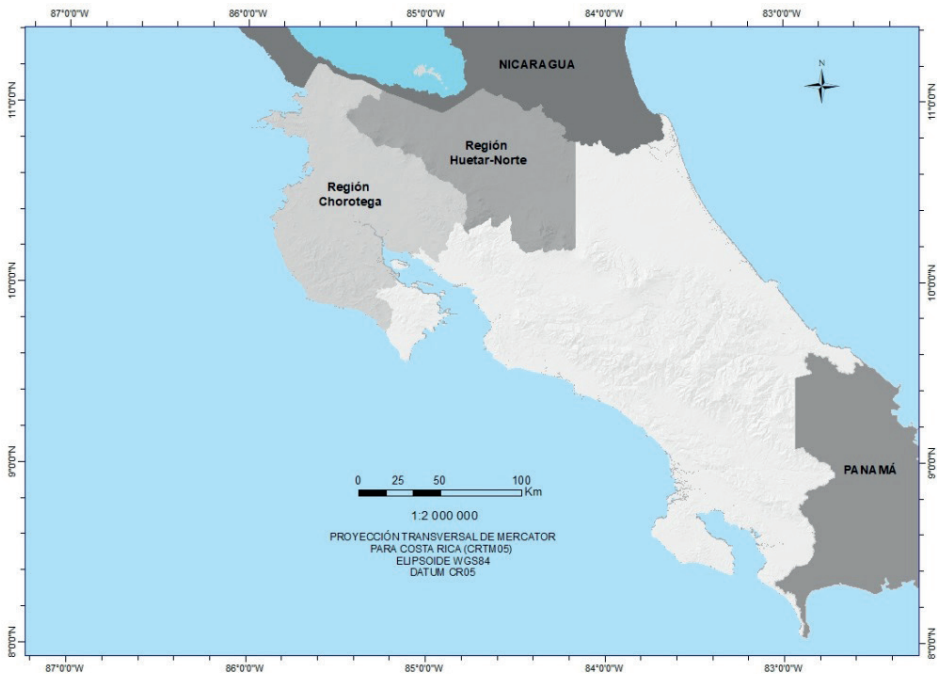
Área de estudio

La Región Huetar Norte limita al norte con Nicaragua, al sur con la región Central, al este con la región Huetar Atlántica y al oeste con la región Chorotega (Figura 1). Está conformada por los cantones de Sarapiquí de la provincia de Heredia, San Carlos, Guatuso, Los Chiles, Upala y por los distritos de Sarapiquí del cantón de Alajuela, Río Cuarto del cantón de Grecia y Peñas Blancas del cantón de San Ramón, de la Provincia de Alajuela (Zavallos V, 2013). La población de la región es de 304 088 habitantes, según el censo del 2011 y posee una extensión de 9 803.4 km² (18 % del territorio nacional), es decir, una densidad poblacional de 31 habitantes por km², representando el 7.1 % de la población del país. Las mayores concentraciones poblacionales se encuentran en San Carlos, Sarapiquí, y Upala. (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2011).

Posee un clima tropical con una precipitación variable que oscila entre 2 000 mm/año en las llanuras de Guatuso, Upala y Los Chiles y hasta 5 000 mm/año, en los macizos volcánicos. Predominan los órdenes de suelos como inceptisol, andisoles, alfisoles y ultisoles. En cuanto a la geomorfología, en la región se encuentran formaciones como Machuca (Oligoceno), Venado (Mioceno Medio) y Aguacate (Neógeno), en las cuales se encuentran lahares de la formación buena vista y piroclastos del volcán Arenal

en el periodo terciario Inferior y Cuaternario. En la región se encuentran andesitas, basaltos y aglomerados como producto de la actividad volcánica. (Bergoing, 2007)

Figura 1. Localización del área de estudio para la determinación de As en sistemas de abastecimiento de agua



La Región Chorotega se ubica al norte del país, y sus límites son al norte con Nicaragua, al sur y al oeste con el Océano Pacífico, y al este con la provincia de Puntarenas y región Huetar Norte. En ella se incluye a la Cordillera Volcánica de Guanacaste, las llanuras del Tempisque, los cerros de Nicoya y las llanuras costeras (Figura 1). Tiene una extensión de 10 140 kilómetros cuadrados (20 % del territorio nacional), y está dividido políticamente en once cantones: Liberia, Bagaces, Abangares, Tilarán, Cañas, Santa Cruz, Carrillo, Nicoya, Nandayure, Hojanca y La Cruz, siendo Liberia y Santa Cruz los cantones con mayor cantidad de habitantes. La población total es de 326 953 habitantes, es decir, se cuenta con una densidad de población de 32 habitantes por kilómetro cuadrado.

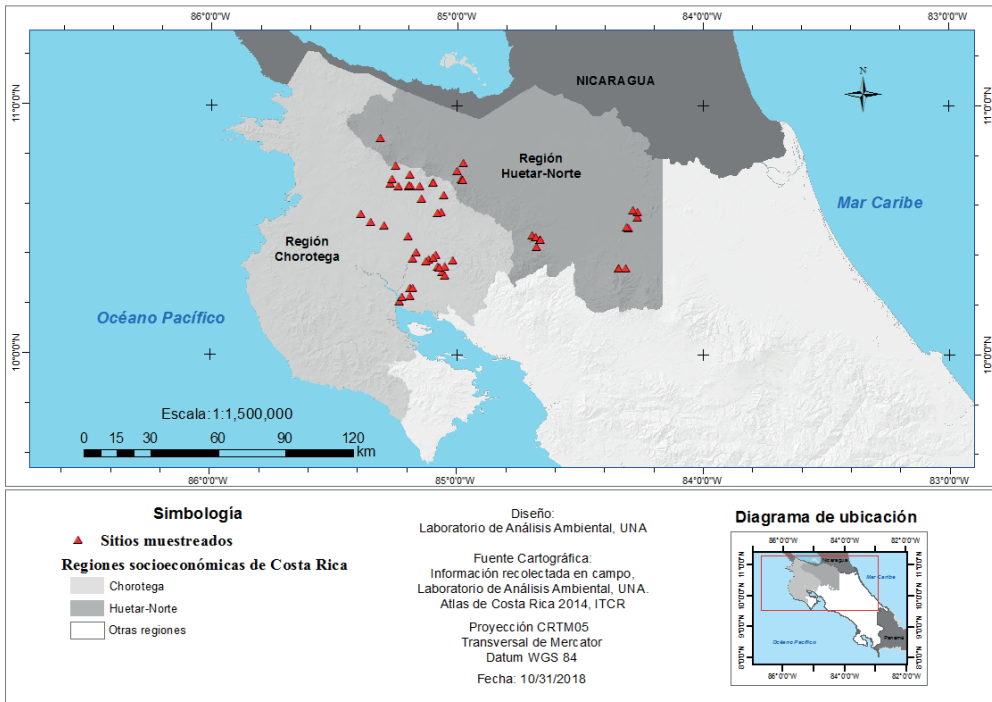
El clima de la región es tropical seco con dos épocas bien definidas y una precipitación anual promedio que oscila entre los 1 500 y 2 000 mm. La región se caracteriza por presentar tres unidades de relieve: Cordilleras Volcánicas de Guanacaste y Tilarán, las serranías del complejo de Nicoya y áreas plano onduladas (unidad conformada por depósitos de ignimbritas). Los tipos de rocas que predominan en la región son de origen volcánico y destacan lavas, brechas, tobas e ignimbritas, del Mioceno-Plioceno, las cuales se encuentran cubiertas de cenizas, principalmente, en las partes altas (Kussmaul, 2000).

Muestreo

Se recolectaron muestras simples de agua para uso y consumo humano en un total de 106 operadores comunales de sistemas de abastecimiento ubicados en las Regiones Chorotega y Huetar Norte durante el período comprendido entre marzo 2013-diciembre 2017 (Figura 2). La distribución de las muestras tomadas se puede observar en la tabla N°1. Cada uno de los sistemas fue encuestado y se procedieron a identificar la naturaleza y cantidad de fuentes de abastecimiento, georreferenciando cada una de ellas.

En cada fuente se colectaron dos muestras, la primera para el análisis de metales en botellas de polietileno de alta densidad, previamente lavadas con detergente, enjuagadas con agua desionizada y por último colocadas en un baño de ácido nítrico al 5 % durante 24 horas. Para su conservación, cada una de estas muestras fue acidificada con 250 μ L de ácido nítrico (ácido nítrico al 65 % (v / v)) por cada 125 mL de muestra. La segunda muestra se colectó en un recipiente de polietileno de 1 L para el análisis de otros parámetros fisicoquímicos como: color, turbiedad, conductividad, nitrato, cloruro, sulfato, fluoruro y dureza total. Después de la recolección, ambas muestras fueron rápidamente transportadas en una nevera portátil al laboratorio. En cada uno de los muestreos se incluyeron blancos de transporte y muestreo con el fin de identificar posibles fuentes de contaminación cruzada.

Figura 2. Distribución geográfica de los operadores de servicios de abastecimiento de agua muestreados.



Análisis Químicos:

La determinación de arsénico y los otros metales (plomo, cobre, cromo, níquel, hierro y aluminio) se hizo utilizando espectrometría de absorción atómica con horno de grafito (Perkin Elmer Analyst 700). Para la cuantificación de las muestras se utilizaron disoluciones estándar de 1000 mg/l trazables al NIST, a partir de las cuales se elaboraron curvas de calibración compuestas por 7 patrones en el rango de 5 a 50 $\mu\text{g/l}$. Como mecanismos de control de calidad, se analizaron blancos de reactivos y muestreo, obteniendo como resultado en todos los casos valores menores al límite de detección del método.

Tabla 1. Distribución de las muestras de agua para uso y consumo humano colectadas de 2013-2017.

Región	Cantón	Distrito	Número de entes operadores	Número de muestras
Chorotega	Bagaces	Bagaces	16	238
		La Fortuna	4	40
		Mogote	5	50
		Río Naranjo	2	8
	Cañas	Cañas	10	186
		Palmira	2	8
		San Miguel	3	28
		Bebedero	2	8
		Porozal	7	28
	Abangares	Abangares	9	36
Upala	Upala	1	10	
Huetar Norte	San Carlos	Monterrey	2	8
		Fortuna	2	8
		Venecia	2	15
		Agua Zarcas	10	65
		Pital	2	18
		Ciudad Quesada	7	41
		Florescencia	8	45
		Palmera	2	11
	Guatuso	Guatuso	3	15
	Los Chiles	Los Chiles	3	29
El Amparo		2	17	
Total			104	912

Fuente: Elaboración propia

La exactitud del análisis químico de metales se comprobó periódicamente mediante el análisis de muestras enriquecidas. Un sesgo general entre -8 y 12 % se obtuvo para las concentraciones de metales medidas en muestras enriquecidas.

El análisis de las especies iónicas (F^- , Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-}) se realizó por cromatografía iónica con supresión de conductividad usando un equipo de Dionex ICS- 3000 con una bomba cuaternaria y tubería de microboro. Las muestras se filtraron utilizando una jeringa con un filtro de tamaño de poro de 0,45 μm . Cada 20 muestras, se preparó una curva de calibración fresca y

se analizó una disolución de control de calidad de 5 mg^l⁻¹ preparada a partir de una muestra sintética DIONEX certificada como control de calidad.

Para cada método de análisis empleado se determinaron los límites de detección, preparando 10 muestras de blancos independientes, fortificados a la menor concentración aceptable, los cuales fueron leídos y sus señales fueron interpoladas en una curva de calibración elaborada con patrones ubicados dentro del ámbito lineal del método. El límite de detección se obtuvo como la media de la señal del blanco +3 veces la desviación estándar de la señal de los blancos fortificados. Este enfoque asume que una señal más 3 veces la desviación estándar sobre el valor del blanco podría surgir del blanco menos de 1 % de las veces, y por lo tanto es probable que haya surgido de algo más, como del mensurando. En la tabla 2, se muestra la referencia de los métodos utilizados, así como los respectivos límites de detección.

Tabla 2. Métodos de análisis químicos utilizados con sus respectivos parámetros de mérito.

Analito	Método	Límite de detección	Límite de Cuantificación
Arsénico	SMEWW-APHA-AWWA-WEF: 3113 B; Absorción atómica por horno (GFAAS)	1,0 µg/l	3,0 µg/l
Plomo		2,0 µg/l	4,0 µg/l
Cobre		0,7 µg/l	0,9 µg/l
Aluminio		0,9 µg/l	2,0 µg/l
Hierro		1,0 µg/l	2,0 µg/l
Sodio	SMEWW-APHA-AWWA-WEF: 3111 B; Absorción atómica por llama (FAAS)	0,02 mg/l	0,07 mg/l
Potasio		0,1 mg/l	0,2 mg/l
Calcio		0,01 mg/l	0,1 mg/l
Magnesio		0,09 mg/l	0,10 mg/l
Zinc		0,06 mg/l	0,10 mg/l
Fluoruro	SMEWW-APHA-AWWA-WEF: 4110 B; Cromatografía de Iones	0,08 mg/l	0,09 mg/l
Cloruro		0,09 mg/l	0,20 mg/l
Nitrato		0,09 mg/l	0,15 mg/l
Sulfato		0,1 mg/l	0,3 mg/l
Conductividad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF: 2510 B; Electroquímico	NA	NA
Turbiedad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF: 2130 B; Nefelométrico	NA	NA
Color	SMEWW-APHA-AWWA-WEF: 2120 C Espectrofotometría UV-Vis	0,02 UC	0,08 UC

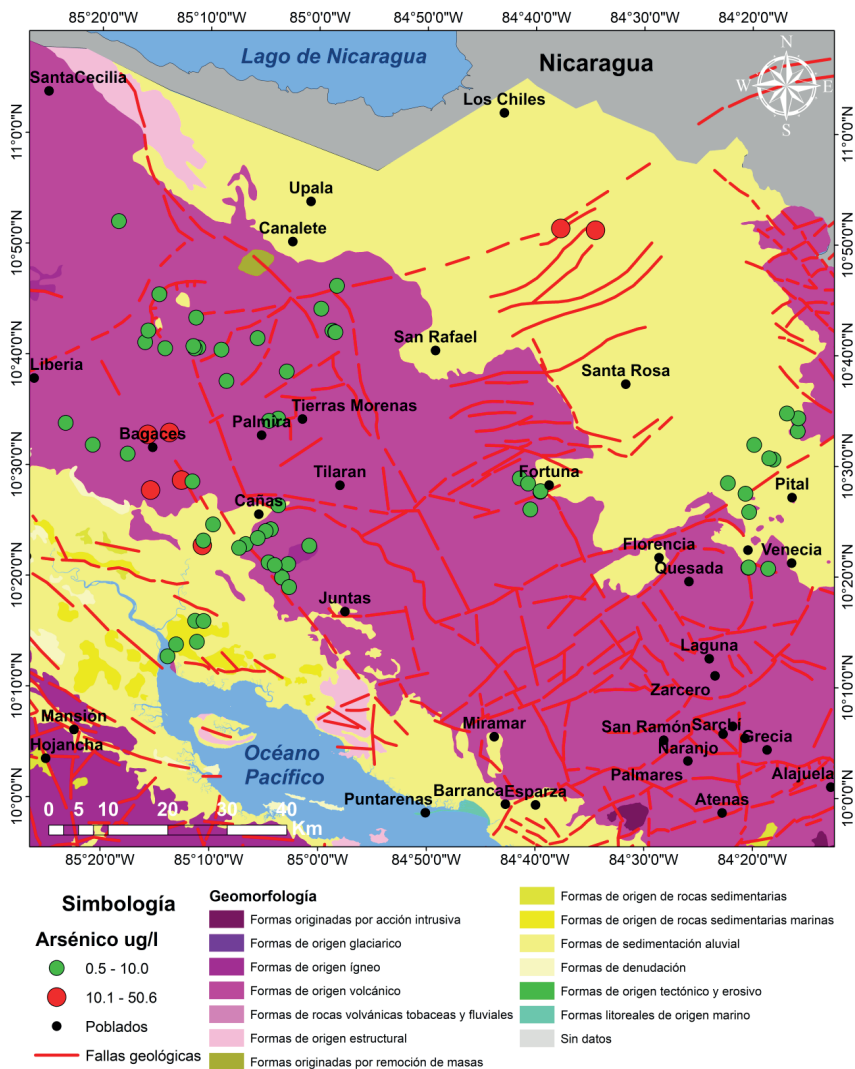
Fuente: Elaboración propia

Resultados

En la tabla 3 se presenta la distribución de los resultados obtenidos de arsénico para los sistemas evaluados. Tal como se puede apreciar en la Región Chorotega, los principales incumplimientos se registraron en los distritos de Bagaces y Cañas mientras que en la Región Huetar Norte se presentan en Agua Zarcas y Los Chiles. En estos distritos se registra un nivel de incumplimiento de la norma nacional ($10 \mu\text{g/l}$) que varía desde 66,7 % en el caso de Los Chiles hasta un 50 % en Cañas. Al analizar la geología de ambas regiones, se puede visualizar que los sitios que presentan incumplimientos en Bagaces y Cañas se ubican sobre depósitos de ignimbritas del cuaternario (Figura 3), mientras que los localizados en Los Chiles corresponden a formas de denudación, siendo así que las muestras con concentraciones mayores a $10 \mu\text{g/l}$, se localizan sobre estructuras geológicas de origen volcánico. Al correlacionar la geología con los sistemas de fallas en la zona de estudio, se identifica que las muestras de Los Chiles se ubican sobre un sistema de fallas asociados al Escarpe de Hess. Mientras que en el caso de Bagaces y Cañas, de igual forma, los puntos con valores más altos en las concentraciones de arsénico se ubican cerca de fallamientos geológicos locales.

Como parte del desarrollo del presente estudio, en aquellos sistemas donde se registraban incumplimientos en los niveles de As, se monitorearon varias veces a lo largo de la vigencia del proyecto con el fin de analizar las posibles variaciones temporales. Tal como se puede apreciar en la tabla 4, las concentraciones de As registradas en algunos de los sistemas que presentan incumplimientos tienden a ser relativamente estables en el tiempo.

Figura 3. Distribución de los sitios de muestreo que presentan incumplimientos en la concentración de As de acuerdo con su geomorfología.



Proyección WGS84, Datum: DWGS84, Fuente: Laboratorio Analisis Ambiental de la Universidad Nacional, Atlas Costa Rica 2014. Elaboración: Geog. Carlos Méndez. 2018.

Tabla 3. Distribución de los niveles de arsénico registrados en los sistemas de abastecimiento de agua muestreados en la Región Chorotega y Huetar Norte, 2013-2017.

Región	Cantón	Distrito	Porcentaje de sistemas según nivel de concentración de As				
			<3 µg/l	3–10 µg/l	10,1–20 µg/l	20,1–30 µg/l	30,1–50 µg/l
Chorotega	Bagaces	Bagaces	18,8	25	37,5	6,2	12,5
		La Fortuna	100				
		Mogote	80	20			
	Cañas	Río Naranjo	100				
		Cañas	40	10	50		
		Palmira	100				
		San Miguel	66,6	33,3			
		Bebedero	100				
		Porozal	85,7	14,3			
		Abangares	100				
Upala	100						
Huetar Norte	San Carlos	Monterrey	50	50			
		Fortuna	50	50			
	Guatuso	Venecia	50	50			
		Agua Zarcas	35	20	20	15	10
		Pital	100				
		Ciudad Quesada	100				
		Florencia	87,5	12,5			
		Palmera		100			
		Guatuso	66,7	33,3			
		Los Chiles		33,3	66,7		

Fuente: Elaboración propia

Lo anterior pudiera ser un indicativo del origen natural del As encontrado, ya que la geoquímica del agua, así como la composición mineral de los materiales que rodean el acuífero juegan un rol fundamental en los procesos que determinan la concentración del As en las aguas subterráneas. En general, la química de los sistemas de agua subterránea es lenta en cambiar, cuando dominan exclusivamente procesos naturales en comparación con el comportamiento de las fuentes antropogénicas de contaminación.

Tabla 4. Distribución temporal de los niveles de Arsénico presente en fuentes de abastecimiento de una muestra de operadores de servicio de agua para uso y consumo humano en las Regiones Chorotega y Huetar Norte, 2013-2017.

Región	Cantón	Distrito	Nombre del operador	Tipo de fuente de abastecimiento	Concentración de As (µg/l)				
					2013	2014	2015	2016	2017
Chorotega	Bagaces	Bagaces	Falconiana	Pozo	24	26	28	25	-
			Aguacaliente	Pozo	14	16	17	16	-
			El Arbolito	Pozo	20	15	18	15	-
			El Chile	Pozo	17	14	12	14	-
			El Recreo	Pozo	36	40	41	44	-
	Cañas	Cañas	Bebedero	Pozo	-	15	16	18	21
			Javillas	Pozo	14	15	17	16	-
Huetar Norte	San Carlos	Agua Zarcas	Vuelta de Kooper	Pozo	-	39	31	34	36
			Los Chiles	Pozo	-	44	42	47	-
	Los Chiles	Los Chiles	Santa Cecilia	Pozo	-	16	18	16	-
			Cristo Rey	Pozo	-	13	16	17	-
			Los Chiles	Pozo	-	18	15	15	-

Fuente: Elaboración propia

Para cada uno de los sistemas monitoreados que registraron incumplimientos, se realizó una evaluación del riesgo producto de las concentraciones de As encontradas para niños de 12 años de edad, utilizando el factor para la exposición no carcinogénica, de acuerdo con la siguiente ecuación (Baig et al., 2011):

$$HQ = \frac{EDI}{RfD}$$

Donde RfD es el valor de referencia de toxicidad oral para As ($3,04 \times 10^{-4}$ mg / kg / día), y la dosis estimada de ingesta diaria (EDI) (mg / kg / día) se calculó de la siguiente manera:

$$EDI = \frac{(C \times IR \times EF \times ED)}{(BW \times AT)}$$

Donde C es la concentración de As en agua (mg / L), IR la tasa de admisión (L/día), EF la frecuencia de exposición (día / año), ED la duración de la exposición (año), BW el peso corporal (kg), y AT en el tiempo promedio de edad (días). De acuerdo con la literatura, no se observan efectos adversos para la salud si la HQ calculada es < 1 (USEPA, 1998). El dato de peso corporal de los niños de 12 años se obtuvo del Primer Censo Escolar Peso y Talla de Costa Rica: año 2016, realizado por el Ministerio de Educación Pública. En la Tabla 5 se muestra que para todos los operadores de servicios de abastecimiento donde se registraron excedencias a los límites contenidos en la normativa nacional, se reportan valores de HQ que podrían acarrear efectos adversos para la salud de los niños por ingesta del agua.

Para aquellos sistemas de abastecimiento, cuyas muestras de agua presentaron incumplimientos por As, en las regiones de estudio se realizó el análisis de los restantes parámetros fisicoquímicos incluidos en el nivel N2 del Reglamento para la calidad del Agua Potable de Costa Rica, Decreto 38924-S indicados en la tabla 2. Al aplicar la prueba de Anderson-Darling, para evaluar la normalidad de todos los parámetros medidos se encontró que el 100% siguen una distribución no normal ($p < 0,05$). En la Tabla 6, se muestran los principales resultados de los restantes parámetros químicos analizados en las muestras con incumplimientos.

La principal fuente de iones disueltos en la mayoría de los sistemas acuáticos es la meteorización de los minerales formadores de rocas, sin embargo, las fuentes atmosféricas y antropogénicas contribuyen a la forma en la que estos constituyentes se encuentran presentes en los recursos hídricos (Zhang et al., 2008). De acuerdo con los resultados del análisis, se puede observar que el orden de la mayor abundancia de aniones es $Cl^- > SO_4^{2-} > NO_3^-$ en las muestras de aguas recolectadas en la región Chorotega

Tabla 5. Factor de riesgo por consumo de agua en niños de 12 años en los sistemas de abastecimiento de agua con incumplimientos de As en las Regiones Chorotega y Huetar Norte.

Región	Distrito	Nombre del operador	IR (L/d)	Cn de As (mg/L)	ED (años)	BW (kg)	AT (días)	EDI (mg/kg/d)	HQ
Chorotega	Bagaces	Falconiana	1,5	0,025	12	45,6	4380	0,00082	2,71
		Aguacaliente		0,016				0,00053	1,73
		El Arbolito		0,015				0,00049	1,62
		El Chile		0,014				0,00046	1,51
	Cañas	El Recreo	0,044	0,00145	4,76				
		Bebedero	0,018	0,00059	1,95				
		Javillas	0,016	0,00053	1,73				
Huetar Norte	Agua Zarcas	Vuelta de Kooper	0,034	0,00112	3,68				
		Los Chiles	0,047	0,00155	5,09				
	Los Chiles	Santa Cecilia	0,016	0,00053	1,73				
		Cristo Rey	0,017	0,00056	1,84				
		Los Chiles	0,015	0,00049	1,62				

Fuente: Elaboración propia

mientras que en Huetar Norte la secuencia corresponde a $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$. La secuencia de cationes es $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ en las muestras de agua para ambas regiones. El calcio y el magnesio son elementos abundantes en las aguas subterráneas y son, además, los principales contribuyentes a la dureza del agua.

La principal fuente de estos elementos en las aguas subterráneas es la erosión de las rocas, como la piedra caliza y la dolomita, y minerales como la calcita, el yeso y la magnesita (Kumar et al., 2015). Al determinar los patrones de correlación de Spearman entre las variables medidas, se detectó una correlación positiva débil entre As y SO_4^{2-} . Esta asociación sugiere que el As disuelto presente en las muestras de agua no se pudo haber originado de la oxidación de minerales de sulfuro en los acuíferos (Choudhury et al., 2017). Otras correlaciones muy débiles se registraron entre As-Fe y As-Mn, que son componentes sensibles a redox, lo que puede usarse para inferir que la movilización de As tiene lugar a través de diferentes mecanismos, tales como la reducción del SO_4^{2-} y la desorción de óxidos de metal (óxidos de Fe y Mn) a las condiciones de pH presente en las muestras. La correlación entre As y F^- resultó ser significativa (0,748) lo que puede ser explicado debido al hecho de algunos iones coexistentes en el agua pueden inhibir o facilitar la adsorción de arsénico. De esta forma los aniones como Cl^- , F^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- pueden aumentar el contenido de arsénico en las aguas subterráneas (Baig et al., 2011).

Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos obtenidos en las muestras de agua con incumplimiento de As colectadas en sistemas de las regiones de estudio, 2013-2017.

Región	Distrito	Nombre del operador	pH	Cond µS/cm	F- (mg/L)	Cl- (mg/L)	NO3- (mg/L)	SO4 2-(mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Al (µg/L)	Fe (µg/L)	Mn (µg/L)
Chorotega	Bagaces	Falconiana	6,25	167	0,45	7,17	3,25	3,80	16	6,2	2,31	2,84	43	55	23
		Aguacaliente	6,36	426	0,37	16,3	1,52	5,62	5,4	13,3	4,29	6,80	35	169	40
		El Arbolito	6,56	175	0,35	5,45	2,77	3,14	16	6,8	2,16	4,05	27	82	35
	Cañas	El Chile	6,42	183	0,30	5,82	2,63	3,26	15	5,4	2,25	2,70	33	64	30
		El Recreo	6,31	192	0,42	6,37	3,04	3,39	14	6,7	2,41	2,95	45	57	38
		Bebedero	6,45	312	0,48	12,5	3,47	7,35	28	4,5	5,11	7,05	106	74	39
Huetar Norte	Agua Zarcas	Javillas	6,23	250	0,52	4,51	2,84	5,10	10	1,9	6,35	8,42	88	70	157
		Vuelta de Kooper	6,51	259	0,34	3,38	1,55	4,74	9,4	6,32	5,24	5,90	62	84	76
	Los Chiles	Los Chiles	6,60	161	0,28	3,67	1,59	5,62	7,3	5,1	3,45	4,20	53	67	39
		Santa Cecilia	6,43	175	0,33	3,04	2,15	4,62	8,3	4,8	3,18	4,16	36	77	47
		Cristo Rey	6,56	194	0,21	3,49	1,85	5,03	9,6	5,5	3,59	4,53	44	65	55
	Los Chiles	Los Chiles	6,38	180	0,27	3,65	5,71	10,3	6,2	2,96	4,72	48	82	71	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Correlaciones de Spearman para los parámetros evaluados en las muestras de agua con incumplimiento de As en los sistemas de la Región Chorotega, 2013-2017.

	pH	As	Cond	Turb	Temp	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Dureza	Na	K	Ca	Mg	Al	Fe	Mn		
As	-0,251																		
Cond	-0,757	0,417																	
Turb	0,402	0,326	-0,075																
Temp	-0,051	0,153	0,119	0,758															
F ⁻	-0,053	0,748	0,472	0,161	-0,208														
Cl ⁻	-0,269	-0,017	0,361	-0,173	0,197	-0,229													
NO ₃ ⁻	0,191	0,104	-0,362	0,338	0,509	-0,212	0,183												
SO ₄ ²⁻	-0,319	0,641	0,621	0,414	0,379	0,553	-0,098	-0,073											
Dureza	-0,738	0,654	0,567	-0,042	0,305	0,161	0,378	0,224	0,318										
Na	0,176	0,318	-0,126	-0,071	-0,34	0,089	0,333	0,017	-0,303	0,167									
K	-0,084	-0,385	0,092	0,366	0,604	-0,501	0,152	-0,009	0,396	-0,042	-0,336								
Ca	-0,633	0,217	0,204	-0,365	0,034	-0,241	0,294	-0,017	0,089	0,562	0,159	0,201							
Mg	-0,701	0,367	0,352	-0,167	0,186	-0,178	0,353	-0,017	0,151	0,833	0,268	0,226	0,933						
Al	0,237	-0,458	-0,271	-0,392	-0,345	-0,181	-0,145	-0,456	-0,325	0,783	-0,383	-0,034	-0,017	-0,271					
Fe	-0,435	0,505	0,705	0,171	0,372	0,247	0,755	-0,018	0,445	0,635	0,288	0,214	0,383	0,521	-0,328				
Mn	0,083	0,567	-0,033	-0,418	-0,644	0,526	-0,286	-0,311	-0,317	-0,133	0,042	-0,879	-0,215	-0,305	0,441	-0,274			
Cu	-0,548	0,548	0,411	-0,555	-0,557	0,439	0,069	-0,425	0,092	0,548	0,413	-0,553	0,548	0,548	0,095	0,286	0,548		0,548

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

Las concentraciones de As encontradas en algunos entes operadores de sistemas de abastecimiento de aguas de las regiones Chorotega y Huetar Norte superan la norma nacional de 10 $\mu\text{g/l}$ y representan un riesgo significativo a la salud para aquellos habitantes que la consumen, especialmente para los niños. Sin embargo, por informes del AyA desde el año 2010 se inició la determinación de As en algunos de los sitios de estudio, esto quiere decir que el riesgo por exposición (e ingesta) de agua para consumo contaminada podría ser mucho mayor que la estimada. Por lo que, es recomendable realizar estudios epidemiológicos en las zonas para conocer realmente el estado de salud actual de las personas expuestas, sobre todo aquellas más vulnerables.

El patrón de correlaciones registrado con otros parámetros medidos podría indicar que la movilización de As tiene lugar a través de diferentes mecanismos, tales como la reducción del SO_4^{2-} y la desorción de óxidos de metal (óxidos de Fe y Mn) a las condiciones de pH presente en las muestras. Adicionalmente, el comportamiento de las concentraciones de As en las fuentes a través del tiempo hace presumir que estas son determinadas por procesos naturales en ausencia de fuentes antropogénicas importantes.

Se considera que para el desarrollo de futuras investigaciones sería conveniente indagar en las características geoquímicas y la variabilidad espacial de materiales geológicos y edáficos, así como generar conocimientos sobre los mecanismos y las formas de especiación del ion arsénico en el agua subterránea.

Referencias

- Abejón, R. & Garea, A. (2015). A bibliometric analysis of research on arsenic in drinking water during the 1992-2012 period: An outlook to treatment alternatives for arsenic removal. *Journal of Water Process Engineering*. 6, 105-119.
- Baig, J.A., Kazi, T.G., Shah, A.Q., Afridi, H., Khan, S., Kolachi, N., Kandhro, G. & Wadhwa, S. (2011). Evaluation of toxic risk assessment of arsenic in male subjects through drinking water in southern Sindh Pakistan. *Biological Trace of Elements Research*, 143, 772-786.
- Bardach, A.E., Ciapponi, A., Soto, N.; Chaparro, M.R., Calderón, M. & Briatore, A. (2015). Epidemiology of chronic disease related to

- arsenic in Argentina: a systematic review. *Science of the Total Environment*, 538, 802-816.
- Castro, M. (2006) Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud pública. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS-SB/SDE/OPS). *Congreso International Ciudad de México*, 20-24 junio 2006.
- Choudhury, R., Mahanta, C., Verma, S. & Mukherjee. A. (2017). Arsenic distribution along different hydrogeomorphic zones in parts of the Brahmaputra River Valley, Assam (India). *Journal of Hydrogeology* 25,1153-1163.
- Chung, J.Y., Seung, Y. & Young, H. (2014). Environmental source of arsenic exposure. *Journal of Prevention Medical and Public Health*, 47, 253-257
- Huang, L., Wu, H. & van der Kuijp, T.J. (2015). The health effects of exposure to arsenic-contaminated drinking water: a review by global geographical distribution. *International Journal of Environmental Health Research*, 25, 432-452
- International Agency for Research on Cancer (IARC). (2009) Arsenic and Arsenic Compounds. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Vol. 100C-6*. International Agency of Research on Cancer, Lyon, France.
- Kumar, S.K., Logeshkumar, A., Magesh, N.S., Godson, P.S. & Chandrasekar, N. (2015) Hydrogeochemistry and application of water quality index (WQI) for groundwater quality assessment, Anna Nagar, part of Chennai City, Tamil Nadu, India. *Applied Water Sciences* 5:335–343
- Liang, Y. (2007) *Transformation and Bioavailability of Arsenic in Soil*. Huazhong Agricultural University.
- Michael, H.A. (2013). An arsenic forecast for China. *Science*, 341, 852-853
- Monrad, M., Ersbøll, A.K., Sørensen, M., Bastrup, R., Hansen, B., Gammelmark, A. (2017) Low-level arsenic in drinking water and risk of incident myocardial infarction: a cohort study. *Environmental Research*, 154, 318-324.
- Smedley, P.L. (2008). Sources and distribution of arsenic in groundwater and aquifers. C.A.J. Appelo (Ed.), *Arsenic in Groundwater: A World*

Problem, Proceedings of the IAH. Seminar, Utrecht, Netherlands
(2008), 4-32

Wang, W., Cheng, S. & Zhang, S. (2014). Association of inorganic arsenic exposure with liver cancer mortality: a meta-analysis. *Environmental Research*, 135, 120-125.

United States Environmental Protection Agency (US EPA) (1998). *Integrated Risk Information System: Arsenic, Inorganic*. CASRN; 7440-38-2.

Zhang, Q., Kang, S., Wang, F., Li, C. & Xu, Y. (2008) Major ion geochemistry of Nam Co Lake and its sources, Tibetan Plateau. *Aquatic Geochemistry* 14(4):321–336



Sismo de Capellades 01 diciembre 2016, Cartago, Costa Rica

Capellades earthquake 2016-12-01, Cartago, Costa Rica

Ronnie Quintero-Quintero¹
Hernán Porras-Hernández²
Universidad Nacional, Costa Rica

Resumen

En este trabajo se hace una descripción de la fuente sísmica del sismo de Capellades, provincia de Cartago, Costa Rica, del 1 de diciembre de 2016, 00:25:20 hora UTC. Se estudian los parámetros de la fuente, centroide, momento, magnitud, mecanismo focal; así como hypocentro de las réplicas y sus magnitudes. También se hace una descripción de la sismicidad en la zona epicentral antes del sismo de Capellades. Los datos usados en el análisis fueron registrados por la red sísmica del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica de la Universidad Nacional (OVSICORI-UNA) y el Laboratorio de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica (LIS-UCR). El sismo principal se localizó con una profundidad hipocentral de 3.0 km, 3.7 km al NNO de Capellades, con una magnitud (M_w) de 5.2. Éste sismo se ubica entre los volcanes Turrialba e Irazú; Cordillera Volcánica Central de Costa Rica. La solución del tensor de momento indica una falla transcurrente dextral, casi vertical (buzamiento 82°), rumbo 155° y deslizamiento 174° ; con un centroide a 6 km de profundidad. El eje de presión está indicado por un strike y dip de $21^\circ/1^\circ$; es decir, con una dirección SSO-NNE y el de tensión de $111^\circ/10^\circ$; indicando una tensión en la dirección SEE-NOO. En general, el mecanismo focal obtenido usando inversión de ondas o el impulso de los primeros arribos indican una falla transcurrente, con ejes de presión y tensión horizontales en concordancia con los esfuerzos de otros eventos sísmicos intraplaca moderados y ligeros que han ocurrido en el

- 1 Académico, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. Correo electrónico: rquinter@una.cr
- 2 Académico, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. Correo electrónico: porrashernan@gmail.com

Este artículo corresponde a la ponencia presentada en el I Congreso Centroamericano de Ciencias de la Tierra y el Mar, realizado en San José, Costa Rica, del 13 al 16 de noviembre de 2017.

arco volcánico central de Costa Rica. En 5 días de actividad sísmica, en la zona comprendida entre 9.9 y 10.12 latitud norte, 83.9 y 83.72 longitud oeste, se localizaron 1923 sismos; todas las réplicas con magnitudes menores a 4.0 grados en la escala Richter. La relocalización de las réplicas muestra una tendencia epicentral con dirección NO-SE, con buzamiento al SO y concentrada en un área de 32 km². El rumbo de 155° coincide con la tendencia mostrada por los epicentros de las réplicas, lo que indica el azimut de traza de la falla. La zona del Irazú-Turrialba, donde ocurrió el sismo del 1 de diciembre 2016, mostró microsismicidad meses y años antes del sismo principal, pero no se tenía conocimiento de sismos similares a éste, en el área de ruptura.

Palabras clave: Costa Rica, Sismo Capellades, tensor de momento; réplicas

Abstract

In this work a seismic source description of the Capellades, Cartago province, Costa Rica earthquake, 2016-12-01 00:25:20 UTC time is made. We study the fault's parameters, centroid, moment, magnitude, focal mechanism and aftershocks hypocenter with respective magnitudes. We also made a seismicity description in the epicentral zone before the Capellades earthquake occurred. The seismic network of the Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica de la Universidad Nacional (OVSICORI-UNA) and the Laboratorio de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica (LIS-UCR) recorded the data used in the analysis. The main earthquake was located at 3.0 km depth, 3.7 km to the NNO of Capellades, with a magnitude (M_w) of 5.2. This earthquake was located between the Turrialba and Irazú volcanoes, Central Costa Rica Volcanic Arc. The moment tensor solution indicates a dextral strike-slip, almost vertical (dip 82°), strike 155° and slip 174°, with a centroid depth at 6 km. The pressure axis was calculated with a strike and dip of 21°/1°, with an SSO-NNE direction and the tension axis with strike and dip of 111°/10°, indicating a tension in the SEE-NOO direction. In general, the focal mechanism obtained using waveform inversion or P-wave first motion indicate a strike-slip fault, with horizontal pressure and tension axes in accordance with the stress of other moderate and light intraplate seismic events that have occurred in the central volcanic arc of Costa Rica. In 5 days of aftershock activity, in the area between 9.9 and 10.12 north latitude, 83.9 and 83.72 west longitude, 1923 earthquakes were located, all with magnitudes less than 4.0 degrees on the Richter scale. The aftershocks relocation shows an epicentral trend with NW-SE direction, dipping to the SW and rupture area of 32 km². The strike 155° coincides with the tendency shown by the aftershocks epicenters, which indicates the fault trace. The Irazú-Turrialba zone where occurred the December 1, 2016 earthquake, showed microsismicity months and years before the main event; but there was no knowledge of earthquakes like this one, in the area.

Keywords: Costa Rica, Capellades earthquake, moment tensor, aftershocks

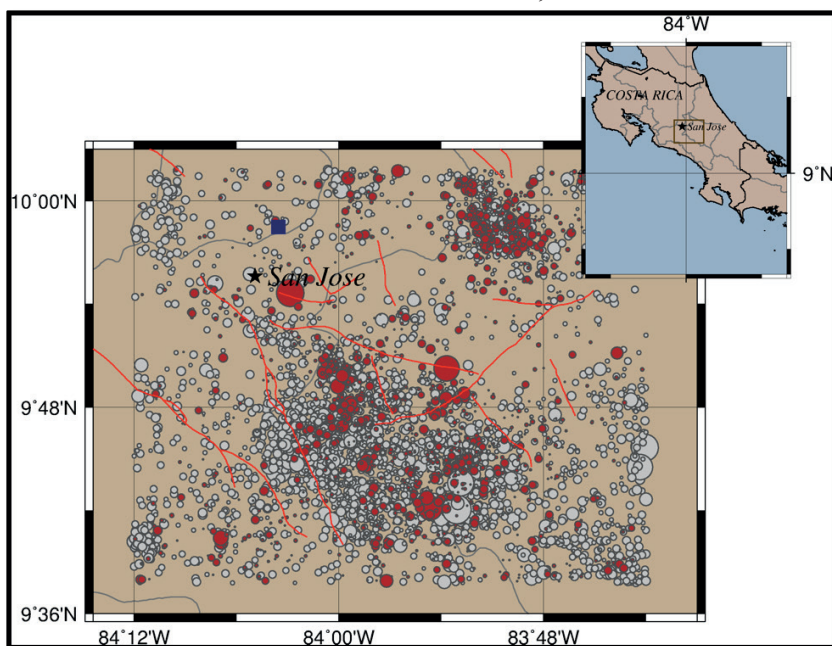
Tectónica y sismicidad previa al sismo de Capellades

La actividad sísmica interplaca e intraplaca en Costa Rica son consecuencia de la interacción de las placas de Coco, Nazca, Caribe y Microplaca de Panamá (Meschede and Barkhausen, 2000; Marshall et al., 2000). La distribución de la sismicidad a lo largo del contacto entre las placas Coco y Caribe sugiere que el límite entre ambos se caracteriza por la alternancia de segmentos de subducción planos y normales (De Mets, 2001; Protti et

al., 1995). La placa del Coco se subduce normal a la trinchera con una tasa de convergencia de 91 mm/a a 82 mm/a y dirección de convergencia de 025°-030° (Bird, 2003; De Mets et al., 2010). El ángulo de subducción de la placa del Coco produce variaciones en los esfuerzos en la placa superior, que se caracterizan por la generación de sismos de magnitudes locales intermedias (5,0 y 6,5) con foco superficial, como los que se producen en la zona central del país. Zona que se conoce como el cinturón deformado del centro de Costa Rica (CCRDB); que sería parte de la frontera occidental del Bloque de Panamá y se caracteriza por una serie de fallamientos activos (Marshall et al., 2000).

Desde que entró en operación la Red Sísmica del OVSICORI-UNA en el año 1984, ha registrado una gran cantidad de sismos superficiales en la zona central del país, la mayoría sólo perceptible por instrumentos sísmicos (ver Figura 1). Aunque han sido pocos los sismos que han ocurrido con magnitud menor a 6.5 Mw en la parte central del país, si han sido de intensidad fuerte a violenta. Antes del sismo de Capellades del 01/12/2016, dos sismos fuertes y superficiales fueron ubicados en la zona central del país, el terremoto de Puriscal del 22/12/1990, Mw=6.0 y el de Cinchona, Mw=6.1, ubicado en el macizo del volcán Poás el 08/01/2009 (Segura et al., 2014). El sismo de Capellades del 01/12/2016 fue sentido en el Valle Central, causó pequeños deslizamientos y daños en 60 casas en la zona epicentral, y puede catalogarse como un sismo de intensidad fuerte (Campos & Quintero, 2017).

Figura 1. Sismicidad superficial registrada por la red sísmica del OVSICORI-UNA en el Centro de Costa Rica; de 1984 a diciembre 2015.



Los sismos en color gris son eventos antes del 2010 y en rojo sismos registrados después de ese año. Con líneas de color rojo se indican fallas inferidas o mapeadas (Montero, 1999; Rojas et al., 1998, Fernández y Rojas, 2001; Denyer, et al., 2003). Con una estrella de color negro se indica la ciudad de San José.

El sismo de Capellades, ocurre entre los macizos del volcán Irazú y Turrialba; zona en que la red sísmica del OVSICORI-UNA localizó un total de 3111 sismos superficiales antes del 1 de diciembre del 2016, con 1017, sismos entre el 2010 y el 30/11/2016. La mayoría de estos sismos se ubicaron en la cercanía del cráter del Irazú.

Muchos de los sismos localizados en la Cordillera Volcánica Central del país se han presentado en forma de enjambre sísmico, como fue la sismicidad registrada en el macizo del volcán Irazú en el 2010; de éstos, el sismo de mayor magnitud fue de 3.2 M_l y se registró el 22 de julio a las 05:51 a.m., hora local, y se ubicó 7 km al SE del cráter del volcán Irazú. Durante el 2010 y 2011, la red del OVSICORI-UNA localizó 141 sismos en el complejo Irazú-Turrialba, todos con magnitud menor a M_l 3.7.

La actividad sísmica y superficial en la zona central del país se mantuvo durante el 2012; en enero se localizaron varios sismos en las cercanías de San Juan de Chicua, Cartago, comunidad ubicada al suroeste del cráter del Volcán Irazú, la sismicidad fue superficial con profundidades menores a los 5 km y magnitudes que no superaron los 3.6 grados MI. En total se localizaron 138 sismos en los macizos del Irazú y Turrialba durante ese año.

Para el 2013, la actividad sísmica en el complejo volcánico Irazú – Turrialba fue de poca frecuencia y el sismo de mayor magnitud localizado en esa zona tuvo una magnitud MI 3.4 y ocurrió el 18/12/2013 22:35:47. Se registraron un total de 23 sismos en ese complejo volcánico. Para el 2014 se incrementó la cantidad de sismos localizados en la zona comparada al del 2013, se contabilizaron 107 microsismos en el complejo Irazú-Turrialba, todos con magnitud menor a MI 2.9.

Durante el 2015 se localizaron 1136 sismos en el complejo volcánico Irazú-Turrialba, con la mayoría de ellos ubicados al SO del cráter del volcán Irazú. Desde el inicio de enero se localizaron sismos de baja magnitud y superficiales que fueron sentidos por la población local. Para el 25 de mayo de 2015, se presenta una actividad sísmica superficial asociada a fallamiento local, ubicada 4.5 km suroeste del cráter del Irazú. Al ser las 02:19:38 del 26 de mayo, se reporta un sismo sentido y superficial en Potrero Cerrado de Oreamuno, MI 2.6. Después de este sismo se registraron varios sismos de magnitud baja en la zona y el 26/05/2015 02:50:28 se localiza un sismo que fue sentido en la zona epicentral, Cartago Centro y en la capital San José, con magnitud MI 4.0; pero que no causó daños.

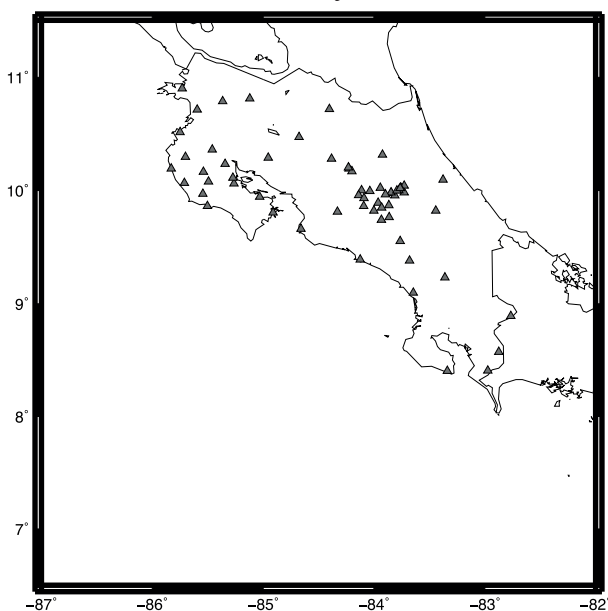
Desde enero al 30 de noviembre de 2016, se localizaron 546 sismos en el complejo Irazú-Turrialba; cantidad baja comparada con la localizada en el 2015 en la zona. El estudio de esta sismicidad no muestra un patrón o premonitor que nos indicara que se produciría un sismo fuerte en la zona.

Sismo principal y réplicas

La red sísmica del OVISCORI-UNA empezó el monitoreo de la actividad sísmica y volcánica de Costa Rica en abril de 1984, y para finales del 2016 la mayoría de las estaciones sísmicas con la que contaba eran digitales. El paquete ANTELOPE se usa a partir del 2010 para almacenar, localizar y distribuir datos sísmicos (Segura et al., 2014) y fue el que se utilizó en la localización del sismo principal y réplicas. Específicamente, se usó el

programa Genloc (Fan et al., 2006) implementado dentro de ANTELOPE y el modelo de velocidad de Quintero & Kissling (2001) para la localización de los sismos e inversión de las formas de onda. En la localización de esta actividad sísmica se usaron estaciones de la red sísmica permanentes del OVSICORI-UNA, de una red temporal instalada por los autores desde el año 2010 en la zona y datos que comparte en tiempo real el LIS-UCR (<http://www.lis.ucr.ac.cr>; Moya, 2006) con el OVSICORI-UNA. En total 67 estaciones fueron usadas para el análisis de la sismicidad asociada al sismo de Capellades (ver Figura 2). Los autores leyeron y localizaron todos los sismos de los cinco primeros días del mes de diciembre de 2016 ubicados en la zona y mostrados en este estudio.

Figura 2. Estaciones usadas en el estudio del sismo de Capellades del 01/12/2016 y réplicas (triángulos de color gris). Una gran cantidad de estaciones se encuentran en la zona central del país y cercanas a los volcanes Irazú y Turrialba.

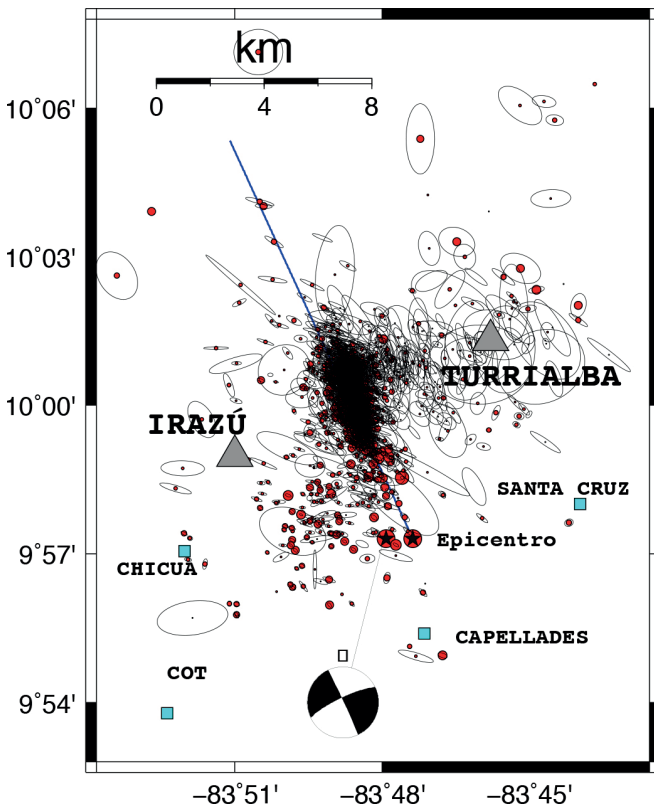


Como se menciona arriba, el número de sismos localizados hasta el 30 de noviembre de 2016 eran pocos comparados con los del 2015; esa tendencia se rompe a partir del 1 de diciembre; cuando se presenta un

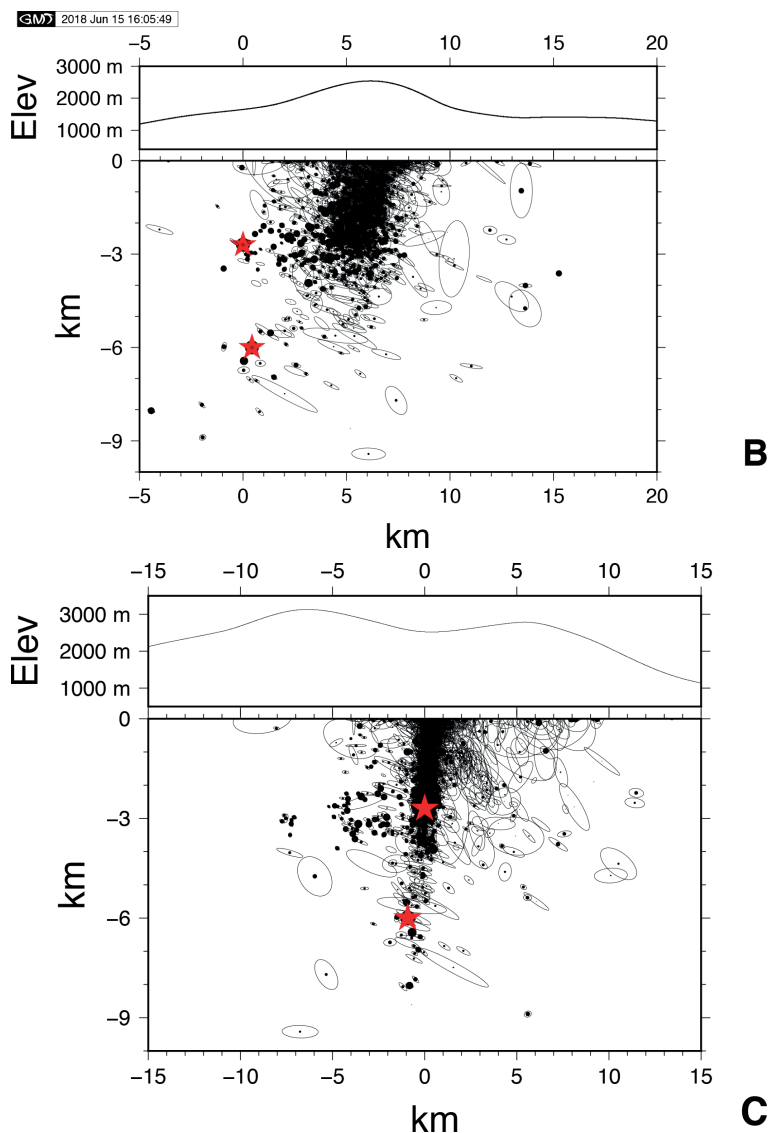
sismo fuerte (00:25:20 hora UTC), localizado 3.7 km al Noroeste de Capellades de Alvarado, Cartago, Cordillera Volcánica Central de Costa Rica.

El sismo principal se localiza con 62 lecturas de la onda P; de éstas, 8 estaciones se ubicaron a una distancia menor a 10 km. Las lecturas de la onda S se tomaron de los acelerómetros OCM, RIMA, CDM del OVSICORI-UNA y HCPD, SLMA, SASR del LIS, estaciones ubicadas a una distancia entre 20 y 45 km del epicentro. Para la localización de las réplicas se usaron las estaciones más cercanas a la zona epicentral, la cual se compone de 19 estaciones sísmicas; las cuales estaban instaladas en el momento que se da la sismicidad en la zona (ver Figura 2) y se usan para el monitoreo de los procesos volcánicos del Irazú y Turrialba, así como estaciones temporales usadas para el monitoreo sísmico de la sismicidad en la zona de Cartago. En total se relocalizaron 1923 sismos en los primeros cinco días del mes de diciembre del 2016 y los hipocentros se concentran en un área de 8 km de largo y 4 km de profundidad, lo cual nos da una idea del área (32km²) de ruptura del sismo principal (Figura 3). El uso de redes sísmicas locales permitió localizar las réplicas con muy buena precisión, donde el 98% de los hipocentros tienen elipses de error con semiejes mayor y menor que no sobrepasan los 2 km de error. El sismo principal es uno de los sismos con elipse de error de menor tamaño. Se puede notar de la Figura 3, que las elipses de error tienen una tendencia del semieje mayor con dirección NO, indicando que la red de estaciones usadas en la localización tiene una apertura menor en esa dirección; en nuestro caso, gran cantidad de estaciones se ubican en el macizo del volcán Turrialba e Irazú, pero no al norte del Irazú; por lo que el acimut del semieje mayor de la elipse de error tiene dirección NO y el semieje menor dirección NE. Las réplicas muestran un plano casi vertical y buzando hacia el SOO (Figura 3C), lo cual nos da una idea del ángulo de inclinación de la falla y dirección. La Figura 3B nos muestra pocas réplicas en los tres primeros km del hipocentro hacia el NO y hacia abajo, que señala el área donde se concentró la mayor parte del deslizamiento del evento principal. La localización de las réplicas nos indica que la ruptura es hacia el NO del hipocentro del sismo principal y el tiempo de ruptura es corto y dura menos de 3 segundos (GCMT, 2018). Las elipses de error de las localizaciones y mostradas en la Figura 3 no distorsiona el patrón de la sismicidad y la distribución hacia el NO e inclinación hacia el SOO de los hipocentros.

Figura 3. Mapa epicentral de la sismicidad asociada al sismo de Capellades del 1 de diciembre de 2016 (Figura 3A). Los epicentros de las réplicas se muestran por medio de círculos rellenos de color rojo; el tamaño es acorde a su magnitud. El epicentro y centroide del sismo principal se muestran por medio de estrellas de color negro. Para el centroide se muestra su mecanismo focal. Los volcanes Irazú y Turrialba se indican por triángulos de color gris. Los pueblos más cercanos a la zona epicentral se indican por cuadrados de color celeste. Las Figuras 3B y 3C muestran los hypocentros proyectados a lo largo de la línea continua mostrada en la figura 3A y perpendicular a ésta; respectivamente. En las figuras 3B y 3C los sismos se indican por puntos de color negro y la localización del sismo principal y su centroide por medio de estrellas de color rojo. El centroide es el que se ubica a 6 km de profundidad. En la figura se muestran las elipses de error del 98 % de los sismos.



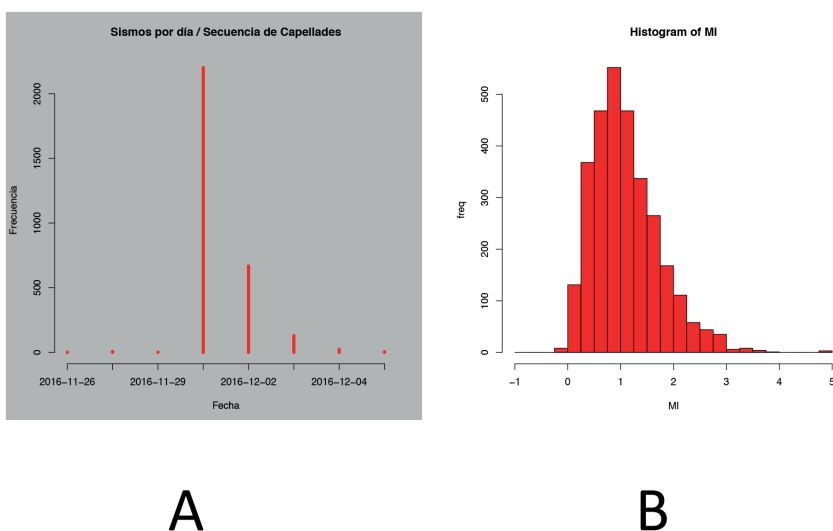
A



Este sismo tiene las características de un sismo principal con sus réplicas, las cuales decaen en número rápidamente y se mantienen altas sólo durante los primeros días después del evento principal. Para el quinto día, la cantidad de sismos vuelve a caer a un nivel mostrado antes del sismo principal (Figura 4A). Las réplicas, mostradas en la Figura 3A, tuvieron

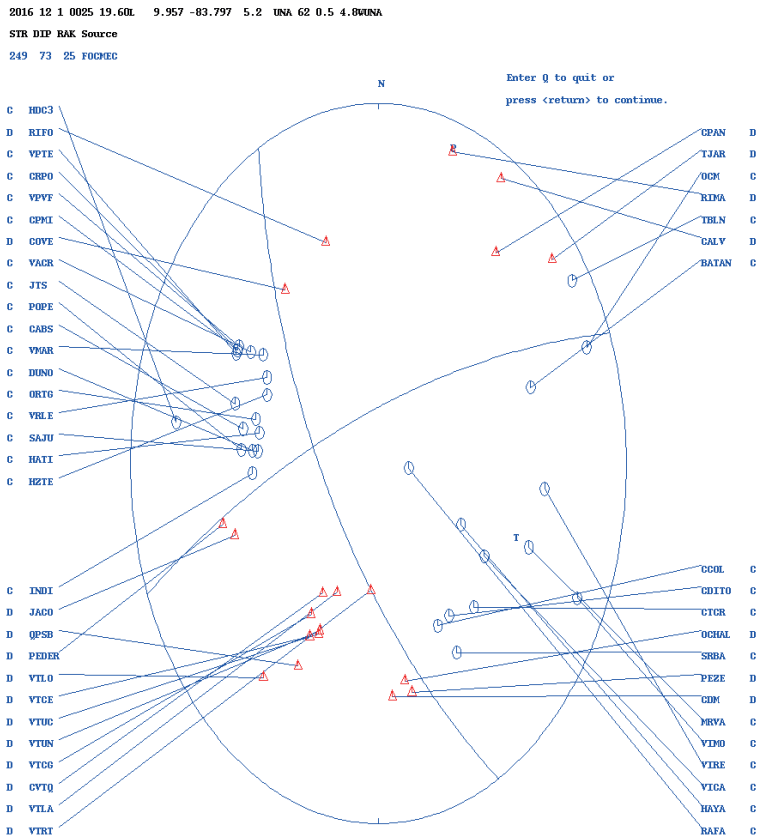
magnitud baja, oscilando entre 0 y 4 grados en la escala Richter, la mayoría con magnitudes entre 0.75 y 2 grados MI y pocos con magnitud mayor a 3 grados MI (Figura 4B).

Figura 4. Número de sismos localizados por día en la zona Irazú-Turrialba (A); comenzando con los sismos localizados el 26 de noviembre de 2016. Se observa que para el 2016-12-05 el nivel de sismicidad se compara con la mostrada en los últimos días de noviembre de ese año. En la figura 4B, se muestra el histograma de la magnitud Richter (MI) de la sismicidad de Capellades; para los cinco primeros días de diciembre de 2016.



El mecanismo focal del evento principal obtenido usando las polaridades del primer impulso de la onda P, nos indica claramente que se trata de un sismo producto de una falla transcurrente (Figura 5) y que está en concordancia con el mecanismo focal obtenido usando inversión de ondas sísmicas (Figura 6). La traza de falla indicada por una solución del mecanismo focal obtenido con las polaridades indica un rumbo NO-SE (151°), con buzamiento alto (66°) y hacia el SO. Dado que este plano nodal está en concordancia con el patrón de localización de las réplicas, se asume como el plano de la falla.

Figura 5. Mecanismo focal derivado de la polaridad de los primeros impulsos del sismo del 01-12-2016 a las 00:25:20 horas UTC. El eje de Presión está indicado por la letra P y el de tensión por la letra T. Mecanismo focal derivado usando el programa FOCMEC (Snook et al., 1984). Con strike, dip y rake de 151°/66°/160° con eje de presión P 19°/5° (en dirección SSO-NNE) y eje de tensión T 111°/30° (en dirección SEE-NOO). Las estaciones con respectiva polaridad se indican a los lados de la esfera focal; con triángulos se indica dilatación y con círculos compresión.



Después de calculado el mecanismo focal usando polaridades, usamos datos de formas de onda de las estaciones de banda ancha del OVSI-CORI-UNA, para calcular el Tensor de Momento (CMT) puntual. Usamos

diferentes combinaciones de estaciones de banda ancha que se encuentran entre 43 y 188 km del epicentro; con un rango de frecuencia entre 0.02 a 0.06 Hz. Aquellas estaciones que presentan perturbación de baja frecuencia en el instrumento (Zahradník and Plešinger, 2005) por el paso de las ondas del sismo o que no tienen una buena relación señal-ruido, no se usan en la inversión y para la estación JTS se hace la respectiva rotación para tener componentes EW, NS y Z. La inversión fue realizada usando el paquete ISOLA (Sokos and Zahradník, 2008, 2013) y la búsqueda del centroide se hizo vertical y horizontalmente (en 45 puntos de un plano de tamaño 3kmx2km). Formalmente, se encuentra el centroide 3 km hacia abajo y 1 km al oeste del hipocentro; pero la correlación entre los datos reales y sintéticos en cualquier punto del plano horizontal de tamaño 3kmx2km es alta y casi de 0.9. El centroide se ubica hacia abajo y al oeste del hipocentro, 0.12 segundos después, relativo al tiempo de origen y a 6 km de profundidad (ver Figura 3); con un plano nodal (rumbo 155°, buzamiento 82° y ángulo de deslizamiento de 174°) que concuerda con los hipocentros de las réplicas, porcentaje de par acoplado de 97 %, Mw 5.2 y una alta correlación entre las formas de onda reales y sintéticas, con una reducción de la varianza global VR=0.8 (Figura 6 y 7). La magnitud de momento aumenta si se toman las estaciones más distantes del epicentro, ya que se puede bajar el contenido de frecuencia a una banda de 0.02 a 0.5 Hz. Se realizaron pruebas de estabilidad de la solución, realizando inversión de las formas de onda para las siete estaciones (CDM, RIFO, BATAN, JACO, COVE, JTS, CDITO), donde en cada inversión no se tomaba en cuenta una estación; los resultados muestran un intervalo para el ángulo de buzamiento de 73°-85°, rumbo 151°-156°, 243°-246° y ángulo de deslizamiento 164°-173° y 5°-19°, lo que indica un alto grado de estabilidad de la inversión (ver Figura 9).

Figura 6. Tensor de momento del sismo del 01 diciembre de 2016, calculado usando ISOLA (Sokos and Zahradník, 2008, 2013). Eje P está definido por strike/dip de $21^\circ/1^\circ$ y el eje T por $111^\circ/10^\circ$. En el mapa se muestra la esfera focal y estaciones usadas para su cálculo.

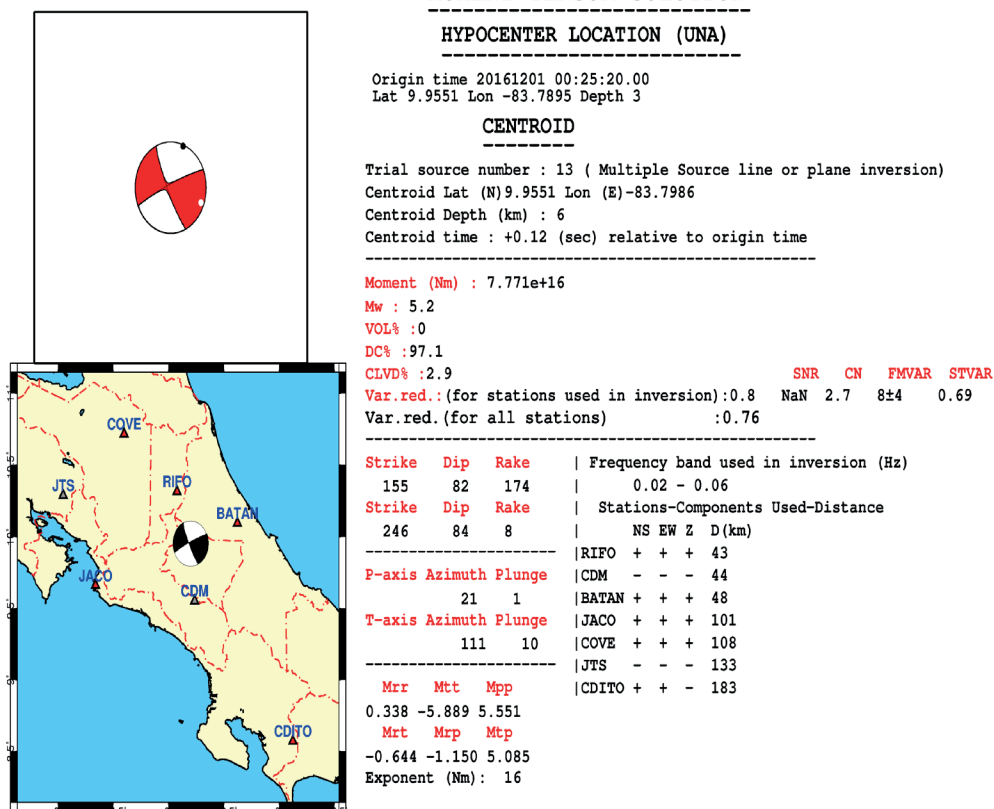
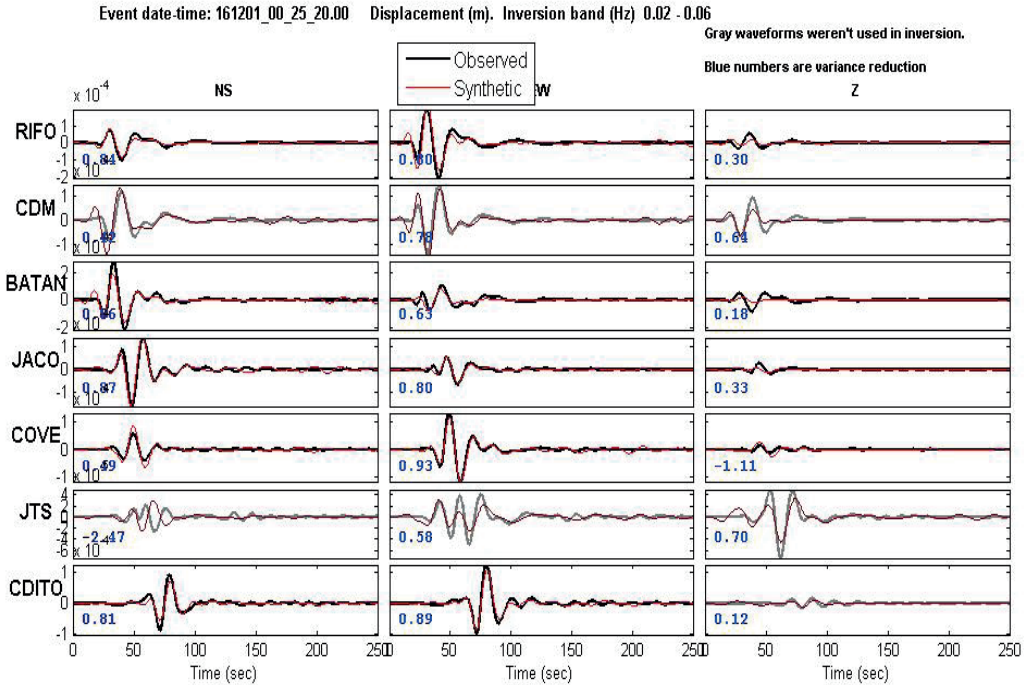


Figura 7. Correlación de las formas de onda de desplazamiento reales (negro) y sintéticas (rojas) para el sismo del 01/12/2016 00:25:20 en un ancho de banda de 0.02-0.06 Hz. La nomenclatura de las estaciones se indica en la izquierda. El gráfico para cada componente de la estación sísmica indica tiempo (segundos) y su desplazamiento (metros). En cada cuadro se indica la reducción de la varianza.



Aunque la sismicidad se encuentra cercana al complejo volcánico Irazú – Turrialba; durante las primeras 24 horas después del sismo principal, la actividad sísmica no disparó cambios en la actividad volcánica que venía presentando el Volcán Turrialba los días previos; la cual consistía principalmente de desgasificación, con pluma de color blanco indicando salida de vapor de agua y tremor de baja amplitud (<http://www.ovsicori.una.ac.cr>; <https://www.facebook.com/OVSICORI/>).

Discusión y conclusiones

- Las réplicas del sismo de Capellades del 01/12//2016 00:25:25 horas UTC se ubican en los primeros 9 km de profundidad desde el nivel del mar, con la mayoría concentradas en los primeros 4 km y el estudio del tensor de momento (Figura 6) nos muestra que el sismo tiene mayor contenido de un doble-par de fuerzas (97 %) que de no doble-par de fuerzas (3 %), lo cual nos hace concluir que el sismo es tectónico y no volcánico y el sismo principal no mostró correlación directa con el proceso eruptivo del volcán Turrialba, volcán que se encontraba en proceso eruptivo durante ese año.
- Casi todas las réplicas se ubican hacia el NO del epicentro con un largo de 8 km, lo cual indica un rompimiento hacia una sola dirección y presentan una disminución grande de magnitud con respecto al evento principal, concentrándose con magnitudes menores a tres grados en la escala Richter. La característica principal del sismo es que se muestra como un típico sismo principal con réplicas; las cuales vuelven a una actividad de fondo que existía antes del evento principal, a partir del quinto día.
- La localización de las réplicas indica que el buzamiento del plano de falla es casi vertical con ligera inclinación hacia el suroeste y por lo tanto con rumbo de la traza de falla NO-SE, transcurrente dextral. También se puede concluir que el tamaño de la falla es pequeño, con un área de ruptura de 32 (8x4) km². La mayoría de las réplicas ocurren del hypocentro hacia la superficie.
- Los pocos daños que causó el sismo principal están relacionados directamente con el tamaño del sismo Mw 5.2 y su corta duración de 2 seg (GCMT, 2018)
- La sismicidad localizada antes del sismo de Capellades del 2016 se presentaba con magnitudes bajas y algunas veces en forma de enjambres sísmicos y la mayoría localizada al SO del cráter principal del volcán Irazú (Figura 8). No se encontraron indicadores premonitores del sismo principal.
- La concentración de las réplicas a lo largo de una línea de falla; así como la sismicidad localizada en el complejo volcánico Irazú-Turrialba para el período 2010-2016 (Figura 8) nos hacen escoger el plano nodal (strike 155°, dip 82° y rake 174°) como el plano de falla.

Aunque anteriormente, otros fallamientos habían sido mapeados en la zona (Lupi et al., 2014), la falla delimitada por la concentración de réplicas del sismo de Capellades de unos 8 km de largo no había sido mencionada antes del sismo del 01/12/2016. Por lo tanto, el conocimiento de la falla de unos 8 km de largo, con 4 km de profundidad y con orientación hacia el SE es importante para futuros análisis de amenaza sísmica en la región.

- La cantidad de datos usados en la localización de los sismos nos dan soluciones hypocentrales que tienen los semiejes de la elipse de error de localización muy pequeños, y estas elipses no afectan la distribución espacial de los sismos; lo cual nos da confianza en seleccionar un plano nodal con dirección NO-SE y buzando al SW y ángulo casi vertical.
- La semejanza entre las soluciones del mecanismo focal obtenido usando polaridades e inversión de las formas de onda, nos da un alto grado de confiabilidad del tensor de momento calculado, lo cual indica que el centroide se ubica hacia abajo (3 km) y hacia el oeste (1 km) del hypocentro. En general, la alta correlación que existe en la inversión, para cualquier punto entre el hypocentro y el centroide nos indica que el plano que forman está contenido por los hypocentros de las réplicas; también, la frecuencia máxima de 0.06 Hz usada en la inversión de ondas tiene una longitud de onda mayor a 16 km, por lo que no debe de existir mayor diferencia entre la posición del hypocentro y del centroide. De igual forma, el grado de estabilidad del centroide se comprueba realizando repeticiones de la inversión por el mecanismo focal donde cada vez se elimina una estación en la inversión y donde el ángulo de rotación entre cada solución obtenida de K-angle (Sokos & Zahradník, 2013) es pequeño (Figura 9).

Figura 8. Mapa con los epicentros de la sismicidad superficial registrada por la red sísmica del OVSICORI-UNA en la zona cercana a los volcanes Irazú – Turrialba desde el 2010 al 2016. Los epicentros se indican por círculos rellenos de color gris o rojo. Los epicentros de color rojo son los asociados a la sismicidad de Capellades. Los volcanes se muestran por triángulos de color rojo. El tamaño del círculo es acorde a la magnitud. El mecanismo focal se indica por una esfera focal. Los pueblos cercanos de Chicúa, Cot, Santa Cruz y Capellades se indican por cuadrados de color celeste.

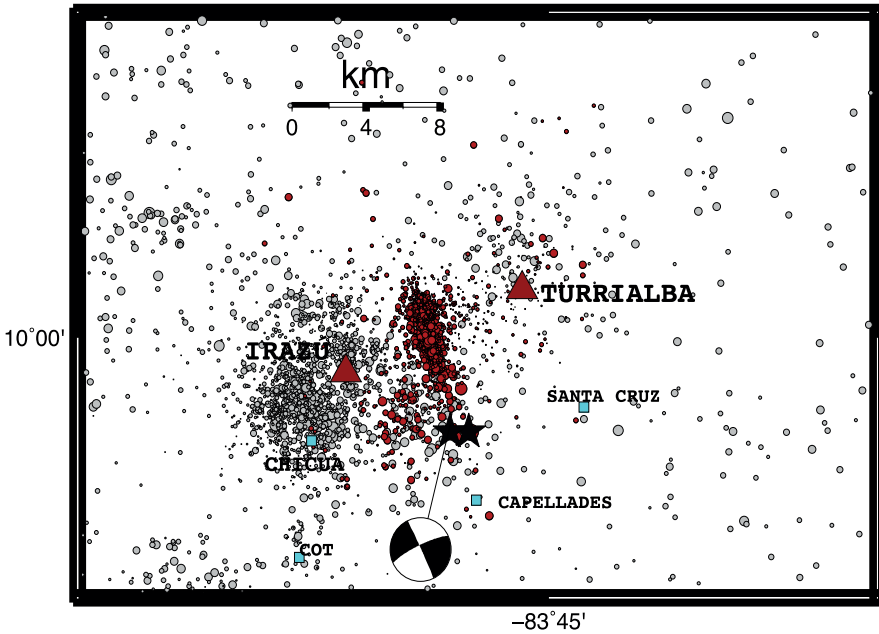
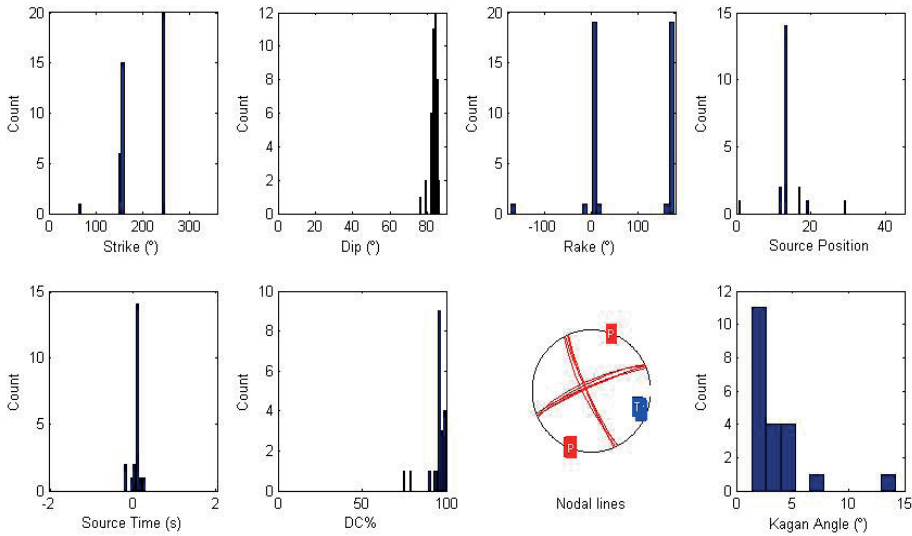


Figura 9. Evaluación de la incertidumbre de los tres ángulos de la fuente strike, dip, rake, de la posición de la fuente en 45 puntos de un área de 3kmx2km, ubicada 3 km por debajo de la profundidad hypocentral, tiempo del centroide relativo al tiempo de origen hypocentral, porcentaje de DC, planos nodales y el ángulo-K.



Agradecimientos

Se agradece al Gobierno de Costa Rica por el financiamiento para instalación y el mantenimiento de las estaciones sísmicas del OVSICORI-UNA. Se agradece al LIC-UCR por compartir datos de aceleración en tiempo real con el OVSICORI-UNA. Se agradece al equipo de profesionales del OVSICORI-UNA por mantener en operación la red sísmica y por el trabajo en los catálogos sísmicos del país, desde 1984. La base de datos originales usados para el artículo se encuentran en la base de datos del OVSICORI-UNA. Las figuras se generaron usando el programa computacional GMT (Wessel and Smith, 1995), SEISAN (Havskov and Ottemöller, 1999), R (R Core Team, 2013) e ISOLA (Sokos and Zahradník, 2008, 2013). Se agradece a Lucas Barros de la Universidad de Brasilia, Brasil y Jiri Zahradník de Charles University, Prague, República Checa por sus comentarios y sugerencias que ayudaron a mejorar el artículo.

Referencias

- Campos, D., Quintero, R. (2017). Mapa de Intensidades e implicaciones socioambientales del sismo de Capellades. Nov. 30, 2016; Costa Rica. *I Congreso Centroamericano de Ciencias de la Tierra y el Mar*, 13 al 16 de Noviembre, 2017. San José, Costa Rica.
- Bird, P. (2003). An updated digital model of plate boundaries. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 4(3), DOI:10.1029/2001GC000252.
- Denyer, P., W. Montero, and G. E. Alvarado (2003). *Atlas Tectónico de Costa Rica*, Editorial Universidad de Costa Rica, serie Reportes Técnicos, Costa Rica.
- De Mets, C. (2001). A New Estimate For Present-Day Cocos-Caribbean Plate Motion: Implications For Slip Along The Central American Volcanic Arc.- *Geophys. Res. Letters*, 28: 4043-4046.
- De Mets, C., Gordon, R.G. & Argus, D.F. (2010). Geologically Current Plate Motions. *Geophys. J. Int.* 181: 1-80.
- Fan, C., G. L. Pavlis, and K. Tuncay (2006). GCLGRID: A three-dimensional geographical curvilinear grid library for computational seismology. *Computers in Geosciences*, 32, pp. 371-381.
- Fernández, M. Y Rojas, W. (2001). *Amenaza sísmica y tsunamis en el territorio de Costa Rica. Libro conmemorativo del 30 aniversario de la Escuela Centroamericana de Geología*. Editorial Universidad de Costa Rica, Universidad de Costa Rica.
- GCMT (2018). *Global CMT Catalog*. Recuperado de: <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.
- Havskov and Ottemoller (1999). **SeisAn** Earthquake analysis software. *Seis. Res. Lett.*, 70, 1999.
- Laboratorio de Ingenieria Sismica (2018). <http://www.lis.ucr.ac.cr>.
- Lupi, M., Fuchs, F., and Pacheco, J. F. (2014). Fault reactivation due to the M7.6 Nicoya earthquake at the Turrialba-Irazú volcanic complex, Costa Rica: Effects of dynamic stress triggering, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 4142–4148, doi: 10.1002/2014GL059942.
- Marshall, J.S., Fisher, D.M. & Gardner, T.W. (2000). Central Costa Rica deformed belt: kinematics of diffuse faulting across the western Panama block, *Tectonics*, 19, 468–492.
- Meschede, M., and Barckhausen, U. (2000). Plate tectonic evolution of the Cocos-Nazca spreading center. In Silver, E.A., Kimura, G., and

- Shipley, T.H. (Eds.), *Proc. ODP, Sci. Results, 170: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 1–10 [Online]*. Available from World Wide Web: <http://www.odp.tamu.edu/publications/170_SR/VOLUME/CHAPTERSSR170_07.PDF>. Último acceso 2018-05-20.
- Montero, W. (1999). El Terremoto del 4 de Marzo de 1924 (Ms 7.0); Un gran temblor interplaca relacionado al límite incipiente entre la placa Caribe y la microplaca de Panamá, *Rev. Geol. Amer. Centr.*, 22, 25-62.
- Moya, A. (2006). *Nuevo Formato de datos para el Laboratorio de Ingeniería Sísmica del Instituto de Investigaciones en Ingeniería de la Universidad de Costa Rica. Ingeniería*. ISSN: 1409-2441 16 (2), 63e74. San Jose, Costa Rica.
- Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional (2018). <https://www.facebook.com/OVSICORI/>. Último acceso 20 mayo, 2018.
- Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional (2018). <http://www.ovsicori.una.ac.cr>. Último acceso 19 de Mayo, 2018.
- Protti, M., Güendel, F. and McNally, K. (1995). Correlation between the age of the subducting Cocos Plate and the geometry of the Wadati-Benioff zone under Nicaragua and Costa Rica. En: MANN, P. (ed.): *Geologic and Tectonic development of the Caribbean plate boundary in southern Central America. Geol. Soc. Amer. Spec. Paper*, 295: 309-326
- Quintero, R., and E. Kissling (2001). An improved P-wave velocity reference model for Costa Rica. *Geofis. Int.*, 40, 3 –19.
- R Core Team (2013). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Rojas, W., Lindholm, C. & Bungum, H. (1998). Seismic hazard analysis for the Metropolitan Area of the Central Valley, Costa Rica. *Technical Report, NOR SAR, Norway*, 59p.
- Segura, J. D., Quintero, R., Burgoa, R. B., Jiménez, U. W. (2014). Análisis de la actividad sísmica en Costa Rica durante el 2010 y resumen de los eventos sísmicos más importantes presentados en Costa Rica de 1983-2012. *Revista Geográfica de América Central*, Vol. 1, No 52, 2014.

- Snoke, J.A., Munsey, J. W., Teague, A.G., Bollinger, G.A. (1984). A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude data. *Earthquake Notes*, 55, #3, 15.
- Sokos, E., Zahradník, J. (2008). ISOLA a Fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data. *Comput. Geosci.* 34, 967e977. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2007.07.005>.
- Sokos, E., Zahradník, J. (2013). Evaluating centroid-moment tensor uncertainty in the new version of ISOLA software. *Seis. Res. Lett.* 84, 656e665. <http://dx.doi.org/10.1785/0220130002>.
- Zahradník, J. and Plešinger, A. (2005). Long period pulses in broadband records of near earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Ame.* 95:1928-1939. <https://doi.org/10.1785/0120040210>.
- Wessel, P. and Smith, W.H.F. (1995). New version of the generic mapping tools released. *EOS* 76, 329.



Alternativas en gestión local del riesgo en cantones sin plan regulador: caso de Alajuelita.

Alternatives in local risk management in cantons without regulatory plan: case of Alajuelita

Luis Nelson Arroyo-González¹
Universidad Nacional, Costa Rica

Resumen

La situación de deterioro ambiental y la ausencia de un plan regulador ha motivado el establecer alternativas de gestión del riesgo a pobladores de algunos vecindarios mediante charlas, capacitaciones, entrega de material informativo y prácticas de campo. Ello ha llevado a la formación de comités de emergencias vecinales, en donde la incorporación de pobladores ha establecido una diferencia sustancial en la identificación, vigilancia y atención de sitios de riesgo, con mejoras evidentes en la organización comunal y el autocuidado.

Palabras clave: Gestión del riesgo, amenazas naturales, organización comunal.

Abstract

The situation of environmental deterioration and the absence of a Regulatory Plan, has motivated the establishment of Risk Management alternatives to residents of some neighborhoods through talks, trainings, delivery of informative material and field practices. This has led to the formation of Neighborhood Emergency Committees, where the incorporation of residents has established a substantial difference in the identification, surveillance and attention of risky sites, with evident improvements in the community organization and self-care.

Keywords: Risk management, natural threats, community organization

¹ Académico e investigador, Escuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: luis.arroyo.gonzalez@una.cr

Este artículo corresponde a la ponencia presentada en el I Congreso Centroamericano de Ciencias de la Tierra y el Mar, realizado en San José, Costa Rica, del 13 al 16 de noviembre de 2017.

Introducción

En el año 2016 dio inicio el proyecto denominado “Capacidades municipales y comunitarias en gestión del riesgo”, mediante la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) en conjunto con el Centro de Prevención de Desastres Naturales de América Central (CEPREDE-NAC) y la Comisión de Emergencias de Costa Rica (CNE). Este acuerdo de cooperación es un componente del Programa BOSAI Fase II de JICA, el cual forma parte del Proyecto para el Desarrollo de Capacidades para la Gestión de Riesgos a Desastres en América Central, y que se desarrolla en Costa Rica con el propósito de fortalecer las capacidades municipales y comunitarias para mejorar la información sobre amenazas y desarrollar capacidades para la reducción de los riesgos ante desastres.

Se ha denominado a este proyecto como BOSAI-II, por cuanto el BOSAI-I se desarrolló en Costa Rica durante los años 2007-2012. En este periodo las actividades que efectuó tuvieron como escenario la provincia de Guanacaste, específicamente, en el cantón de Cañas, en donde se llevaron a cabo tareas significativas en la preparación para desastres en la comunidad de Hotel, así como en otros vecindarios ubicados en la cuenca baja del río Cañas.

En estas localidades se establecieron procedimientos concretos basados en actividades orientadas a promover la prevención y preparación para desastres, a través de una serie de tareas pendientes en donde, además de la formación de líderes locales, se promovió el enfoque solidario, basado en la identificación de ciudadanos con “deseos de reducir el riesgo a desastres, a través de la adopción de experiencias, lecciones aprendidas y aprendizaje, que evidenció en buenas prácticas de reducción comunitaria de los riesgos”. (JICA, CEPREDENAC, CNE, 2007-2012)

Área de estudio y aspectos demográficos generales

El cantón de Alajuelita es una unidad administrativa con una extensión de 21,2 Km² que se localiza inmediatamente al sur de la ciudad de San José, ocupando una serie de formaciones geológicas de topografía montañosa. (Mapa 1) A finales del siglo XIX esta y otras localidades conformaban hábitats dispersos, que se integraban en esencia, con base al cultivo del café. Ello varió a partir de la concentración de la actividad económica y poblacional que convierte la Región Central en el núcleo de

mayor presencia poblacional y de servicios, ya que la Gran Área Metropolitana cubre el 3,8 % del territorio y alberga cerca del 60 % de la población del país. Como parte de esta tendencia, la densidad de habitantes por kilómetro cuadrado en este cantón se multiplicó por siete en relación con el 2011 y con respecto a 1963. Durante este lapso de tiempo se mantiene este crecimiento en forma homogénea en términos de no aumentos sensibles, situación que se modifica a partir de 1984, cuando en el censo de población de 2000 la población experimentó un crecimiento de cerca de 100 000 habitantes. Para el año 2015 se contabilizaban ya 87 734 habitantes. (Véase gráfico No.1). (INEC, 2011).

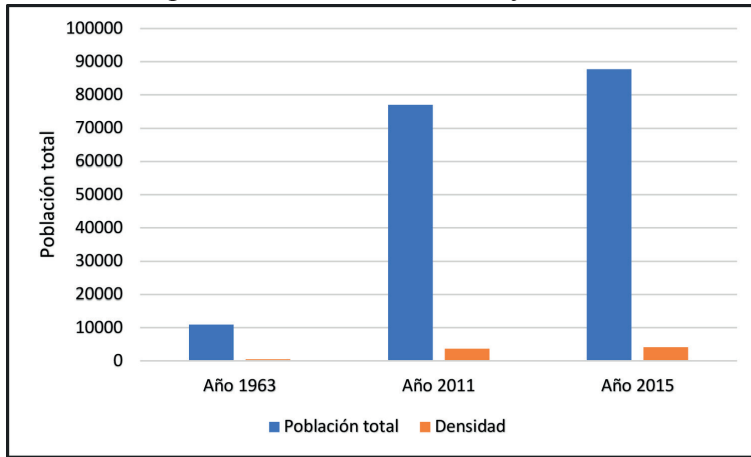
Mapa 1. Ubicación área de estudio, cantón de Alajuelita, San José, Costa Rica



La ocupación indiscriminada de tierras por pobladores e infraestructura diversa, el deterioro ambiental que ello origina y controles municipales escasos, entre otros, ha dado como resultado el que en este cantón se

registren problemas crecientes por activación de amenazas naturales tales como inundaciones y deslizamientos. Desde el 6 de setiembre de 1971 hasta el 8 de noviembre del año 2010, esta localidad acumuló 119 sucesos por inundación. (ídem). (Sistema de Información para Emergencias. (1994). Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias. Sistema de Información para Emergencias (SIE). (Salgado, 1994).

Gráfico No.1 Cantón Alajuelita, población total y densidad de población por Km², años 1963, 2011 y 2015



Fuente: Hernández, H. 1985. Elaboración propia con datos del INEC.gov.cr

Marco teórico conceptual

La palabra BOSAI pertenece al idioma japonés, y de acuerdo con ello está formada por dos caracteres de la escritura japonesa, los cuales tienen significados diferentes, pero al unirse se complementan. El primero es BO y tiene varios significados como protección, prevención, disminución, preparación, mitigación, rehabilitación y reconstrucción. El segundo carácter es SAI el cual significa “desastre”. Así, al unir estos dos caracteres, se forma una palabra que abarca todo tipo de actividades en contra de los desastres. La filosofía “BOSAI” implica acciones para disminuir los daños generados por los desastres y las medidas que se toman al respecto antes (prevención), durante (atención) y después (rehabilitación). El concepto va más allá porque es mucho más que mitigación o prevención de desastres,

es un concepto que se asocia a la globalidad de los efectos de los fenómenos, se trata de una gestión de los riesgos. (JICA, CEPREDENAC, CNE, 2007-2012).

Marco metodológico

Una de las directrices principales descansa en el trabajo en comunidades que se encuentran bajo los efectos de amenazas naturales. Así se va trabajando con los pobladores en la construcción de herramientas prácticas y teóricas de forma que a ellos mismos se les permita conocer su ambiente natural y la dinámica de activación de las amenazas.

El BOSAI es una expresión japonesa que se ha implementado como un método en donde las comunidades, en ocasión de desastres, se organizan bajo un esquema en forma de triángulo, en donde la parte central de la figura 1 se expresa como “Reducción local del riesgo, solidaria y participativa”. Se basa fundamentalmente en tres componentes ubicados en los vértices del triángulo que se expresan como ayuda a sí mismo o autoayuda, ayuda mutua o cooperación entre comunidades y ayuda institucional.

En el renglón de ayuda a sí mismo o autoayuda se organizan reuniones en comunidades con problemas por efectos de amenazas naturales, mediante la mediación de funcionarios de las municipalidades interesados en el tema y que conocen líderes comunitarios locales. A estas personas se les invita a participar como miembros activos de comités de emergencia en caseríos o vecindades que tienen problemas por amenazas naturales. (Foto 1 y 2). Al brindárseles capacitación mediante charlas técnicas y reuniones con funcionarios y personal técnico de JICA, así como con concedores del método BOSAI, estas personas asumen papel de liderazgo en el tema ante sus vecinos por cuanto al conocer los sitios con problemas, organizan a los pobladores mediante redes de informantes, los cuales alertan y atienden de primera mano las situaciones de emergencia que pudieran presentarse. Con ello crean una primera red de atención de acuerdo con sus capacidades y posibilidades.



Foto 1. Reunión de pobladores, charla de capacitación. Junio 2017.



Foto 2. Reunión de líderes, charla de capacitación. Junio 2017.

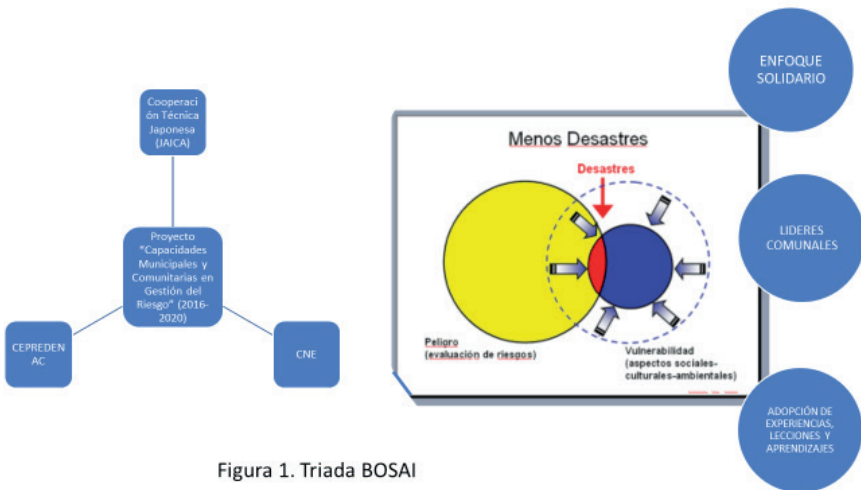
De acuerdo con el postulado de autoayuda, se incentiva en los ciudadanos una autovaloración acerca de sus capacidades individuales, y de que apropiadamente asesorados, los seres humanos son capaces de afrontar de manera pragmática y exitosa las situaciones de riesgo a las que estén expuestos. La convicción paulatina que gradualmente se experimenta sobre los logros pequeños que trae la participación incipiente, así como las ventajas que se adquieren al iniciar la reducción de vulnerabilidades comunitarias a partir de concientización a lo interno de los núcleos familiares, fomenta un proceso autogestionario, en donde recurriendo a recursos propios las personas desarrollan capacidades y posibilidades.

El componente “Ayuda mutua”, busca construir y enlazar los esfuerzos que, en reducción del riesgo, tienen como núcleo el entorno familiar y de autoayuda; para proyectarlo hacia la comunidad. Este procedimiento, además de extender el principio de autoayuda mediante la incorporación de otros núcleos familiares, extiende la cooperación y la solidaridad no solo en emergencias, sino también en la vida diaria, ya que fortalece relaciones vecinales. El reconocimiento y la sensibilización grupal acerca de

cómo enfrentar situaciones de riesgo permite no solo la construcción de redes de divulgación, sino que fortalece la construcción de redes de soporte y asistencia tendientes a avanzar en la reducción de este.

El tercer componente está constituido por la “Ayuda Institucional”. Esta variable reconoce la importancia de la organización comunal como fundamento básico en las tareas tendientes a reducir el riesgo. La agrupación de entidades trasciende las organizaciones públicas para extender nexos a organismos privados y a otras agrupaciones de la sociedad civil, para que en forma mancomunada, construyan y faciliten procesos de gestión y autonomía, tendientes a encaminar esfuerzos hacia una cultura que interiorice fundamentos de una cultura de la prevención dentro de un marco de participación comunitaria.

De acuerdo con los lineamientos que orientan estas capacitaciones, que se hacen también bajo la guía y conducción de la Municipalidad respectiva, se aplican los criterios de escogencia de líderes que procedan de organizaciones que contribuyen al desarrollo del cantón, tales como asociaciones de desarrollo, cooperativas, grupos organizados (Vigilancia Comunitaria) y otros que la Municipalidad proponga. Este criterio de escogencia es importante, porque así los representantes de la Municipalidad pueden dar con posterioridad seguimiento a los grupos que fueron asesorados en estas fases previas.



Diseño: Elaboración propia.

Discusión de Resultados

Al no contar este cantón con un plan regulador, las situaciones de vulnerabilidad se exacerban, ya que la aplicación de algunas de las normativas que este instrumento propondría se enfilaría hacia la delimitación de áreas de riesgo. En ausencia de tales limitaciones, es evidente que aunque no serían una solución definitiva, al menos tanto los pobladores como la Municipalidad tendrían apoyo legal y técnico para implementar medidas de ordenamiento del territorio. De ahí que la organización comunal viene a aliviar -cuando no existe plan regulador- todas aquellas situaciones en donde su vigencia mitigaría los efectos dañinos por amenazas naturales. En el caso del cantón de Alajuelita, como resultado de estas capacitaciones existen hasta la fecha de presentación de esta ponencia; Comités Vecinales para la Atención de Emergencias, bajo las denominaciones Río Cañas, La Cascabela, Calle El Alto y Lámparas entre otros. La conformación de estos grupos ha permitido establecer vínculos de mayor cooperación y asesoría entre los ciudadanos de zonas vulnerables por amenazas naturales y los funcionarios de la Municipalidad. Esto plantea como ventaja el que en situaciones de emergencia, los gobiernos locales no están en capacidad de atender íntegramente estos eventos, por lo que la existencia de grupos organizados y capacitados constituye un recurso importante, ya que los líderes de esos comités conocen no solo las áreas de riesgo, sino que se localizan en las cercanías de esos sitios. Tienen además el entrenamiento apropiado para el abordaje de esas situaciones, sin caer en la improvisación ni en el desorden que implicaría la no familiaridad con estos eventos. Tales procedimientos empoderan a las poblaciones por cuanto no solo se fomentan procesos sobre gestión del riesgo en el renglón de la prevención, sino que las ventajas del tratamiento apropiado sobre cómo enfrentar estas emergencias acrecienta su compromiso con los comités municipales de emergencias, a la vez que fomenta pasos tendientes a la reducción de vulnerabilidades.

Conclusiones

Mediante esta experiencia en comunidad se subsana en principio, la ausente o escasa accesibilidad que tienen algunos vecindarios, con respecto a la capacitación especializada en las etapas acerca de la gestión del riesgo por amenazas naturales. Este aspecto es de importancia trascendental por cuanto, los expertos no solo proveen información, sino que esta se

acompaña de ejercicios y prácticas de campo en los lugares afectados. Las charlas y capacitaciones a su vez son actividades presenciales en donde la participación de los líderes les confiere reconocimientos y responsabilidades dentro del programa y de su papel en la comunidad. Es evidente que a través de las técnicas del BOSAI se ha reducido la brecha de transferencia de saberes entre entidades gubernamentales, técnicos, gobiernos locales y vecinos. Esto ha significado entre otras ventajas, el incentivar en la población una cultura de prevención y de seguimiento que tiene como evidencia el interés manifiesto por la continuidad de estas capacitaciones. El estimular la implementación de experiencias semejantes en otros ámbitos comunitarios del país permitiría sentar las bases de redes de atención permanentes y no sujetas a la temporalidad que acompaña la incidencia climática o estacional de factores de disparo de algunas amenazas naturales.

Referencias

- Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central (CEPREDENAC), Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE). (2007-2012). *Manual par a líderes comunitarios y facilitadores en prevención de desastres bajo el enfoque BOSAI*. Proyecto BOSAI–Costa Rica Fortalecimiento de Capacidades Municipal Comunitarias en Gestión del Riesgo. Preparado por D.s Salgado, G. Matamoros, S. Sánchez. Recuperado de https://www.jica.go.jp/project/all_c_america/001/materials/pdf/manual_03.pdf
- Arroyo, L. N. (2015). *Riesgos a desastres en áreas periurbanas en la Gran Área Metropolitana, consideraciones pasadas y recientes: orientaciones y alcances reales de la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial: cantones de Aserri, Alajuelita, Desamparados, Escazú, Santa Ana y Mora*. (Informe Final Proyecto de Investigación, Escuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional). Heredia, Costa Rica.
- Hernández, H. (1985). *Evolución territorial y principales censos de población 1502 - 1984*. 1 ed. San José, CR: EUNED. Recuperado de: http://ccp.ucr.ac.cr/bvp/mapoteca/CostaRica/generales/atlas_censal/
- Instituto Geográfico Nacional (2012). División Política Administrativa de Costa Rica.

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) Población total 1963, 2011, 2015. Recuperado de <http://www.inec.go.cr/content/densidad-de-poblacion-alajuelita-total>. Consultado 24/06/2018.

Salgado, D. (1994) *Sistema de información para emergencias (S.I.E.): Aspectos generales. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias. Sistema de Información para Emergencias (SIE)*. Recuperado de <http://www.cridlac.org/digitalizacion/pdf/spa/doc7228/doc7228.htm>



Transformaciones geomorfológicas radicales del cráter del Volcán Poás: erupciones de abril 2017.

Deep Geomorphological Changes at the Poás Volcano Crater; From Eruptions in April 2017.

Eliécer Duarte-González¹
Universidad Nacional, Costa Rica

Resumen

En abril 2017, el volcán Poás produjo al menos 4 erupciones principales que transformaron completamente el cráter activo y sus alrededores. La erupción del miércoles santo afectó al sector oeste y sus respectivos flancos, la del jueves santo produjo más efectos hacia el sureste y sur involucrando al mirador y alrededores mientras que la erupción del viernes santo se dirigió hacia el sureste y este afectando parcialmente el bosque. Finalmente, el 22 de abril se produce la última de las erupciones principales la cual termina de desaparecer el resto del domo y afecta de nuevo el mirador y alrededores; incluyendo equipos de monitoreo volcánico. Los cambios se producen, de modo directo, en el fondo del cráter y en el domo mientras que los sectores aledaños a esa cavidad se ven transformados, principalmente por relleno con los materiales eyectados de los dos sectores antes citados. Aquí se ofrece una descripción de los materiales principales, emplazados en cada uno de los sectores; sus características físicas y alcance. Este trabajo reunirá una visión comparativa de las condiciones geomorfológicas antes de este periodo eruptivo con las actuales. Distintas secuencias de fotografías, de distintos ángulos y con referencias de posición, dimensión y orientación servirán para interpretar la magnitud de los cambios generados por la actividad reciente y sus implicaciones para el futuro eruptivo de este volcán. El marco espacial de la afectación descrita no alcanza más allá de 2kms a partir del punto de emisión, aunque se hará referencia a los efectos en un eje mayor. Cronológicamente, la comparación se hará a partir de las condiciones que se tenían después de las erupciones freáticas de 2006.

¹ M.Sc., Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI), Universidad nacional. P.O. Box 2346-3000, Costa Rica. E-mail: eduarte@una.cr

Este artículo corresponde a la ponencia presentada en el I Congreso Centroamericano de Ciencias de la Tierra y el Mar, realizado en San José, Costa Rica, del 13 al 16 de noviembre de 2017.

Palabras clave: Volcán Poas, erupciones freatomagmáticas, cambios geomorfológicos, destrucción.

Abstract

In April 2017 Poás volcano produced at least 4 main eruptions that reshaped completely its active crater and surroundings. Holy Wednesday eruption impacted the west sector and its related flanks, Thursday eruptions produced more effects towards the southeast and south involving the main viewpoint and vicinity while holy Friday eruptions were directed towards the southeast and east impacting, partially, the forest. Finally, on April 22nd the last of the main eruptions occurred disappearing the rest of the standing dome and, again, affecting the viewpoint and surroundings; including volcano monitoring equipment. Changes were produced; directly at the bottom of the crater and on the dome while sectors near that cavity, were transformed mainly by infilling of materials ejected from the two mentioned structures. This essay offers a description of the main materials emplaced in each sector, their physical characteristics and coverage. This work will depict a comparative vision of previous geomorphological conditions with the current eruptive period. Various photographic sequences; from different angles and with spatial references, dimension and orientation will help to assess the magnitude of changes generated by this recent activity and its implications for the eruptive future of this volcano. The areal framework of impact does not exceed 2 kms; from the point of emission although some references will have a larger axis. Chronologically the comparison will start from the general conditions left after the phreatic eruptions in 2006.

Keywords: Poás Volcano, Phreatomagmatic Eruptions, Geomorphological Changes, Destruction.

Introducción

Luego de las erupciones de Semana Santa y del 22 de abril, como principales, los cambios en el cráter activo fueron notables. Este resumen se enfoca en el cráter activo, el lago caliente y alrededores, visualizando cambios sustantivos en la morfología de un área sujeta a la actividad eruptiva y exhalativa que se origina, principalmente, desde el cráter mayor, formado debajo de donde antes se encontraba el domo. Se anotan también cambios en los bordes de la caldera, donde materiales mayores alcanzaron a afectar vegetación e infraestructura.

Las transformaciones aquí anotadas tienen como fecha de corte la primera semana de septiembre 2017. Ha habido muchos otros cambios posteriores a esta fecha por efectos climáticos, gravitacionales y por la actividad misma.

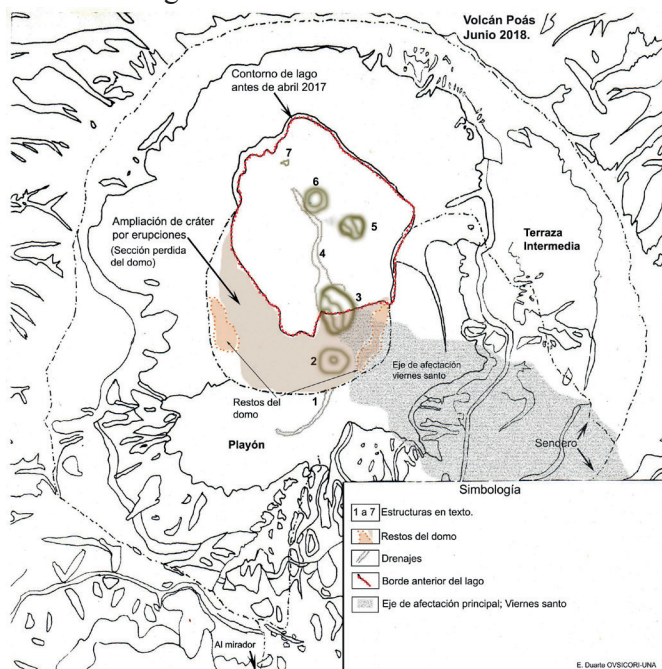
Entre las modificaciones principales a mencionar se indican al menos 7 grandes estructuras en el fondo del cráter y la desaparición de la mayor parte del domo. Por relleno y por erosión se citan transformaciones en los alrededores del cráter activo, paredes intracaldera y terrazas vecinas.

Figura 1. Vista del cráter transformado por las erupciones de abril 2017.



Fuente: Duarte, E. septiembre 2017.

Figura 2. Localización general de las 7 estructuras detalladas en este artículo.



Fuente: Duarte, E., mayo 2018.

Para fines de orden en el ensayo se hará una descripción general de las transformaciones geomorfológicas principales: en el domo, en la cavidad cratérica, así como aquellos ocurridos intracaldera y alrededores. De modo entrelazado se hará la descripción genérica de los materiales para arribar a algunas conclusiones de la visión comparativa entre el ambiente anterior a las erupciones de abril y los nuevos cambios registrados.

Metodología.

Este volcán recibe visitas frecuentes por parte del grupo de vigilancia volcánica que se subdivide en 4 metodologías principales a saber: geoquímica, sismología volcánica, deformación y documentación de cambios físicos. Los datos de estas metodologías se comparten, analizan y comparan con el fin de comprender los procesos internos del volcán, así como su expresión externa y sus efectos en la atmósfera y sustrato físico.

Durante décadas se ha recopilado información de cambios físicos provocados por diversos periodos de actividad, por lo que el record de estos registros es básico para poner en perspectiva los cambios radicales que aquí se anotan.

Por lo tanto, se hará uso de los informes de campo de las últimas 3 décadas, de mapas que registraron cambios en el pasado y de la base fotográfica (y videográfica) para las comparaciones respectivas. Debido a la enormidad de la zona transformada, algunas áreas solo recibirán estimados de su extensión y espesores de los materiales en otros casos se citarán mediciones realizadas *in situ* para fines de legitimar las cifras anotadas en este documento.

Resultados

Transformaciones Geomorfológicas Radicales del Cráter del Volcán Poás. Descripción de materiales, relleno y erosión.

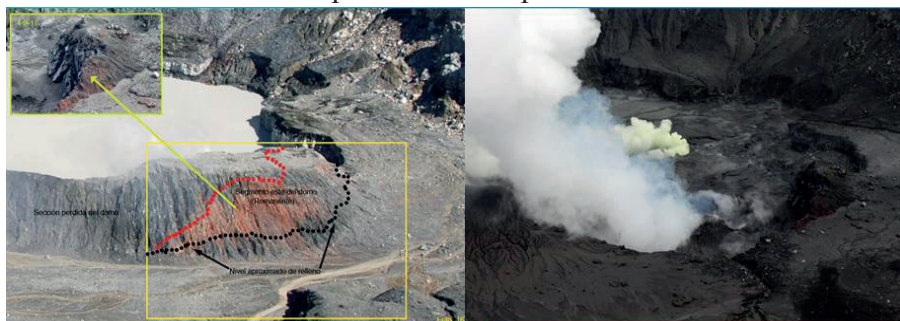
Indudablemente, el cambio más notorio producido cuando se visita el mirador es la desaparición de 3 cuartas partes del domo; una estructura icónica de este volcán y que estuvo emplazada ahí por más de 60 años. Durante la actividad de los 50's se formó en el centro del otrora gran lago, esa estructura, en forma casi redondeada y que después dividió la caldera en tres tantos: lago al norte, domo al centro y playón al sur. Ese muro (denominado domo o cono piroclástico) en décadas posteriores estuvo sujeto

a alta temperatura, intemperismo y a pérdidas de volumen por repetidas erupciones freáticas. De los aproximadamente 200 x 40 metros solo queda de muestra 2 segmentos en los extremos; al este y oeste. Figura 3.

Bloques que conformaban las secciones más expuestas de esa estructura se encuentran desperdigados (en distintos tamaños y formas) en toda el área de estudio comprendida en este ensayo. Incluso en el bosque, en dirección hacia el lago Botos, se documentaron bloques de tamaño métrico; indicativo de la energía invertida al menos en la erupción del viernes 14 de abril por la mañana (1 Duarte et al, 2017).

Después de las erupciones de semana santa, se formó otro domo más pequeño, alrededor del nuevo conducto principal (denominado en adelante como rojizo) de corta duración, pues en las erupciones del sábado 22 esa fue la principal estructura destruida y cuyos restos alcanzaron el mirador y equipos de vigilancia volcánica.

Figura 3. Comparativo del domo y el borde sur del cráter después de las erupciones.



Fuente: Duarte, E. Foto de la izquierda; febrero 2017. Foto de la derecha; septiembre 2017.

Las áreas afectadas en el cráter. Las 7 grandes estructuras.

Esta sección contiene descripciones de al menos 7 estructuras (numeradas en las figuras 7 a 11) alineadas sur-norte, con algunos estimados de tamaños y otros aspectos generales.

Después de las erupciones principales en abril de 2017, el lago ácido y caliente mantuvo una dinámica de descenso de nivel debido la evaporación producida por algunas de las estructuras detalladas aquí y por cientos de pequeñas fumarolas subacuáticas que se observaron claramente en

distintos puntos del fondo seco. Paralelo al alineamiento de estructuras se encuentran grietas menores en la orilla este del cráter seco, desde donde se desprenden abundantes gases y se observan diversos tramos con líquido en ebullición. La figura 4 ubica las estructuras que a continuación se detallan.

Figura 4. Vista (de este a oeste) resumen de las 7 estructuras que se describen.



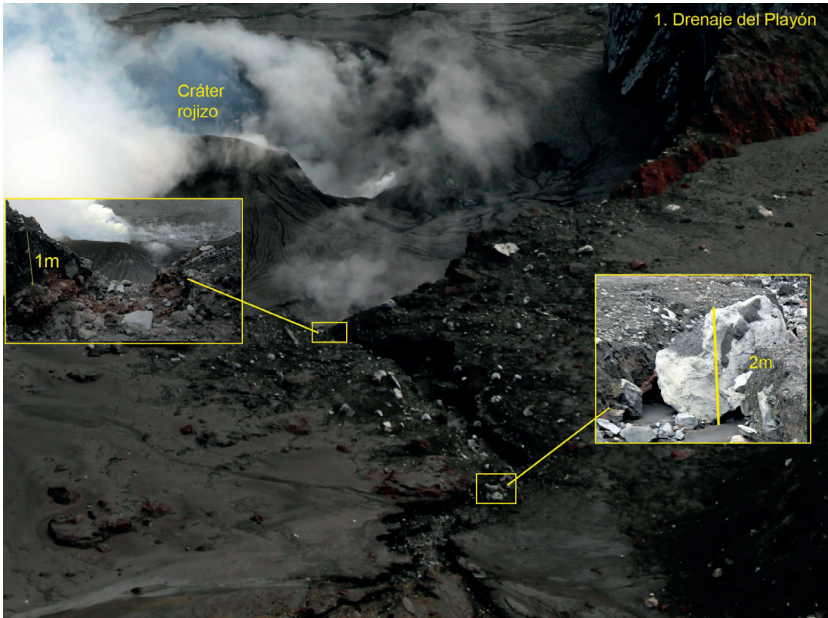
Fuente: Duarte, E., septiembre 2017.

Estructura No.1. Drenaje del Playón

Aparte de las estructuras dentro del cráter sobresale una cuenca formada al sur de este. El drenaje del Playón se formó por escorrentía y por la ligera diferencia de nivel entre ese sector que fue abundantemente rellenado con las erupciones de abril 2017. En su sector más profundo esta “quebrada” alcanza casi 4 metros, igualando su máxima anchura en esa misma dimensión. También el flujo hacia la cavidad del cráter (ahora ensanchado) solo es posible debido a la decapitación de la mayor parte del domo que de otro modo habría impedido tal movimiento. Dentro del cauce se encuentran bloques preexistentes (eyectados desde el sector del domo que estuvo expuesto al lago ácido) y bloques masivos y semifundidos de gran tamaño. En el recuadro de la derecha se observa un ejemplo del primer tipo con un tamaño aproximado de 2x3 metros. Curiosamente, el punto casi extremo

al sur (junto a la pared de la caldera) coincide con la enorme fumarola que se abrió en ese punto algunos días antes de que se produjeran las grandes erupciones. Es en ese punto, precisamente, donde se registraron otras fumarolas en los años 98 y 99 para luego cerrarse, probablemente por la migración de los puntos calientes; hacia el fondo del lago, el domo y la pared este. (2 Fernandez, E. 1999 et al) Figura 5.

Figura 5. Vista general del drenaje del Playón hacia el cráter.



Fuente: Duarte, E., junio 2017

Estructura No.2. Paila hirviente

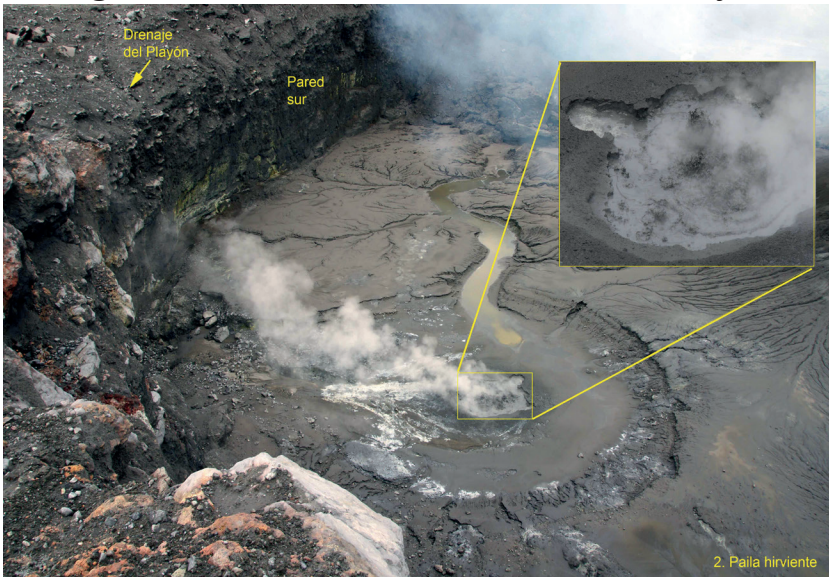
La segunda estructura (paila hirviente) se localiza en el sitio donde se encontraba la masa principal del domo y ahora luce como una enorme paila hirviente de al menos 20 metros de diámetro y unos 2 metros de profundidad. En su centro esta depresión concentra la cavidad o paila (~3x3 metros) con líquido y lodo en ebullición acompañados de gas y vapor abundante. Del borde oeste de tal depresión se desprende un curso de agua amarillenta que discurre y se pierde en la base del segmento oeste del domo. Todo este sector (al sur del cráter rojizo o cráter principal) se

encuentra tapizado por una gruesa capa de materiales finos, producto de las emanaciones de ceniza recientes y materiales viejos que son arrastrados hasta ahí por la escorrentía. En la parte sur, esta depresión se encuentra contenida por la pared vertical (de unos 25 metros) y que pareciera corresponder a la cavidad previa al emplazamiento del domo a mediados del siglo pasado.

Con las observaciones del corte vertical dejado por la intensa actividad reciente se pudo documentar hasta 50 metros de profundidad, lo que significa que el relleno de piroclastos, ceniza y sedimentos arrastrados puede alcanzar más de 20 metros en ese sector. Figura 6.

Esta paila se encuentra en el sitio exacto donde por años se notó actividad aguda bajo el domo. Cuando el nivel del lago descendía la presión de esta válvula se colaba por entre las grietas del promontorio rocoso para mostrarse como un geiser vigoroso que a veces alcanzó varios metros de altura. Es también el sitio, donde el drástico aumento de temperatura de gases alcanzaba a calentar tanto la roca que aparecía como un sector incandescente, que a veces desprendía flamas de distintos colores con varios metros de altura. Tal actividad se vio más recientemente entre el 2011 y 2013 (3 Duarte et al 2013).

Figura 6. Paila hirviente ubicada al sur del cono rojizo.



Fuente: E. Duarte. Septiembre 2017.

Estructura No.3. Cono rojizo.

La figura 7 (cono rojizo) muestra el cono formado y sostenido ahí al menos desde mayo de 2017. Una estructura similar formada bajo el agua y lodo del extinto lago fue destruida por actividad explosiva a finales de abril. Este cono actual se encuentra disectado en las paredes norte y sur, probablemente por una zona de debilidad que se expresa en forma de enorme grieta y que cruza la cavidad del cráter ensanchado; de sur a norte (ver siguiente punto). La pared, al oeste, formada por acumulación de piroclastos tiene una altura de unos 20 metros y su punto más profundo alcanza uno 20 metros a partir del nivel medio del cráter mayor. La pared del este tiene menor altura y ambas se encuentran forradas por ceniza reciente de las continuas erupciones. Las paredes internas muestran un color rojizo, probablemente, debido a la exposición de tales materiales al medio y al proceso rápido de oxidación. En su base este cono mide no menos de 50 metros de diámetro.

La cavidad más profunda de este cráter rojizo se muestra redondeada y a pleno día se nota incandescencia: indicativo de temperaturas, probablemente, arriba de 500°C. Durante la visita no se escuchó el típico ruido de turbina como se ha escuchado meses atrás. Siendo este el cráter que despiende materiales abundantes y de diverso tamaño no es raro observar paredes lisas y redondeadas por el efecto abrasivo de las constantes emanaciones. Es desde este punto donde se desprenden los clásicos gases azulejos: característicos del dióxido de azufre (SO₂) y, el cual se ha contabilizado hasta en miles de toneladas diarias en periodos de actividad aguda.

Hasta ahora esta es la mayor estructura desarrollada desde el fondo del cráter seco a partir de mayo 2017. La actividad exhalativa se mantiene en ese punto y la salida de cenizas fue intermitente hasta la fecha de corte de este artículo. En otras ocasiones cuando el lago se ha secado, se ha observado un conducto enorme, donde ahora aparece la cavidad mayor de este cono.

Figura 7. Vista interior del cono rojizo mostrando incandescencia.



Fuente: Duarte, E., septiembre 2017.

Estructura No.4. Grieta diametral.

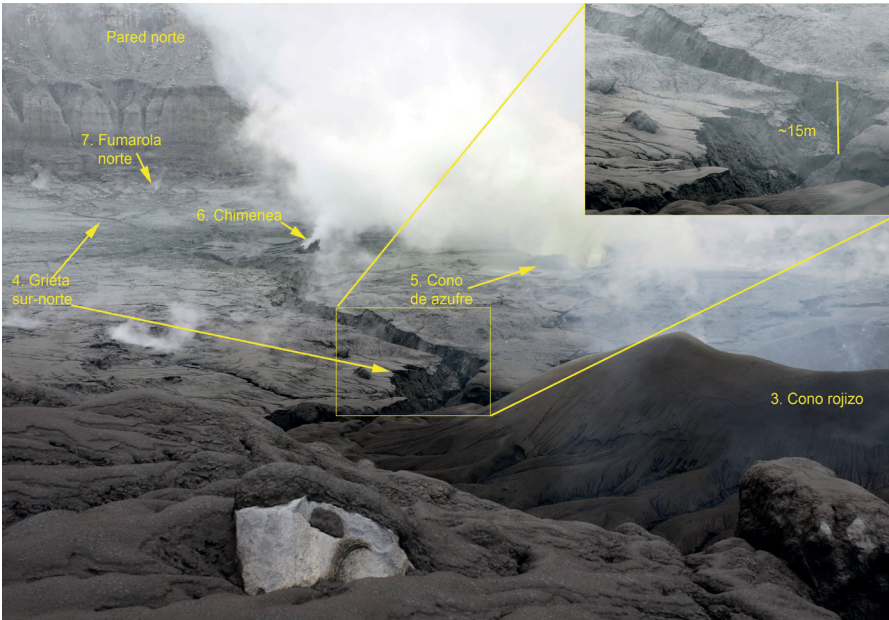
La figura 8 (grieta del fondo) muestra la sumatoria de al menos 5 de las estructuras contenidas en este informe. La foto fue tomada de sur a norte, por lo que permite apreciar al menos la mitad de la longitud total de la grieta diametral que cruza el cráter por completo. Donde esa fractura alcanza mayor profundidad es justo al lado norte del cono rojizo con una profundidad de al menos 20 metros y se torna más somera conforme avanza hacia la orilla norte. Su anchura máxima también se observa junto al mismo cono y al menos tiene 15 metros. Desde el fondo de esa estructura se desprenden gases y vapores, y no se observan lodos o materiales finos, lo cual deshecha la idea de cauce por escorrentía. Por el contrario, si no fuera una fractura activa se habría rellenado con los miles de toneladas de sedimentos que recibe ese lecho del cráter con cada evento lluvioso.

En su recorrido la grieta une a la mayoría de los puntos caracterizados aquí con la excepción del cono de azufre (No.5), el cual se encuentra ligeramente desplazado hacia el este. También el rumbo de esta grieta es coincidente con el gran alineamiento estructural que se extiende por unos

25 km, uniendo conos secundarios de Sabana Redonda con la Laguna de Rio Cuarto. Este patrón tectónico se repite para casi todo el territorio nacional continental y responde a alineamientos estructurales regionales, donde otros macizos volcánicos se asemejan. Más aun, la actividad aumentada del volcán pareciera coincidir con actividad sísmica de años recientes, la cual también muestra ese paralelo con las debilidades corticales citadas.

La grieta parte el fondo en dos hemisferios (este y oeste), donde el primero muestra mayor actividad por la abundancia de fumarolas y las grietas alargadas y activas que recorren la orilla este. Este hecho coincide con los puntos que mostraron mayor actividad en eventos eruptivos de años anteriores y que desfiguraron parcialmente la redondez del lago. Detonaciones freáticas se dieron en los bordes este y sureste (v.g. marzo 2006) y esos sectores aún hoy día muestran las enormes heridas en sus paredes. (4 Barboza, V et al 2006)

Figura 8. Grieta diametral uniendo el borde sur con el borde norte del cráter activo.



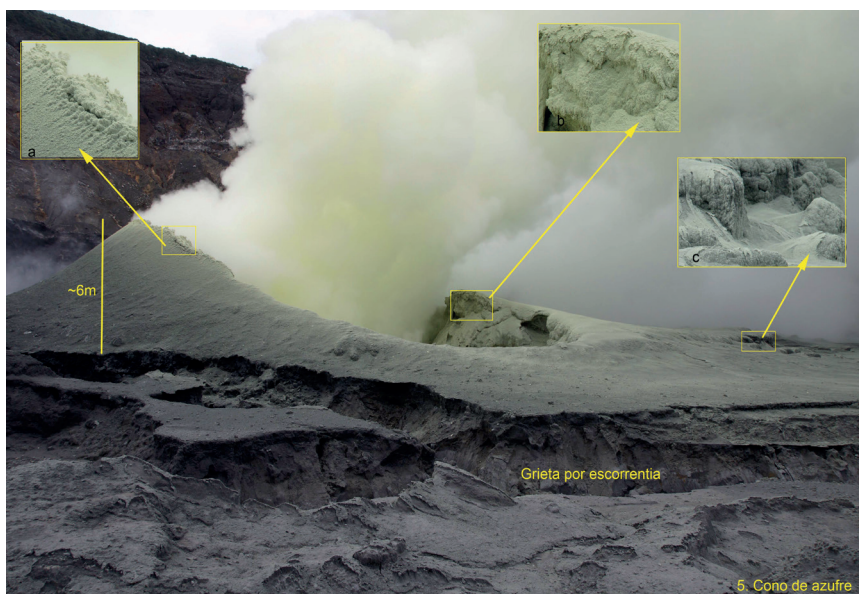
Fuente: Duarte, E., septiembre 2017.

Estructura No.5. Cono amarillo o cono de azufre.

Una estructura llamativa desde todo punto de vista es el cono amarillo (o cono de azufre; No.9) que tiene más de 6 metros en su pared este y unos 30 metros de base; en su eje más largo. Este cono está conformado por piroclastos de menor tamaño, pero principalmente de compuestos de azufre. Su textura lisa y no compacta da la impresión de un enorme montículo de azufre nativo, solo contaminado por partículas arrastradas en el flujo intenso que transita por esa cavidad. Los bordes de las paredes (principalmente la más alta al este) muestra acumulaciones de azufre tan puro que se ve como una enorme cresta de amarillo brillante (recuadro a). Las paredes internas también se observan con un similar amarillo intenso (recuadro b), mientras en el sector donde el contacto de la pluma es más constante se notan capas semi-fundidas de azufre que asemejan pequeñas coladas derretidas sobre la superficie (recuadro c). La cobertura de partículas de azufre se adelgaza a una mayor distancia de la boca del cono. De hecho, se observó, en momentos cuando la nubosidad redujo la luz en el fondo, flamas métricas de amarillo más intenso y azul claro.

Entre los años 89-90, cuando el lago se secó, anteriormente hubo conos similares que fueron inundados meses después por el ascenso rápido del nivel de agua de lluvia. En esta ocasión y a pesar de la abundancia de lluvias en meses anteriores pareciera que el balance es positivo en favor de la evaporación que producen los puntos calientes en el fondo del cráter. Al igual que en aquella ocasión la formación del cono se da de modo acumulativo por caída, aunque no de forma laminar, pues no se observan capas ordenadas en la base del cono. El curso de agua de una enorme quebrada, que corre del este hacia la depresión de la chimenea, corta parte del cono de azufre en su sección distal al norte y noreste (ver “grieta por escorrentía” en primer plano en figura 9).

Figura 9. Vista de norte a sur del cono amarillo o cono de azufre.



Fuente: Duarte, E., septiembre 2017.

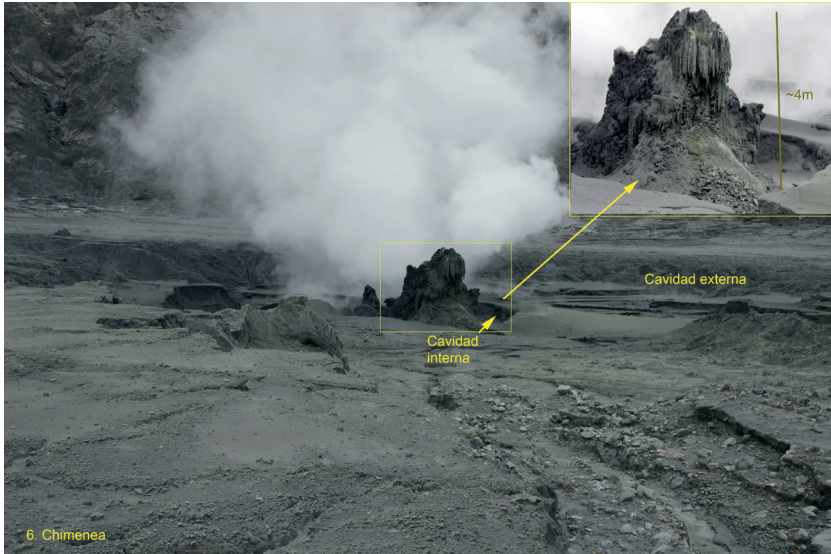
Estructura No.6. Chimenea.

A unos 50 metros al noroeste del cono amarillo se encontró una chimenea (Figura 10) de unos 4 metros de altura por al menos 6 metros de base. Durante la visita, esta figura semejaba un enorme “tocón de árbol” que exhalaba dos potentes fumarolas en forma casi horizontal. Esta chimenea se ha formado en el centro del último conducto en secarse. La depresión se observa como 2 cavidades concéntricas (o anidadas), donde la externa mide algo más de 30 metros y la interna unos 10 metros.

Por las formas que se observan a lo externo de esta chimenea se nota lo intenso de la actividad que la ha formado y las caprichosas formas a modo de cuerdas (o de parafina derretida), probablemente por la acumulación de azufre en su estado casi puro. Las 2 fumarolas producen un intenso sonido de válvula a presión desde la parte más alta de esta chimenea. Similares estructuras se han observado en el pasado en el fondo seco de este lago y en grandes fumarolas alrededor del cráter oeste del volcán Turrialba. Se observó que la emisión de esta chimenea es principalmente de

vapor, a juzgar por el color blanco de sus fumarolas. Sin embargo, en esta ocasión se pudo ver la alternancia de flujos amarillentos. Por el depósito de partículas finas alrededor de esta chimenea (cubriendo el fondo de ambas cavidades) se puede inferir que el proceso de producción y depositación es similar al cono de azufre de la figura 9. De hecho, durante la visita, se pudo observar una fina lluvia profusa de partículas amarillentas en los alrededores de las bocas citadas.

Figura 10. Vista general de la chimenea y sus cavidades alrededor.



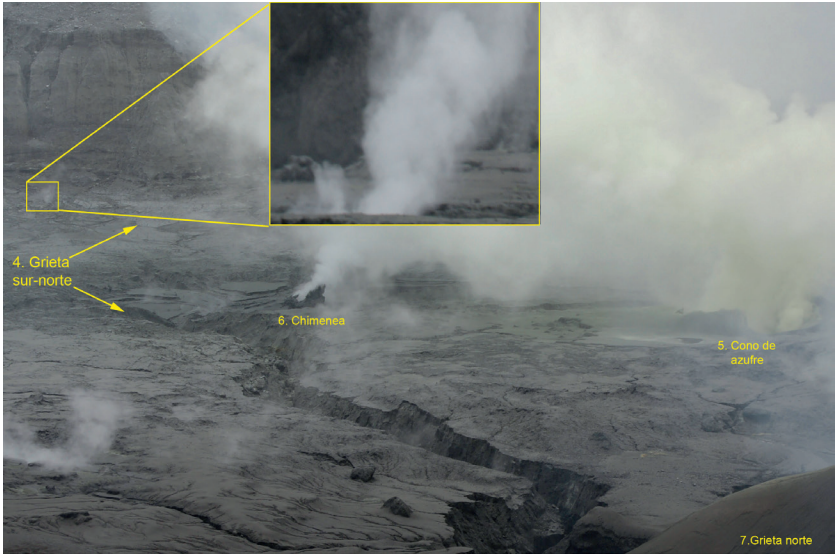
Fuente. Duarte, E., septiembre 2017.

Estructura No.7. Fumarolas del norte.

Finalmente, la estructura documentada más al norte es una cavidad de unos 2x2 metros, desde donde se desprende una constante fumarola que culmina el recorrido de la grieta diametral ya mencionada. Si bien, esta cavidad es pequeña comparada con las anteriores, llama la atención la posición y la constancia de su salida, aunque no ha desarrollado paredes ni cono. Más bien a la distancia pareciera una enorme válvula con emanaciones cargadas de agua; tipo geiser. Figura 11.

Cuando el lago mantenía su nivel usual se observó en ese punto una pequeña celda de convección que probablemente haya estado ahí en las dos ocasiones anteriores, cuando el lago se secó; entre el 89-90 y en el año 94.

Figura 11. Fumarolas en borde norte del cráter.



Fuente: Duarte, E., septiembre 2017.

Sectores alrededor del cráter y paredes afectadas.

Todas las paredes de la caldera fueron afectadas por las erupciones destructivas de abril; con efectos diferenciales dependiendo del evento específico. Las erupciones del miércoles santo privilegiaron los flancos oeste y suroeste, donde la mayor cantidad de materiales, de variado tamaño, se emplazó en el callejón de acidificación. Por ser una zona desnuda de vegetación no solo ese tapizado es muy visible, sino que el efecto de erosión fue rápido por lo que los materiales provocaron severos efectos en las cuencas de los ríos: Desagüe, Gorrión, Agrio y Aguas Gatas. La afectación en el sector de Bajos del Toro y sectores aledaños fue severa.

La actividad de jueves santo, aunque menor, produjo caída de proyectiles fuera de la caldera; alcanzando el bosque en dirección sur y hacia el mirador. Se documentó afectación en la infraestructura de ese lugar el cual apenas había terminado de ser construido.

Los materiales de las erupciones del viernes santo son tal vez los más voluminosos y cubrieron con granulometrías diversas toda la pared sureste, alcanzando el bosque en dirección hacia Botos. En la sección siguiente se detalla esta actividad por ser saliente.

Finalmente, las erupciones del sábado 22 de abril fueron tal vez las mejor documentadas por las cámaras de las universidades. Explosiones que arrancaron desde mitad de la tarde culminaron con eyecciones de material lítico que alcanzo hasta el mirador. Por esa razón esa estructura fue nuevamente impactada y la destrucción de equipo de vigilancia volcánica fue documentada.

Las áreas afectadas más allá del cráter (efectos de las erupciones del viernes santo).

Aunque se delimito el área de estudio, para este artículo en 2 km, el impacto de las diversas erupciones tuvo un alcance mucho mayor; ya fuera por caída directa o por transporte de materiales. Para fines ilustrativos se detallan los materiales y efectos de las erupciones del viernes santo.

El viernes 14 de abril por la mañana se produjo una erupción que lanzó una cantidad importante de materiales hacia el lado este y sureste del cráter. El volumen principal de esos materiales se localiza al este y sureste del Playón, en la terraza intermedia, el borde de la caldera y parcialmente en el bosque; más allá de la zona de aniquilación por acidificación. Balísticos (de distinto tamaño), sedimentos y gases afectaron una franja de bosque; entre la caldera y el lago Botos.

Hubo caída copiosa de sedimentos y líquidos del lago sobre el bosque. Asimismo, fragmentos rocosos de distinto tamaño hicieron impacto directo en ramas y troncos que aunados a los anteriores ha causado defoliación en el bosque leñoso que se localiza entre el borde de la caldera y el cono Botos. Antes el sendero que llevaba hasta el este de la caldera solía ser una caminata bajo el oscuro umbral del bosque; luego se tornó un sector iluminado por la caída masiva de hojas y ramas que se amontonaban en el piso.

La mayor parte de esta franja boscosa está compuesta por especies variadas, dentro de las que destacan; roble de altura, oreopanax, candelillo, copey y arrayanes. Muchos de los arbustos “volcados” exponen su raíz (lo que puede evidenciar la fuerza de la onda principal) y muchos

otros exhiben las lesiones provocadas por el impacto directo de materiales de distinta granulometría. También se puede observar la variedad de genéticas de los distintos bloques emplazados ahí; masivos, escoréáceos, tipo corteza de pan, suaves (sedimentos lacustres agregados) y abundantes restos de lo que fuera el domo. Es interesante comprobar que los troncos y ramas muestran la capa de sedimentos y lodo prácticamente solo en la cara que fue impactada.

Por la volcadura de esta sección del bosque, el paso por el sendero prácticamente desapareció, por lo que el desplazamiento por el sector es dificultoso. Esto tiene implicaciones para las labores de patrullaje por parte de los guardaparques y dificulta la accesibilidad de equipos de investigación que a menudo emplean el sendero para llevar o alcanzar equipos y sitios de interés.

En la franja despoblada de vegetación el impacto de bloques, de todo tamaño, es fácilmente visible. Bloques métricos dejaron cráteres de impacto de varios metros, aunque son la minoría. Aproximadamente, un 20 % del total de bloques visibles en superficie (diámetros de 10 a 70 cm) dejaron ese tipo de huella; principalmente aquellos masivos y pesados.

En este sector la abundancia de fragmentos se encuentra en la zona denudada de vegetación (previa a estas erupciones, por acidificación) y se emplazó una capa de materiales, principalmente preexistentes (del cráter) que varía en espesor desde 80 a pocos cm. La naturaleza de los bloques es muy variada y el remanente de los bloques, en el fondo de los cráteres de impacto, es altamente variable. En algunos casos si el bloque es sólido y compacto queda casi completo, mas en otras ocasiones es difícil distinguir al bloque principal que causó el hoyo.

Grandes cráteres se observan en ese sector y al examinar los núcleos remanentes o las “esquiras” se llega a la conclusión que proviene del enorme promontorio que conformaba el domo ahora destruido. Muchos pequeños cráteres de impacto son también comunes en este sitio.

El recorrido en este sector (ubicado a unos 800 m al sureste del punto de emisión) también arroja una variedad de tipos de balísticos; tipo corteza de pan, tipo escórea y restos de otros fragmentos que fueron compactados con el tiempo en el fondo del lago. Se encuentran algunos fragmentos, amarillo brillante, de azufre nativo (probablemente formado previamente a estas erupciones). Es notable que contrario a las bombas fusiformes

(encontradas en los materiales de las erupciones de los 50's) en esta visita no se encontraron.

La terraza intermedia se ubica a unos 400 m del extinto domo y muestra una capa de materiales de al menos un metro de espesor en su sección más amplia. Se combinan aquí gran variedad de diámetros y naturalezas de los fragmentos. En el recorrido se documentaron proporciones de bloques escoréaceos y masivos.

Recomendaciones.

Las características generales descritas en este reporte deberán ser ampliadas y mejoradas en futuras visitas, conforme la visibilidad y la seguridad lo permitan. Por el alineamiento de las estructuras descritas y por la tendencia regional de las debilidades corticales se puede pensar que hay procesos mayores de inestabilidad en el macizo donde el gran cráter es solo el punto más débil en el que se manifiesta la energía. El seguimiento a una posible falla general con trabajo de campo, sismología y otros métodos geofísicos sería recomendable.

Debido a que el cráter activo perdió su “muro de contención” ahora las erupciones podrían tener un mayor alcance en dirección sur (hacia el mirador). Aunque no se han notado erupciones dirigidas lateralmente. En casos calificados los materiales pueden salir expulsados en modo horizontal por lo que se requiere observación y atención en caso de reactivación de este volcán.

Por esa misma razón, los gases que provienen de las estructuras descritas aquí no encuentran obstáculo para moverse en dirección sur en caso de que la dirección usual de los vientos se invierta o se dirija hacia el mirador. En la logística de visitación controlada debería contemplarse la disponibilidad de mascarillas (o al menos tapabocas) como medida de contingencia para esta condición específica.

Como es consabido la atmosfera que produce un ambiente volcánico tiende a acidificar el medio rápidamente por lo que la corrosión es alta. El tratamiento de estructuras metálicas (y aun de otros materiales) debe ser tratadas acorde con el ambiente para aumentar su esperanza de vida.

Conclusiones

Las áreas transformadas más severamente son: el domo, el cráter y sus alrededores, la caldera, incluyendo a sus paredes. La geomorfología del cráter activo siempre ha sido cambiante y con más razón ahora luego de este periodo de actividad aumentada.

El tapizado de las paredes este, sur y oeste es uno de los cambios más notorios con esta actividad reciente y por la dinámica pluvial en el sector se sabe que bajará de forma energética hasta el fondo del lago. Los cambios descritos aquí afectan; la caldera volcánica y, mínimamente, las instalaciones del parque nacional. Las comunidades y otros sectores de interés comercial, agrícola y lechero reciben efectos diferenciales que deben ser abordados por una estructura social, política y económica acorde a las necesidades y capacidades.

En cuestión de 4 semanas el volcán Poás fue capaz de transformarse a sí mismo de muchas maneras y de continuar con la energía usual. El nivel de sedimentos y líquido en el fondo es una dinámica conocida para este coloso por lo eventos freáticos, y en el futuro no son descartables. Cuando esos eventos coinciden en estación seca con el lago seco la tendencia es que plumas de sedimentos viajen en dirección del viento, lo cual probablemente sorprenda poco a los vecinos de comunidades distantes (5 E. Duarte y E. Fernández, 2007).

Los cambios descritos aquí afectan la caldera volcánica y de continuar así afectarían poco el mirador o las instalaciones del parque; excepto, claro, sí la pluma de gases es llevada hacia el sur como sucede en algunas ocasiones durante el año. Las transformaciones en el fondo del cráter están a la orden del día si se toman en cuenta las múltiples variables de un elemento tan dinámico como este volcán activo.

Los aspectos descritos en este reporte deberán ser ampliados y mejorados en futuros reportes, conforme la visibilidad, el nivel de actividad y otras condiciones seguras lo permitan.

Los materiales sólidos documentados son principalmente pre-existentes y provienen del domo destruido y del fondo del lago. Una pequeña muestra denota actividad magmática juvenil, a juzgar por los fragmentos semi-fundidos encontrados en el recorrido. A pesar de lo dramático de estos depósitos quizás las modalidades eruptivas de mayor plazo, persistencia y lesividad puedan ser los gases magmáticos y las cenizas.

Este ensayo recoge generalidades de las estructuras mayores, aunque otros aportes futuros pueden ahondar en detalles que aquí no se incluyen. Dado lo vasto de la actividad, muchos temas pueden ser todavía abordados desde otros campos para que aporten al conocimiento multidisciplinario de un periodo de actividad extraordinaria.

Referencias

- Barboza, E., Duarte, E., Fernández, E., Hernández, L., Hernández, E., Malavassi, T., Marino, M., Martínez, W., Sáenz, R. y Van der Laat (2006). *Estado de actividad del Volcán Poás; marzo 2006*. Boletín de prensa. Página web OVSICORI. Recuperado de file:///D:/Eliecer/Downloads/Boletin1.pdf
- Duarte, E., (2017). *Relleno, Sedimentación y Erosión por Erupciones Recientes del Volcán Poás*. (Reporte de campo: 04 de setiembre de 2017 Recuperado de <http://www/htdocs/vulcanologia/informeDeCampo/2017>
- Duarte, E. y Fernández, E. (junio 2007). Vulnerabilidad económica durante su cierre y espacio de preparación durante la calma. *Revista entorno a la prevención*, 4, 11-15
- Duarte, E., Fernandez, E., Jiménez, W. (2013). *Erupciones freáticas del V. Poás: Frecuencia y características. 20/07/2013*. Recuperado de <http://www/htdocs/vulcanologia/informeDeCampo/2017>
- Fernandez, E., Duarte, E., Sáenz, W., (1999). *Acid Rain Impact at Poás Volcano During 1999*. Póster presentado en el Octavo Taller Internacional De Gases Volcánicos. Organizado por The International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI) y The commission on the Chemistry of Volcanic Gases (CCVG). Celebrado en Nicaragua y Costa Rica del 26 de marzo al 2 de abril de 2003



Creación de mapas acústicos en los cantones de Heredia, Alajuela y Belén, como indicadores de la contaminación sónica.

Development of acoustic maps in Heredia, Alajuela and Belén counties, as indicators of noise pollution.

Ligia Bermúdez-Hidalgo¹

José Castro-Solis²

Karla Vetrani-Chavarría³

Igor Zúñiga-Garita⁴

Manfred Murrell-Blanco⁵

Douglas Barraza⁶

Manuel Méndez-Flores⁷

Universidad Nacional, Costa Rica

Resumen

El presente artículo corresponde a la conformación de mapas acústicos basados en la toma de datos de ruido en los cascos urbanos de los cantones de Heredia, Alajuela y Belén en Costa Rica. Para esto se realizó un muestreo, utilizando sitios de denuncia por contaminación sónica en Alajuela y Belén,

- 1 Doctora en Ingeniería Industrial, Costa Rica, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: ligia.bermudez.hidalgo@una.cr
- 2 Máster en Conservación y Manejo en Vida Silvestre, Costa Rica, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: jose.castro.solis@una.cr
- 3 Máster en Administración de Proyectos, Costa Rica, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: karla.vetrani.chavarria@una.cr
- 4 Máster en Administración de Proyectos, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: igor.zuniga.garita@una.cr
- 5 Máster en Ingeniería en Recursos, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: manfred.murrell.blanco@una.cr
- 6 Máster en Salud Ocupacional con énfasis en Higiene Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: douglas.barraza.ruiz@una.ac.cr
- 7 Máster en Ingeniería Industrial, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: manuel.mendez.flores@una.cr

Este artículo corresponde a la ponencia presentada en el I Congreso Centroamericano de Ciencias de la Tierra y el Mar, realizado en San José, Costa Rica, del 13 al 16 de noviembre de 2017.

mientras que en Heredia se utilizaron los vértices de cada uno de los cuadrantes que conforman el distrito Central como sitio de muestreo. El resultado más importante obtenido en este estudio está referido a la identificación en su mayoría de sitios con niveles de ruido que sobrepasan los límites permisibles establecidos en el Reglamento de control de ruido que se pueden observar gráficamente en los mapas acústicos. Esto lleva a la conclusión de que los mapas acústicos representan una herramienta fundamental para el control de ruido y planificación de estrategias de mitigación y confinamiento de áreas de impacto por contaminación sónica.

Palabras clave: Alajuela, Belén, contaminación acústica, Heredia, mapas acústicos.

Abstract

The present study corresponds to the conformation of acoustic maps based on the collection of noise data in the urban centers of Heredia, Alajuela and Belén, in Costa Rica downtown. Therefore, a sampling was carried out using sites of complaint for noise pollution in Alajuela and Belén, while in Heredia the vertices of each quadrants in Central District were used as a sampling site. The most important result obtained in this study is related to the identification of mostly sites with noise levels that exceed the permissible limits established in the Regulation that can be observed graphically in the acoustic maps. This leads to the following conclusion the acoustic maps represent a fundamental tool for the noise control and to plan the mitigation strategies and confinement of noise pollution areas.

Keywords: Alajuela, Belén, Noise pollution, Heredia, acoustics maps.

Introducción

Los acelerados cambios en la economía global, los flujos migratorios de personas, y la ocupación de nuevos terrenos en pro del desarrollo social han modificado la estructura tradicional del paisaje, lo que a su vez ha implicado la exposición a nuevos niveles de ruido considerados como contaminación ambiental. La acción del ser humano ha cambiado considerablemente muchos ambientes alrededor del mundo produciendo un incremento del ruido como una de las principales consecuencias del desarrollo económico (Farina, 2014). La continua expansión de la contaminación acústica ha reducido drásticamente los espacios libres de ruido antropogénico y las oportunidades de disfrutar zonas tranquilas en medio de la naturaleza, al mismo tiempo atenta contra la salud de los ecosistemas (Iglesias, 2014; Lynch, Joyce y Fristrup, 2011).

El sonido es una forma de energía mecánica propagada en forma de ondas longitudinales que producen una sensación auditiva al causar cambios en la presión, por ejemplo, del aire (Giménez, 2007). Físicamente, no hay diferencia entre sonido y ruido, sin embargo, el ruido se define como

un sonido voluntario o involuntario que al añadirse a una señal acústica disminuye su capacidad de ser percibida o interpretada adecuadamente.

La contaminación acústica, principalmente en los grandes centros urbanos del orbe, representa uno de los principales problemas de salud por el daño auditivo y efectos que genera sobre el cuerpo humano, convirtiéndose en un tema de salud pública (Kurakula 2007, MER 2011, Oliviera *et al*, Szczodrak *et al* 2013), concretamente referido a la pérdida auditiva de la gente que vive en ellos (Gray, 2017).

El propósito de la presente investigación está enfocado en la determinación de los niveles actuales de ruido en distintos puntos del casco urbano de los cantones de Heredia, Belén y Alajuela, Costa Rica, utilizando métodos no convencionales de medición. Esta información permitió la conformación de mapas acústicos, donde se determinaron varias categorías, una primera categoría que incluyen sonidos de gran intensidad que abarcan actividades como fábricas donde una exposición prolongada puede producir pérdida auditiva y trastornos fisiológicos, y una segunda categoría que es más imprecisa, ya que considera elementos como ruido vehicular, maquinaria, voces humanas, los cuales son variables dado que este depende de la actividad que se desarrolle.

Marco teórico – conceptual

El sonido se define como sensación percibida por el oído humano, producto de las rápidas fluctuaciones de la presión del aire que, por lo general, son producidas por objetos que vibran y transmiten esta vibración a las partículas del aire (Ochoa, 2009). A partir de este se establece el concepto de ruido que es definido como un sonido indeseado y consecuentemente molesto, que puede producir una afectación fisiológica y psicológica en uno o más receptores (Iglesias, 2014). El ruido como fenómeno físico es un movimiento ondulatorio producido en un medio elástico por una fuente de vibración que provoca pequeñas variaciones de la presión atmosférica en el oído (Bovea et al., 2011).

Considerando esto se define el nivel de presión sonora que es una medida logarítmica de la presión acústica efectiva de un sonido con respecto a un valor de referencia (Farina, 2014). La unidad de medida correspondiente es la de presión, es decir, el Pascal (Pa). El ser humano es capaz de percibir presiones que van desde los 20 μ Pa hasta los 100 Pa, lo que establece una

relación entre la máxima y la mínima presión sonora de 1 000 000 de veces. Por lo que resulta conveniente el uso de una escala logarítmica, cuya unidad es el decibelio (dB), la cual permite evitar el manejo de número muy pequeños o excesivamente grandes (Baca y Seminario, 2012).

Según datos de la OMS, más de 43 millones de personas entre 12 y 35 años padecen una pérdida auditiva discapacitante debido a diferentes causas (OMS, 2015). Pero no solo la pérdida de la capacidad auditiva es un efecto del ruido ambiental y ocupacional, sino que el riesgo de accidentes laborales, el estrés y problemas que afectan a las mujeres embarazadas incrementan con un aumento en el ruido (OSHA, 2005).

OMS en sus guías para el Ruido Urbano considera que los efectos del ruido y sus consecuencias de largo plazo sobre la salud se están generalizando. Por lo cual es esencial tomar acciones para limitar y controlar la exposición al ruido ambiental. Esas acciones deben estar respaldadas por una adecuada evaluación científica de los datos disponibles sobre los efectos del ruido, en particular, la relación dosis-respuesta. Esa relación constituye la base del proceso de evaluación y gestión de riesgos.

La contaminación acústica en una ciudad es catalogada por algunos organismos internacionales como el cuarto problema ambiental de mayor importancia a nivel de salud humana, proviene fundamentalmente de las actividades que desarrollan sus ciudadanos, y requiere que la administración responsable disponga de una política de actuación que garantice unos niveles de calidad de vida aceptables (MER, 2011). En datos aportados por la Organización de Salud y Medio Ambiente de Andalucía (OSMAN) en 80 % del ruido en ambientes urbanos se debe al tráfico, 10 % a la industria y el restante 10 % a otras fuentes (OSMAN, 2018).

Se debe considerar que aun cuando se posee un grado de subjetividad en el tema, pues los niveles de ruido para una persona pueden ser desagradables, para otra no lo son, existen parámetros adecuados y necesarios para cuantificar y catalogar los niveles de ruido (Kurakula 2007). Por ejemplo, en Costa Rica, existe el Reglamento para el control de contaminación y ruido (en adelante **Reglamento**), cuyo decreto ejecutivo es el No. 39200-S, en el cual se definen los niveles de ruido permitidos según la clasificación de la zona de muestreo. Las zonas clasificadas en el reglamento son: zona residencial, zona comercial, zona mixta, zona industrial, zona

agrícola y pecuaria y zona de tranquilidad. Los niveles de ruido permitidos, tanto para emisor como receptor se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 1. Límites de niveles de sonido en decibeles (dB) de acuerdo con el Reglamento para el control de contaminación y ruido (Decreto No. 39200-S)

		ZONA RECEPTORA									
		Residencia		Comercio		Industria o agrícola/pecuaria		Tranquilidad		Mixta	
ZONA EMISORA	HORARIO	D[?]	N[?]	D	N	D	N	D	N	D	N
	Residencial	65	45	65	55	70	60	50	45	60	50
	Comercial	65	45	65	55	75	65	50	45	60	50
	Industria-agrícola-pecuaria	65	45	70	65	75	75	50	45	60	50
	Mixta	60	50	60	50	60	50	50	45	60	50

Fuente: Ministerio de Salud, 2015.

Existen varios factores reconocidos que contribuyen al aumento de la generación de ruido, en los que se encuentra una alta flota vehicular, que, al combinarse con un aumento en la densidad y altura de las construcciones existentes, así como concentración de personas y sonidos ambientales, lleva a crear espacios limitados, generando ambientes muy densos traduciendo en zonas con niveles inaceptables de ruido ambiental (Kurakula 2007, Hong y Jeon 2014).

Este fenómeno puede ser abordado de varias formas, una de las cuales es la representación espacial a partir de mapas acústicos, los cuales pueden ser utilizados como herramientas diagnósticas con el fin de aproximar el comportamiento del ruido dentro de las ciudades, para lo cual se pueden combinar el análisis espacial a través de modelos matemáticos y algorítmicos, como elementos iniciales para ordenamiento territorial y construcción (Lazar *et al* 2007, Villatoro 2008, Murillo *et al* 2012). El desarrollo de los mapas para la representación del sonido trabaja bajo métodos de interpolación utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG), donde se pueden seleccionar distintos métodos según el comportamiento y arreglo espacial de los datos.

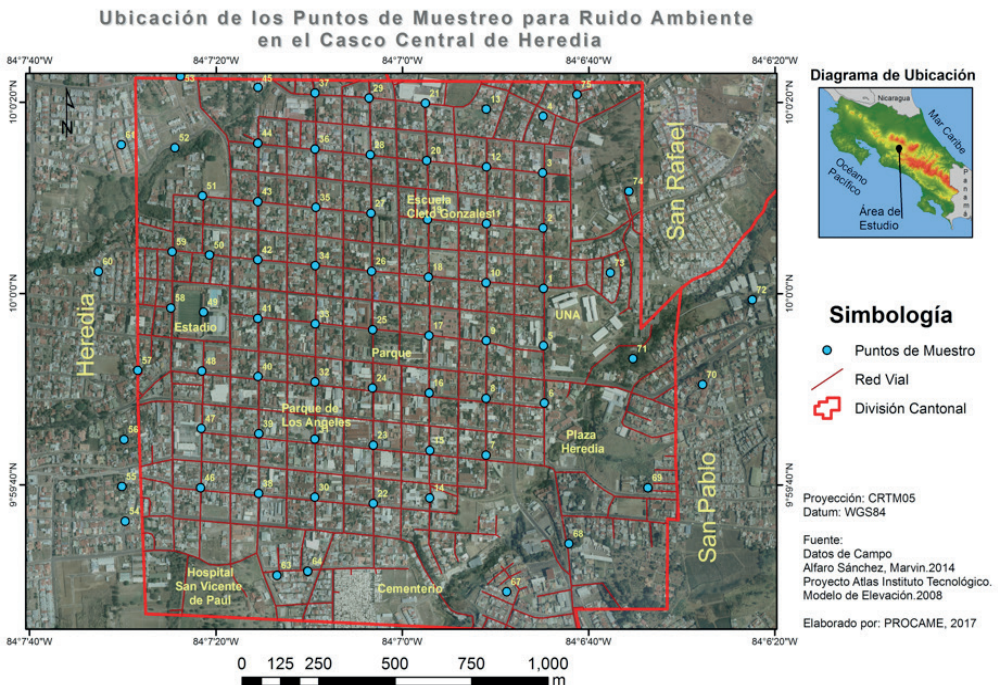
Marco metodológico

a. Área de estudio

La selección de los puntos de muestreo en los diferentes centros urbanos de los cantones de Alajuela y Belén se realizó mediante la definición de sitios de interés por las respectivas municipalidades, denuncias por ruido presentadas al Ministerio de Salud y otros puntos específicos.

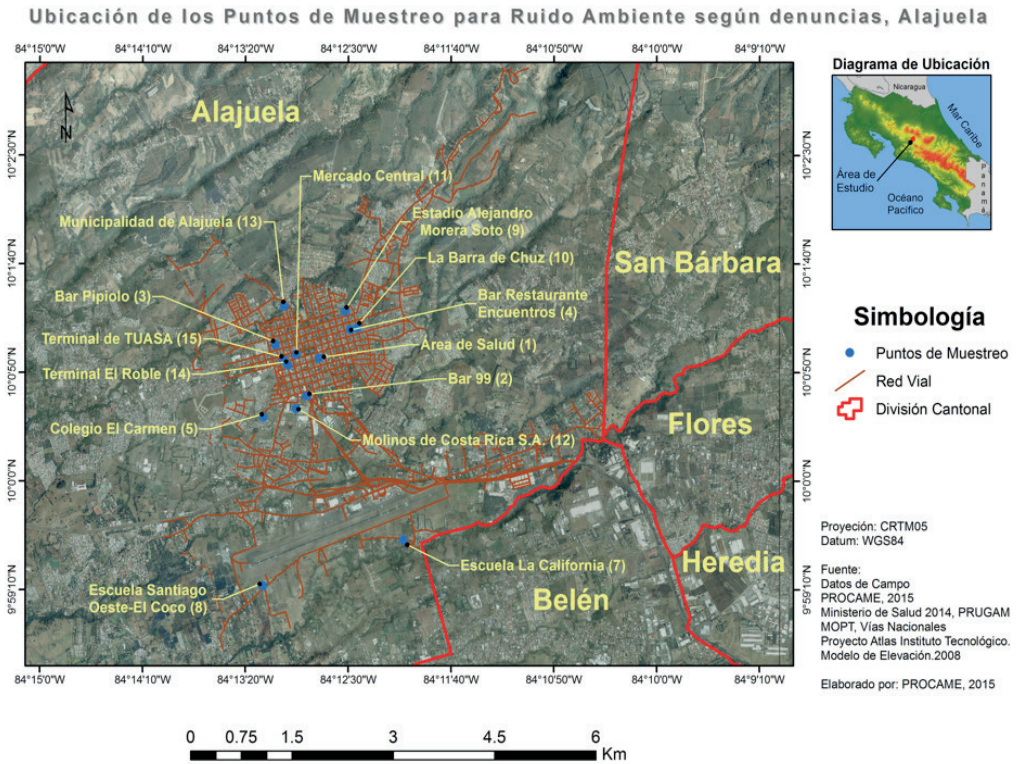
Para la ubicación de los puntos de muestreo, se realizó la delimitación geográfica del área de estudio de cada uno de los cascos urbanos de los cantones. En el caso de Heredia, el establecimiento de los puntos de muestreo se realizó por parte del máster Marvin Alfaro, funcionario de la municipalidad, y fue a través de la distribución de los puntos en forma sistemática dejando una cuadra de por medio, de esta forma se definieron 83 puntos de muestreo, así como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo, Heredia, Costa Rica, 2015.



Con respecto a la definición de los sitios de muestreo de Alajuela, se establecieron a partir de la revisión de expedientes sobre denuncias por contaminación acústica, según información del Ministerio de Salud. Además, al ser este estudio un plan piloto, la municipalidad de dicho cantón incorporó otros sitios, en los cuales se obtendría información relevante para el ordenamiento territorial. En este sentido, se definieron 16 puntos de muestreo, los cuales se muestran en la figura 2.

Figura 2. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo, Alajuela, Costa Rica, 2015.

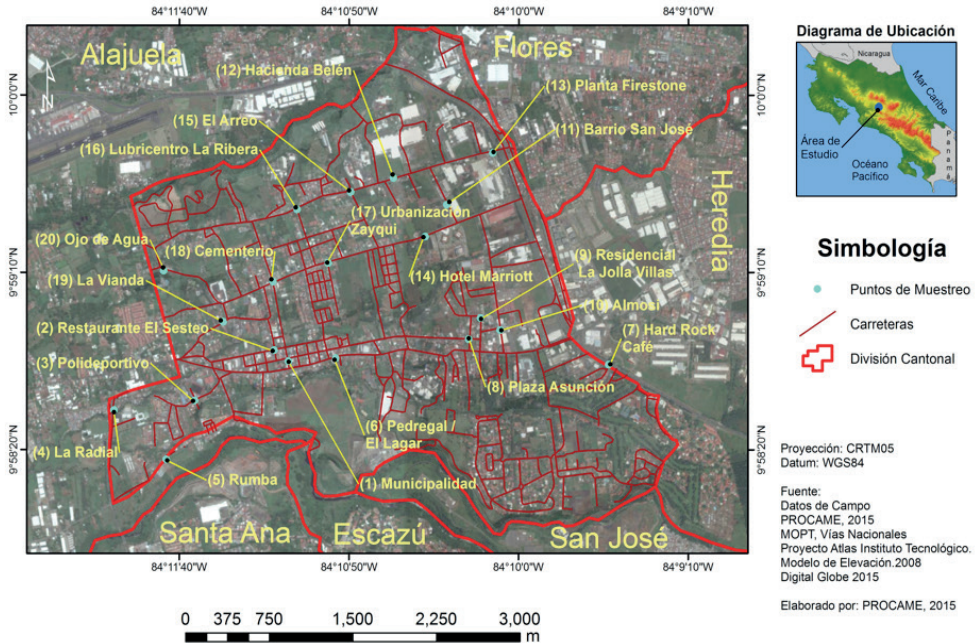


La definición de los puntos de muestreo en el casco urbano del cantón de Belén partió de una base de datos sobre denuncias realizadas específicamente en ciertos lugares, cuya información fue aportada por la municipalidad. Estos puntos fueron georreferenciados y mapeados, para

proseguir con la toma de datos y la ubicación geográfica de éstos se pueden observar en la figura 3.

Figura 3. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo, Belén, Costa Rica, 2015.

Ubicación de los Puntos de Muestreo para Ruido Ambiente, Municipalidad de Belén



b. Toma de datos y determinación del intervalo temporal de medición

Para el casco urbano de Heredia, la toma de datos se realizó utilizando la aplicación para teléfonos móviles Metal Med db, con una duración de 5 min por ubicación. La toma de los datos se realizó en horario diurno en distintas horas del día a lo largo de aproximadamente tres meses de medición para cubrir todos los puntos. En Alajuela los datos se tomaron con la utilización de sonómetros Extech SN004 y QuestSoundPro, con una duración de 5 min con 15 repeticiones por ubicación. La toma se llevó a cabo en horario diurno, que según el Reglamento lo define de 6:00 a.m. a 8:00 p.m., durante

cinco meses, de febrero a junio del año 2015. Para Belén, el método de toma de datos fue realizado con el sonómetro QuestSoundPro, con una duración de 5 min con 15 repeticiones por ubicación y se realizó para los dos horarios, diurno y nocturno, donde en el primero se consideraron las horas picos es de 6:00 a.m. a 9:00 a.m. y de 4:00 p.m. a 7:00 p.m., para un total de 6 h, y en el segundo se tiene una distribución de 8:00 p.m. a 6:00 a.m. para un total de 10 h. Esta toma se realizó en 3 meses, de octubre a diciembre del 2015.

c. Medición de campo y procesamiento de información

Para las mediciones de campo, se utilizaron instrumentos de medición clase 1 y 2, según lo establece la norma IEC 61672-1:2001, y los cuales fueron calibrados previamente y verificados posteriormente a cada serie de mediciones. En el momento de la toma de datos el equipo de medición se encontró a una altura aproximada de 1,5 m del nivel del suelo, con un ángulo de declinación de 30° a 60° y una distancia con respecto al cuerpo del operario de 0,5 m.

Debido a que las mediciones se realizaron en el exterior, se utilizó una pantalla anti viento y a la vez se obtuvieron variables relacionadas como temperatura, presión atmosférica y velocidad del viento anterior y posterior a la toma de los datos. Es importante señalar, que no se tomaron datos mientras las condiciones meteorológicas fueran adversas, como, por ejemplo, fuertes vientos, tormentas eléctricas, u otros que afecten la medición o el equipo.

Una vez obtenida la información de las mediciones mensuales, se procedió a ingresar los datos al módulo de Excel “Mediciones y Cálculo de Incertidumbre Ambiental” (Microsoft 2013), el cual es parte del programa “Ruido y su control”. Mediante el procesamiento de la información se calcularon los siguientes datos:

Nivel de presión sonora máximo, el cual determinó el valor del ruido más elevado obtenido durante el día de medición.

Nivel de presión sonora mínimo, que determinó el valor del ruido más bajo obtenido durante el día de medición.

Sumatoria de ruido, donde se determinó la sumatoria logarítmica de los niveles de presión sonora del total de las mediciones durante el día de medición y que se expresa según la siguiente fórmula:

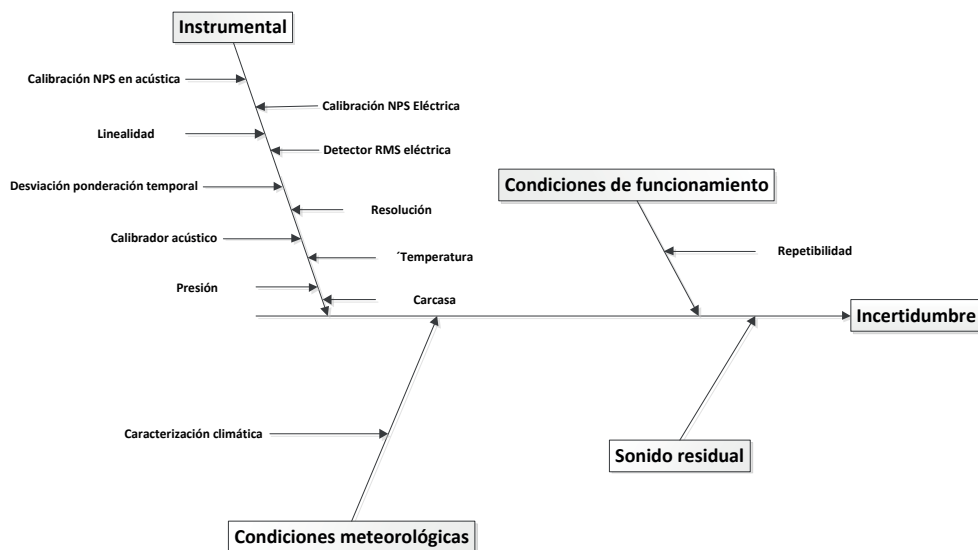
$$L_{\text{presultado}} = 10 * \log \left(10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} + 10^{\frac{L_{p3}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{pn}}{10}} \right)$$

Nivel de presión sonora continuo equivalente, o nivel continuo equivalente (Leq), el cual contiene la misma energía que el ruido medido en una cantidad definida de tiempo. Un aspecto por considerar es que el ruido debe ser constante, por lo que se puede comparar el riesgo de daño auditivo ante la exposición a diferentes tipos de ruido, si se usa en la ponderación A se conoce como LAeq (Rejano, 2000). El cálculo del valor cuadrático medio de la presión sonora pondera a un período de observación se obtiene bajo esta expresión:

$$L_{\text{Aeq,T}} = 10 * \log \left[\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{p_A^2(t)}{p_{\text{ref}}^2} \right) dt \right] \text{ (dBA)}$$

Incertidumbre. Para cada una de las mediciones realizadas, con excepción de los datos de Heredia, se calculó la incertidumbre de los niveles de presión sonora, la cual depende de los siguientes factores: la fuente sonora y el intervalo de tiempo de medida, las condiciones de operación (repetibilidad), las condiciones del suelo y el clima, la distancia a la fuente, el método de medida y la instrumentación y del sonido residual. La incertidumbre de medida se expresa como una incertidumbre expandida basada en la incertidumbre típica combinada, multiplicada por un factor de cobertura de 2, que proporciona una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95 % (el cálculo de la incertidumbre se basó en lo establecido por la Norma ISO 1996-2: 2009). En la figura 4 se presentan las fuentes.

Figura 4. Componentes de incertidumbre en medición de ruido ambiente (ISO, 2009).



d. Mapeo de la información

Para ligar la información de campo con los puntos de muestreo, se creó una hoja de cálculo (Microsoft), donde se colocaron los valores medidos con un identificador único, el cual debía ser igual al archivo cartográfico vectorial con la ubicación de las coordenadas. Hecho lo anterior, se procedió a ligar las bases de datos por medio del programa especializado ArcGIS v. 10.3 (ESRI 2014) a través de una unión virtual de tablas de atributos, utilizando el identificador único como enlace entre los archivos y, posteriormente, se guardó como un nuevo tema. Este proceso se realizó para cada una de las visitas de campo, generando una base de datos mensual de las mediciones realizadas.

La creación de la máscara de análisis se generó de la combinación de las capas temáticas de distritos de Costa Rica (Geotecnologías a partir de hojas 1:50000 SF) y red de caminos (IGN a partir de hojas 1:50000, 2004), para este último se creó un área de amortiguamiento (buffer) de aproximadamente 10 m, con el fin de unir los dos temas, utilizando mapas de las municipalidades, se extrajo la información catastral de predios con un sistema de georeferenciación y reclasificación de los valores para su posterior verificación. Toda la información generada está proyectada en

Costa Rica Transversal de Mercator (CRTM05) con el elipsoide de referencia WGS84.

El análisis espacio-temporal mensual para los sets de datos se realizó a partir de un análisis variográfico para determinar el comportamiento de las mediciones (Yepes *et al* 2009) utilizando el módulo de geoestadística para ArcGIS (ESRI 2014). Así mismo, se generaron varios modelos en formato raster, considerando la cantidad de información disponible y obtener el más representativo según el comportamiento esperado.

Utilizando el módulo de interpolación, herramientas de análisis espacial (ArcGIS 2014), se trabajó con interpoladores IDW (Correa *et al* 2008, Villatoro *et al* 2008, Yepes *et al* 2009, Caracausi 2014), dado que representó de mejor forma la distribución espacial de los datos. El método asigna valores de más peso a los puntos más cercanos a los puntos de medición, utilizando un algoritmo sobre distancias inversas, asumiendo una estructura lineal de los datos.

A raíz de esto, se creó un modelo mensual para las mediciones, utilizando una resolución espacial de 2 m x 2 m y se utilizó álgebra de mapas para realizar la combinación de los modelos interpolados mensuales, tanto diurnos como nocturnos (uno para la sumatoria de ruido y otro nivel continuo equivalente), donde el resultado final fueron las representaciones medias del comportamiento del ruido para todo el período de medición.

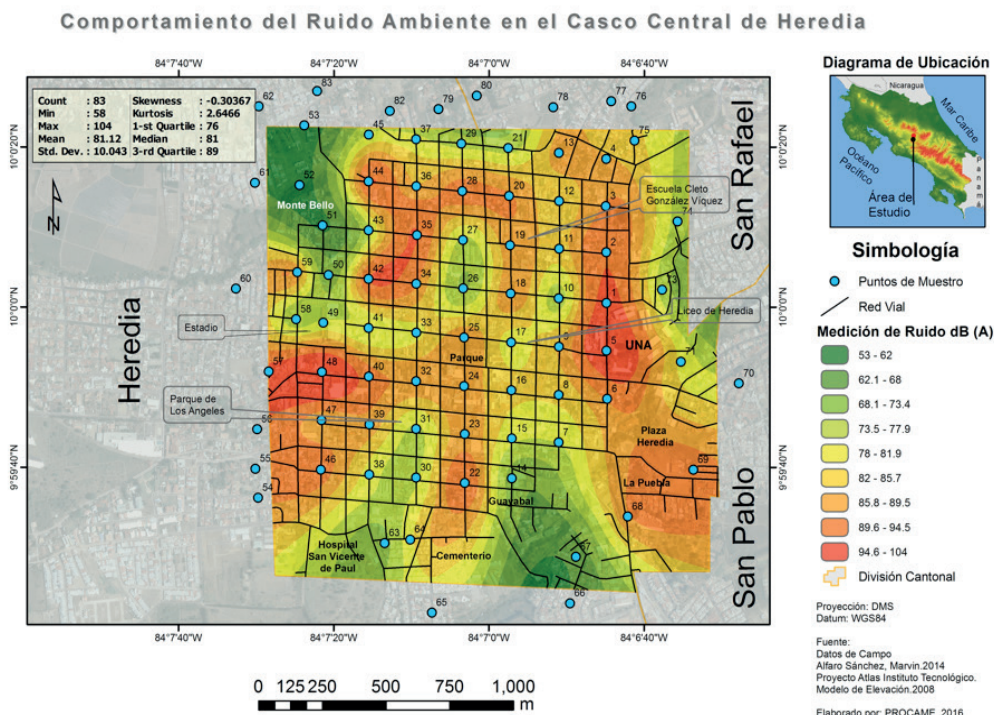
Resultados

a. Niveles de ruido en Heredia

De acuerdo con el Reglamento, el casco central de Heredia está conformado de tres zonas, residencial, comercial y tranquilidad. En cuanto a la zona residencial (la de mayor superficie), se determinó que el 8,6 % de los datos obtenidos de niveles de ruido presenta valores menores o iguales a 65 dB(A), mientras que el 91,4 % restante supera este valor, con datos que llegan hasta 104 dB(A). La zona comercial, ubicada principalmente en el centro del casco urbano de Heredia, mostró el mismo comportamiento que el área residencial, donde 57 % de los sitios muestreados presentan niveles de ruido entre 73 dB(A) y 85 dB(A), mientras que el 43 % restante presenta valores mayores a 85 dB(A). En la zona de tranquilidad, ubicada al sur del casco urbano (en los alrededores del Hospital), se mostraron niveles de ruido mayores a 50 dB(A), cuyo valor es el límite permitido como sitio receptor

según el Reglamento. Si se observa el mapa acústico de Heredia (Figura 5), las áreas de color verde, ubicadas en su mayoría en la periferia, son las que presentan los niveles de ruido más bajos, no obstante, las zonas con niveles de ruido inferiores a 65 dB(A) no superan el 10 % de los sitios de muestreo (zonas de color verde oscuro). Esto quiere decir que aproximadamente el 90 % de la superficie del casco central de Heredia tienen valores de ruido superiores 65 dB(A). Las áreas que muestran los mayores niveles de ruido se ubican en el sector de la Universidad Nacional y en la salida de Heredia hacia San Joaquín de Flores y Alajuela, con valores establecidos en un intervalo de 94,6 dB(A) a 104 dB(A), y los sitios donde se presentan los valores de ruido más bajos, corresponden a los sectores residenciales de la periferia, principalmente al norte y sur, como, por ejemplo, Monte Bello y Corazón de Jesús en el Norte y al sur del Cementerio y Guayabal.

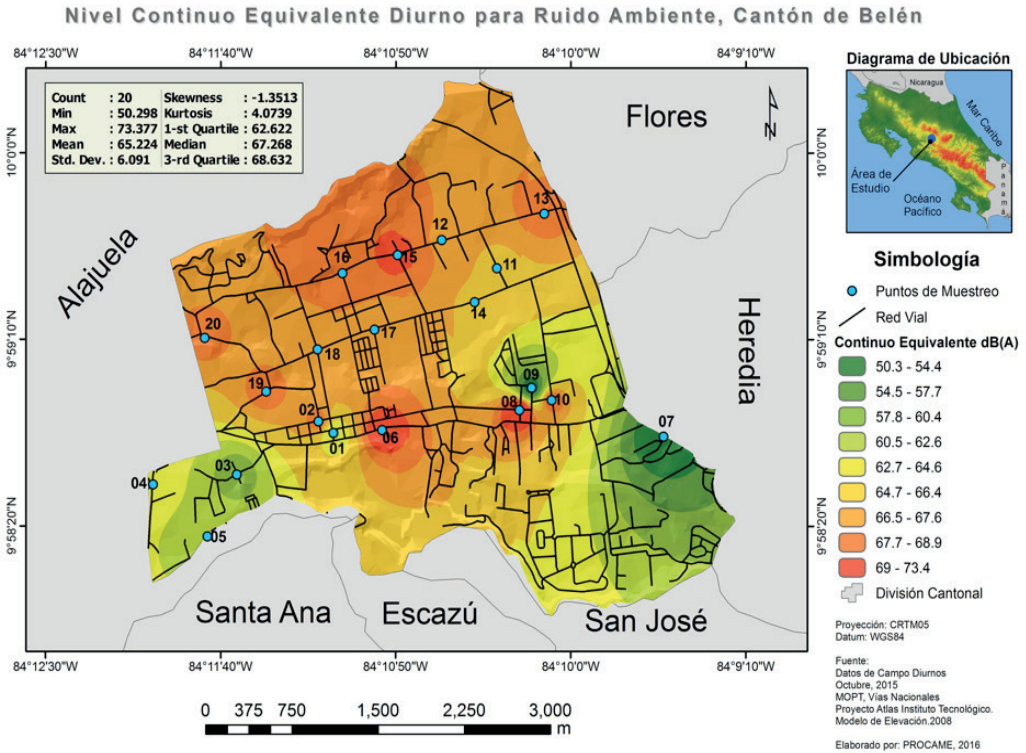
Figura 5. Mapa acústico en los sitios de muestreo para el casco urbano del cantón Central de Heredia, Costa Rica



b. Niveles de ruido en Belén

Como se citó en la metodología, el muestreo del estudio en el cantón de Belén se realizó durante tres meses y en dos horarios, diurno y nocturno. Para efectos de este artículo, y con el afán de realizar un análisis comparativo, se muestran solamente los datos obtenidos del mes de octubre para el año 2015 en los dos horarios, los puntos de muestreo fueron ubicados en diversas zonas según la categoría establecida por el Reglamento, siempre predominando la zona residencial. En cuanto a los resultados obtenidos, para el horario diurno se obtuvieron niveles de ruido que oscilan entre 41,6 dB(A) (sitio Rumba) y 74,8 dB(A) (sitios el Lagar y el Arreo). Cabe señalar, que el sitio el Arreo se ubica en zona industrial y el sitio Lagar se localiza en zona residencial a pesar de ser una actividad comercial-industrial. En relación con el sitio Rumba, cuya actividad se cataloga como comercial, está ubicado en zona residencial. En la figura 6, se observa que en el casco urbano del cantón de Belén, los sectores sureste y suroeste presentaron los niveles de ruido más bajos (en el mapa se muestran de color verde), que coinciden con zonas residenciales y de menor tránsito vehicular. Por otro lado, los sitios de muestreo con mayores niveles de ruido se ubican en el centro y norte del casco urbano, específicamente en las áreas donde se localizan industrias y comercios y a la vez, hay mayor afluencia de tránsito vehicular y de maquinaria pesada.

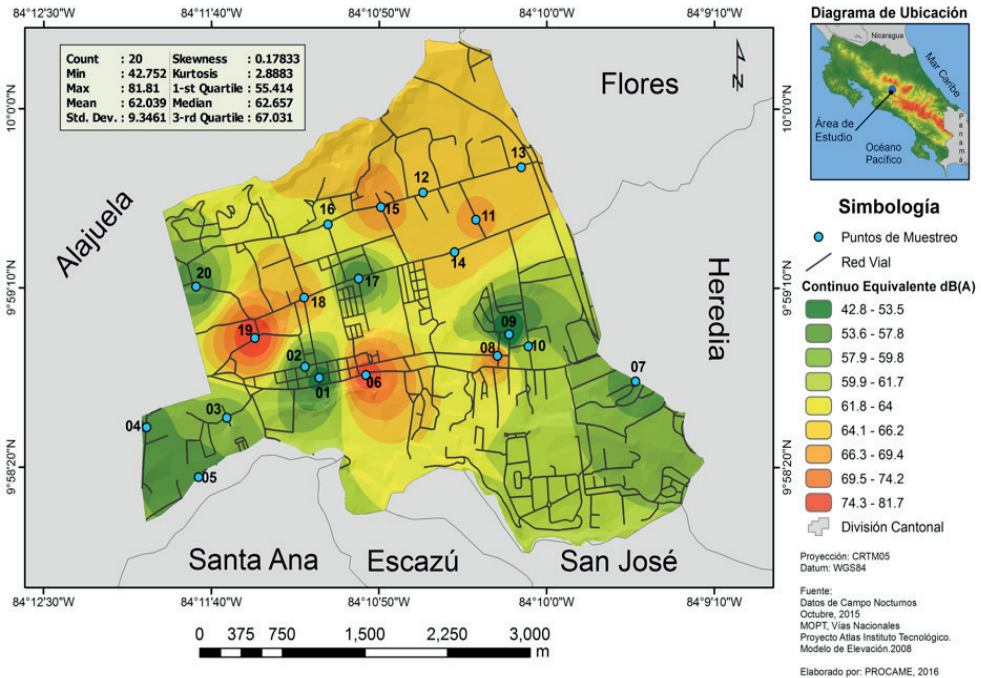
Figura 6. Mapa acústico en los sitios de muestreo en horario diurno para el casco urbano del cantón Belén, Heredia, Costa Rica.



Si se hace una comparación de los niveles de ruido entre el horario diurno y el nocturno, se pueden observar diferencias significativas, debido a que en el segundo se da la presencia de mayores áreas de color verde y los colores rojos que muestran los valores más altos de ruido empiezan a disminuir. Sin embargo, es interesante observar el sector del punto 07, correspondiente a Hard Rock Café, en el cual hay un incremento en los niveles de ruido en el horario nocturno, aspecto que se justifica por el tipo de actividad que se realiza en este sitio (centro nocturno), aun así no supera los 60 dB(A) (misma situación sucede en el sitio Rumba que pasa de 41,6 dB(A) en horario diurno a 55,3 dB(A) en horario nocturno), como se observa en la figura 7

Figura 7. Mapa acústico en los sitios de muestreo en horario nocturno para el casco urbano del cantón Belén, Heredia, Costa Rica.

Nivel Continuo Equivalente Nocturno para Ruido Ambiente, Cantón de Belén

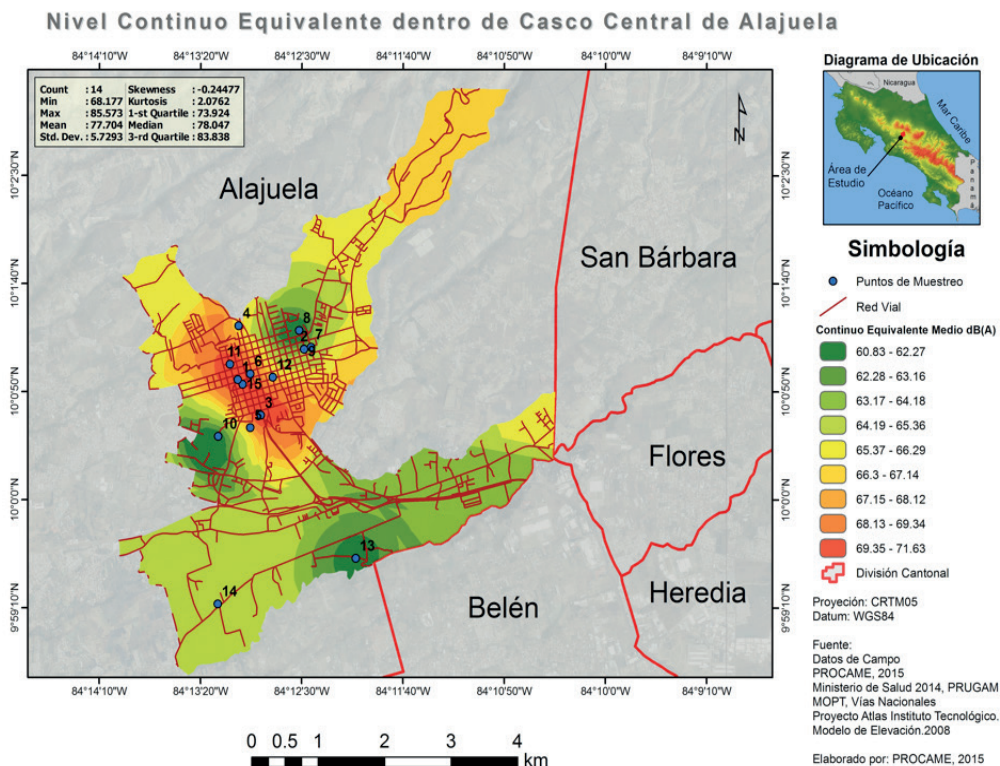


c. Niveles de ruido en Alajuela

Para efectos de los resultados de los niveles de ruido en el casco urbano del cantón de Alajuela, se hace un análisis comparativo de los cinco meses en los que se tomaron los datos. Las áreas muestreadas se ubican en tres diferentes zonas: Zona urbano-residencial, zona comercial y zona industrial. De acuerdo con la información obtenida de este estudio, se determinó que 67.2 % de la zona residencial, correspondió a sitios que registran un nivel continuo equivalente de ruido menor o igual a 65 dB(A) y el restante 32.8 % son áreas que sobrepasan este valor. Además, se obtuvo dentro de los principales resultados, que la zona con los niveles de ruido más altos corresponde a la Comercial (ZC). En este sentido, en la figura 8, se puede observar en promedio cuales son los niveles de ruido de acuerdo

con los distintos sectores, donde los valores más altos se ubican en los sitios del centro del distrito de Alajuela y conforme se alejan de éste, los niveles de ruido tienden a disminuir, principalmente en el sector sur. Los sitios ubicados en los alrededores del Estadio Morera Soto (zona comercial) presentan valores de ruido menores a 65 dB(A), al igual que los sitios de las escuelas La California y Santiago Oeste-El Coco y el colegio El Carmen (zonas urbano-residenciales). Los sitios con niveles de ruido más altos presentan valores mayores a 65 dB(A), superando en promedio los 70 dB(A) y se ubican en las Zonas Comerciales, cuatro de estos sitios son: Bar Pipiolo, Bar 99, Terminal el Roble y TUASA.

Figura 8. Mapa acústico en los sitios de muestreo en horario para el casco urbano del cantón Alajuela, Costa Rica.



Discusión de resultados

Bruel y Kjaer (2002), citado por Kurakula (2007), hacen mención que el ser humano posee umbrales de intensidad de la presión del sonido, donde se obtiene un intervalo a partir de 0 dB(A) hasta 130 dB(A), en este último se encuentra el umbral máximo que produce dolor. A partir de 50 dB(A) los niveles de ruido producen problemas para poder comunicarse, y valores cercanos a 90 dB(A) se consideran como peligrosos para el oído, principalmente si la exposición es continua.

Con respecto a los resultados obtenidos de las tres áreas de estudio (Heredia, Belén y Alajuela), se pudieron identificar niveles de ruido con valores mayores a 50 dB(A), que como se citó en el párrafo anterior, ya repercute en la comunicación. Ahora, si se analizan los valores de niveles de ruido con respecto a los límites establecidos por el Reglamento para el control de contaminación y ruido en Costa Rica, muchas de las zonas de estudio se ubican sobre los límites permitidos, tanto en horario diurno como nocturno. Por ejemplo, en Heredia, el 90 % de los datos obtenidos superan los 65 dB(A), cuyo valor corresponde al límite permitido en las zonas residenciales y comerciales en el horario diurno. Por otro lado, en Belén, de los 20 sitios muestreados, en horario diurno se detectaron 6 que sobrepasan los límites permitidos por el Reglamento, mientras que en el horario nocturno hay 17 sitios que sobrepasan los límites, cuya diferencia se justifica con la presencia de un aumento de los niveles de ruido del horario diurno al nocturno en 13 de los sitios. Esto lleva a pensar que hay una falta de control por las instancias correspondientes en la noche del tema ruido para algunas áreas donde hay, principalmente, comercios e industrias.

Por último, en Alajuela, si se obtiene un promedio de los 5 meses analizados y con respecto a cada una de las categorías de uso, la zona residencial presenta en el horario diurno 3 sitios de 5 con niveles de ruido que sobrepasan los límites permitidos por el Reglamento, en la zona comercial 6 sitios de un total de 9 con la misma situación y en la zona industrial los dos sitios muestreados tienen niveles de ruido por debajo de los límites permitidos. Esto quiere decir que de 16 áreas muestreadas en Alajuela 9 puntos no cumplen con los parámetros establecidos en el reglamento.

Partiendo de la dinámica de la contaminación sónica en las áreas urbanas, como se pudo observar en el estudio de estos tres cantones, es

importante considerar su diseño o rediseño utilizando herramientas como los mapas acústicos, que permiten identificar los sitios de mayor o menor nivel de ruido en los distintos horarios.

Al tener áreas pobladas de alta densidad con accesos por carretera, afecta la calidad de vida en las zonas residenciales, resultando en algunos casos en la reducción del valor económico de las propiedades, lo que implica que se deben de buscar materiales especiales que ayuden a aislar el sonido excesivo. Así mismo, ese fenómeno afecta no solo la salud humana, sino que también otros aspectos como la productividad, efectos psicológicos, pues las personas pueden experimentar problemas de concentración, de comunicación o fatiga por la falta de sueño o de un ambiente adecuado para su desarrollo integral. (Kurakula 2007)

Kurakula (2007) considera varios factores que contribuyen a aumentar de los niveles de ruido en las zonas urbanas, uno es el aumento de la población, lo que contribuye a un alto volumen de tráfico combinado con un incremento de la intensidad de actividades comerciales, así como el establecimiento de oficinas gubernamentales y de ocio, lo que genera la creación de nueva infraestructura, que produce la creación de nuevos espacios para edificios y la reducción de áreas abiertas. Considerando los resultados obtenidos, se puede considerar que la naturaleza de la contaminación sónica dentro las carreteras y de las ciudades se genera por factores relacionados desde el sonido que genera los motores hasta la fricción generada entre el vehículo con superficie de rodaje y el aire. Mucha de la contaminación sónica depende del volumen de tránsito, velocidad de los automotores, proporción de vehículos pesados en la vía, así como los materiales con los cuales está construidas las calles.

Los mapas acústicos, en este sentido, representan una herramienta útil para la interpretación regional de los niveles de ruido, permitiendo una planificación urbana basada en la mejora de la calidad de vida al disminuir o minimizar la contaminación sónica mediante la implementación de medidas de confinamiento y de control vial, siendo el tránsito vehicular una de las principales fuentes del aumento del ruido.

Conclusiones

Se encontró que los cantones de Heredia, Belén y Alajuela, presentan niveles de presión sonora mayores a los permitidos en la legislación

tanto para horario diurno como nocturno, notándose un aumento en el incumplimiento en horario nocturno.

Debido al más del 60 % de los sitios muestreados sobrepasaron los límites establecidos por el Reglamento para el control de contaminación y ruido (decreto ejecutivo es el No. 39 200-S), se declara estas zonas con problemas de contaminación sónica.

En este caso, los datos fueron tomados de los tres cascos urbanos bajo estudio de los cantones de Heredia, Alajuela y Belén, cuentan con una cantidad significativa de población, de tránsito vehicular y de desarrollo comercial, por lo cual esto puede estar contribuyendo a que los niveles en estos sitios sean mayores a los permitidos.

Es importante que se utilicen herramientas como los mapas acústicos en la planificación urbana del país, ya que los niveles de ruido pueden ser relacionados con el crecimiento poblacional, desarrollo de actividades económicas y de flujo vehicular. Esto debe ser un factor considerar para la zonificación de los sitios de manera que interfieran lo menos posible con la calidad de vida de las personas.

Referencias

- Geotecnologías (2014). Distritos de Costa Rica [capa vectorial] del *Atlas Digital de Costa Rica 2014*.
- Caracausi, R. (2014). Application of geographic information systems (GIS) and noise mapping of noise in urban structures. *The 21 International Congress on Sound and Vibration. China*. 8pp.
- Gray, A. (2017). *These are the cities with the worst noise pollution*. Recuperado de: <https://www.weforum.org/agenda/2017/03/these-are-the-cities-with-the-worst-noise-pollution/>
- Presidencia de la República y Ministerio de Salud (2015). Decreto N 39200-S. 2015. Reglamento para el Control de Contaminación por Ruido. Diario Oficial La Gaceta 197. San José.
- Hong, J. y Jeon, J. (2014). Soundscape mapping in urban contexts using GIS techniques. Hanyang University, Korea. *Inter noise 2014*, Melbourne, Australia, 16 - 19 November. 5 pp.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN). (2014). Redcamino 2014 [capa vectorial]. Escala 1: 50000. Hojas Cartográficas escala 1: 50000. 2004. *Atlas Digital de Costa Rica 2014*.

- Norma ISO 1996-2 (2009). *Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental, Parte 2: Determinación de los niveles de ruido ambiental*. ES.
- Kovak, C., Copeland, T., Elder, N., Thomas, N. y Ule, H. (2009). Acoustic Impact of the Green Corridor Action Group's Urban Design Using Acoustic Mapping. *Canadian Acoustics* 37 (4): 3-11.
- Kurakula, V. (2007). *A GIS-based approach for 3D noise modelling using 3D city models*. ITC. The Netherlands.
- Lazar, J., Bruce, D., Giordiano, S., Levin, D., Little, C. y Slacum, W. (2007). Acoustic mapping and GIS aided oyster restoration. *Proceeding of Coastal Zone 07*. Portland, Oregon.
- MER. (2011). *Mapa Estratégico de Ruido de Madrid*. Madrid. España.
- Murillo, D., Ortega, I., Carrillo, J., Pardo, A., Rendón, J. (2012). Comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido en entornos urbanos. *Ing. USB med* 1 (3): 62—68.
- Rejano, M (2000). *Ruido Industrial y Urbano*. ES, Paraninfo Thomson Learning..
- Szczodrak, M., Kotus, J., Czyzewski, A., Kostek, B. (2013). The application of noise mapping tool deployed in grid infrastructure for creating noise maps of urban areas. *Computer Science* 14 (2) 231—242.
- Villatoro, M., Henríquez, C., Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, CA, Cice y P del Suelo. *Agronomía Costarricense* 32 (1) 95—105.
- Wang, B. y Kang, J. (2011). Effects of urban morphology on the traffic noise distribution through noise mapping: A comparative study between UK and China. *Applied Acoustics* 72, 556—568.
- Yepes, D., Gómez, M., Sánchez, L. y Jaramillo, A. (2009). Metodología de elaboración de mapas acústicos como herramienta de gestión del ruido urbano caso Medellín. *Dyna*. No 158, 29-40.
- Verdú, V. (2010). *Medición y evaluación de la incertidumbre de auditorías en el aislamiento acústico*. Universidad Politécnica de Valencia. España.



NORMAS DE PUBLICACIÓN

PUBLICATION GUIDELINES

1. ADMISIÓN

- Se admiten artículos originales e inéditos relacionados con temáticas y problemas geográficos de índole teórico-metodológica o estudios de caso.
- El autor debe remitir su artículo a la dirección electrónica de la Revista Geográfica de América Central revgeo@una.cr, o a la MSc. Lilliam Quirós Arias (lquiros@una.cr) o la Mag. Consuelo Alfaro Chavarría (calfaro@una.cr).
- Junto con el documento que será sometido a revisión, el autor debe enviar una carta manifestando expresamente que el documento es inédito y original, y que no está en proceso de revisión en otra revista.
- El documento original debe tener las páginas debidamente enumeradas.
- Durante el proceso de evaluación las editoras estarán en constante comunicación con los autores para las respectivas incorporaciones de mejora en el artículo. Una vez que el artículo ha sido aceptado e incorporadas las sugerencias de la evaluación cuando corresponda, una versión final será enviada a los autores para su respectiva aprobación; mismo que será el documento final a incorporar en el número respectivo.

2. NORMAS DE PRESENTACION DE ARTÍCULOS

Los documentos deben ser enviados en español, inglés o portugués, con un resumen no mayor de 10 líneas, en el idioma vernáculo y en inglés, con un máximo de 5 palabras claves en ambos idiomas. Un tamaño máximo de 25 páginas, incluyendo las figuras y la bibliografía.

El texto debe estar en formato Word, escrito con letra Times New Roman 12, a espacio y medio, con 2,5 cm en los márgenes superior e inferior, y 3 cm en los márgenes derecho e izquierdo, en hoja tamaño carta.

Las ilustraciones (mapas, gráficos, fotos, etc.), las tablas y los cuadros (estadísticos) deben ser enumerados según su orden de aparición en el texto (numeración arábica); con formatos para una impresión de buena resolución.

En el caso de los mapas, la impresión puede ser a color, en formato JPG o Tiff, wmf, bmp. Todas las ilustraciones deben ubicarse en el texto y adjuntarse en archivos separados.

Las referencias bibliográficas deben estar citadas en el texto, ordenarse alfabéticamente, y seguir el formato internacional de la American Psychology Association (APA).

El artículo debe contemplar los siguientes elementos: resumen, introducción, área de estudio, características generales, marco teórico-conceptual, marco metodológico, resultados, discusión de resultados y bibliografía.

3. ORDEN DE PRESENTACIÓN DEL TRABAJO

Título: Breve, claro y que corresponda con el contenido. En letras mayúsculas, centrado y en negrita. En el idioma vernáculo y en inglés.

Nombre y apellidos del autor o los autores: justificados hacia la derecha.

Grado académico, lugar, dirección de trabajo y dirección electrónica: en una nota al pie de página y con letra Times New Roman 10.

Resumen en el idioma vernáculo y en inglés: máximo 10 líneas, enunciando los aspectos principales del texto, objetivos de la investigación, metodología y principales hallazgos.

Palabras clave: En el idioma vernáculo y en inglés: máximo 5 palabras.

Texto: El texto inicia con la Introducción (Introducción), diferenciando la jerarquía de títulos y subtítulos utilizando tamaños de letra y uso de la negrita. Con letra Times New Roman a espacio y medio.

Referencias bibliográficas: deben estar citadas en el texto, ordenarse alfabéticamente, y seguir el formato internacional de la American Psychology Association (APA).

4. NOTAS Y CITAS

En lo posible deben reducirse a lo indispensable.

Las notas al pie de página deben tener un fin meramente aclaratorio o explicativo, o bien, aportar información sobre lecturas adicionales para el lector potencial del texto.

En el texto, las citas textuales llevarán entre paréntesis el apellido del autor, año y número de página.

Las citas textuales inferiores a 40 palabras deben ir incluidas en el texto entre comillas.

Las citas textuales superiores a 40 palabras deben ir en un bloque independiente, sin comillas y con sangría de 2,54 cm.

5. BIBLIOGRAFÍA

Dispuesta en orden alfabético, según el apellido del autor. Siguiendo los criterios de la APA.

Ejemplos

Libro:

Gómez, D. M. y Barredo, C. J. I. (2004). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid, España: RAMA.

Capítulo de un libro:

Santos, M. (2000). *Por una geografía de las redes*. La Naturaleza del Espacio. Barcelona, España: Editorial Ariel. (pp. 221-234)

Revista:

Murai, S. (1999). Libro de trabajo SIG. Volumen 1: Curso básico. En *Revista SELPER*, 15(1), 8-66.

Tesis:

Romero, M. (2004). Análisis de los cambios en la estructura del paisaje de l'alt Empordá, 1951-2001. Tesis doctoral. Escuela de Geografía, Universidad de Girona. España. (pp.320).

Página electrónica:

Mascaraque, S. A. (2003). Índices de causalidad y riesgo de incendios aplicados a espacios naturales protegidos de la comunidad de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de http://oa.upm.es/911/1/PFC_Riesgos_Incendios_Forestales.pdf.

Periódico:

Loaiza, N. V. (24 de enero, 2008). Incendios forestales provocados arrasaron 32.000 hectáreas. La Nación. San José, Costa Rica. (p.5)

6. CUADROS Y TABLAS

Las tablas y los cuadros deben estar enunciados explícitamente en el documento y ubicados dentro del texto, con números arábigos.

7. FIGURAS (gráficos, diagramas, fotografías, etc.)

Deben estar enunciadas explícitamente en el documento y ubicadas dentro del texto.

El tamaño de las figuras podrá ser de hasta 13 cm de ancho por 18 cm de largo, con el objeto de ajustarse al formato de la revista.

Todas deben llevar numeración, título, leyenda y fuente. Deben estar debidamente referidas en el texto.

8. MATERIAL CARTOGRÁFICO: (mapas y planos)

Todos deben llevar numeración, título y fuente. Deben estar debidamente referidos en el texto.

Referencia:

Apellidos, Nombre (autor/es, iniciales o nombre/es completo de los diferentes autores separados por;) o nombre de la entidad responsable. Año de publicación:, Título (en itálica) [Designación del tipo de material por ejemplo: plano]: subtítulo (opcional y en cursiva). Escala numérica. Edición. Lugar de publicación: año.

Ejemplo:

Instituto Geográfico Nacional, Ministerio de Obras Públicas y Transportes (Costa Rica). *Istarú*. [Hoja topográfica]. Escala 1:50,000. San José, Edición 2, 1981.

9. DISTRIBUCIÓN

Una vez publicada la revista, los autores recibirán 1 ejemplar. Adicionalmente una vez que la Editorial de la Universidad Nacional aprueba la publicación ésta será dispuesta en formato digital en la página de la revista, en la cual los autores y otros usuarios pueden acceder a esta publicación.

GUIDELINES FOR AUTHORS

1. ADMISSION

- Only Original and Unpublished Documents May be Submitted for Review
- Submitting a Document
- Articles should be submitted by email to the Central American Geographic Magazine at revgeo@una.cr. Articles may also be submitted to the magazine direction-editor, Ms. Lilliam Quiros Arias, MSc., at lquiros@una.cr or to editor Ms. Consuelo Alfaro Chavarría, Mag., at calfaro@una.cr.
- In addition to this document, the author must also submit a letter stating explicitly that the document is new and original, and is not under review by another journal.
- All original articles must be submitted in proper page order and have the pages numbered correctly.
- If, after review, the document is accepted for publication, the author must submit the final document in digital format, with corrections and pages duly numbered. Documents can be articles or notes/documents.

2. ARTICLES

Articles must be related to geographic issues or problems of a theoretical or methodological nature, or a case study.

3. NOTES AND DOCUMENTS

These can be official results of institutions, events, conclusive scientific or professional processes or dynamics or results from a step or process. They can mention plans of study at Universidad Nacional, conclusions of scientific meetings or workshops, summaries of high-impact projects, documents formulating official policy or geographical impact programs, among others. Such submissions should be three to ten pages.

4. RULES FOR SUBMITTING ARTICLES

The documents must be sent electronically by email in Spanish, English or Portuguese with a summary, or abstract, of no more than 10 lines, in the vernacular language or English, with a maximum of five key words in both English and Spanish/Portuguese. Maximum article size should be no more than 25 pages, including figures, graphics and bibliography.

The text must be in Word format, in Times New Roman 12 point type, half space with 2.5cm of margin top and bottom and 3.0cm of margin on the left and right sides.

Include the following elements: introduction, area of study, general characteristics, theoretical and conceptual framework, methodological framework, results, discussion of the results and bibliography.

The illustrations (maps, graphics, photos, etc.), tables and charts, should be numbered in the order that they appear in the text. Maps can be in color or black and white and in jpg, tiff, wmf or bmp format. No gif files, please. All illustrations should be properly placed in the text and submitted in separate files.

Bibliographic references should be cited in the text, ordered alphabetically and follow the international format of the American Psychology Association (APA).

5. ORDER OF PRESENTATION OF THE WORK

Title: Brief, clear and relative to the content, centered in bolded capital letters. Titles should be in both the vernacular and in English. Times New Roman 12pt.

Author: First and last names, right justified. Author's academic/profession credentials, work address and email address should appear as a footnote on page 1. Times New Roman 10pt.

Abstract: The abstract or summary should be submitted in the vernacular and in English. It should be a maximum of 10 lines and clearly summarize the principal aspects of the submission. Times New Roman 10pt

Keywords: Submit both in the vernacular and English. Maximum of five words. Times New Roman 10pt

Text: Begin with the introduction, differentiating the hierarchy of headings with font types and use of bold. Times New Roman 12pt double spaced.

Bibliography: Should be cited in the text and not in footnotes at the bottom of the page.

6. NOTES AND QUOTES

To the extent possible, limit the use of notes. Footnotes should be used solely for clarification or explanatory purposes or to guide the reader to sources of further information.

When quoting directly from another's work, follow the quote with a parenthesis citing the author's last name, year of work and page number.

Quotations of less than 40 words should be included in the text with quotation marks.

Quotations of more than 40 words should be treated as a separate block of text, without quotation marks, and an indentation of 2.54cm.

7. BIBLIOGRAPHY

The bibliography should be arranged in alphabetical order by the author's last name, following the criteria of the APA.

Examples:

Book

Gómez, D. M. y Barredo, C. J. I. (2004). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid, España: RAMA.

Chapter of Book

Santos, M. (2000). "Por una geografía de las redes". *La Naturaleza del Espacio*. Barcelona, España: Editorial Ariel. (pp. 221-234)

Magazine

Murai, S. (1999). Libro de trabajo SIG. Volumen 1: Curso básico. En: Revista SELPER, Vol. 15, N° 1. (pp. 8-66)

Newspaper

Loaiza, N. V. (24 de enero, 2008). Incendios forestales provocados arrasaron 32.000 hectáreas. La Nación. San José, Costa Rica. (p.5)

Thesis

Romero, M. (2004). Análisis de los cambios en la estructura del paisaje de l'alt Empordá, 1951-2001. Tesis doctoral. Escuela de Geografía, Universidad de Girona. España. (pp.325)

Website:

Mascaraque, S. A. (2003). Índices de causalidad y riesgo de incendios aplicados a espacios naturales protegidos de la comunidad de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado: http://oa.upm.es/911/1/PFC_Riesgos_Incendios_Forestales.pdf.

8. TABLES AND CHARTS

Tables and charts should be stated explicitly in the document and placed within the text using Arabic numerals.

9. FIGURES (Graphics, Diagrams, Photographs, Etc.)

Figures must be explicitly stated in the document and located within the text.

Figures may be up to 13cm wide and 18cm long, in order to conform to the format of the journal.

All figures must include number, title, legend and font and be properly referenced in the text.

10. CARTOGRAPHIC MATERIAL (Maps and Plans)

Maps and plans should be numbered, titled and sourced and be properly referenced in the text.

References:

Last name, first name (author/s, initial or name; if many authors, separate by ;) or name of the responsible entity. Year of Publication: Title (in italics) [Designation of the type of material, eg., map]: Subtitle (optional and in italics). Numerical scale. Edition. Place of Publication: year

Example:

Instituto Geográfico Nacional, Ministerio de Obras Públicas y Transportes (Costa Rica). Istarú. [Hoja topográfica]. Escala 1:50,000. San José, Edición 2, 1981.

DISTRIBUTION

Once the document is published, authors will receive two complimentary copies of the journal.

SISTEMA DE ARBITRAJE

Los documentos serán sometidos al proceso de juicio de los evaluadores/as externos, mediante el sistema de revisión por pares (*peer review*); quienes emplean la “Guía de criterios para la evaluación de artículos” establecida por la revista, la cual incluye además de las normas formales, la calidad, la pertinencia y el grado del aporte científico de los artículos. Los evaluadores no conocerán el nombre del autor. Los nombres de los evaluadores tampoco serán revelados. Se guarda, de manera explícita, el anonimato y la confidencialidad de estas personas.

Los evaluadores cuentan con un plazo no mayor a 30 días naturales para evaluar y entregar el dictamen pertinente a la secretaría de la Revista.

En caso de que el evaluador no estuviera de acuerdo con la publicación del documento, este será sometido a revisión por parte de un segundo evaluador, cuyo dictamen servirá para tomar una decisión al respecto.

Si el evaluador del documento recomienda correcciones, el autor será el responsable de hacerlas y entregar el documento final en formato digital, en un plazo no mayor a 30 días naturales.

La última decisión para la publicación o rechazo de un documento corresponde al Consejo Editorial de la Revista Geográfica de América Central.

PEER REVIEW PROCESS

All document submissions are subject to the judgment of a team of external evaluators who employ a guide to critical evaluation of journal articles. Documents are judged against a set of standards for quality, relevance and degree of contribution to the field of study. Evaluators will not know the name of the author submitting the document, nor will the author know the names of the evaluators. Evaluators have 30 days to review the document and determine its suitability for publication.

If a document is at first rejected for publication, a second review by different evaluators will be initiated. If the document is rejected again, the rejection is final. If, upon second review, the document is recommended for publication, the document will undergo a final review by a third set of evaluators.

If the evaluators recommend changes to the document, the author will be notified and will have up to 30 days to make the recommended revisions and resubmit the document.

The final decision for publication or rejection of a document rests with the Editorial Board of the Geographic Magazine of Central America.