

TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS



ISSN 1409 - 2034

Volumen 12

Diciembre 2013



TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS

ISSN 1409 - 2034

Volumen 12

Diciembre 2013

Editora:

Dra. Gladys Jiménez Valverde

Director de publicación:

MSc. Roberto Villalobos Flores

Comité editorial:

Lic. Werner Stolz España, Lic. José Alberto Retana Barrantes, Lic. Luis Fernando Alvarado Gamboa

Diseño y diagramación:

Paula Solano Mora

La revista "Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos" es publicada por el Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio de Ambiente y Energía, Costa Rica. Tiene como finalidad dar a conocer los resultados de investigaciones y estudios en Ciencias de la Atmósfera y Oceanografía Física.



Versión electrónica en:
<http://www.imn.ac.cr/publicaciones>
<http://cglobal.imn.ac.cr/documentos>

INDICE

Un sistema de alerta temprana de sequías basado en el fenómeno El Niño: en ruta hacia la adaptación del sector agropecuario ante el cambio climático **5**

José Alberto Retana. Ingeniero Agrónomo. Investigador del Departamento de Climatología e Investigación Aplicada. Instituto Meteorológico Nacional.

El Índice Estandarizado de Precipitación y sus aplicaciones en Costa Rica **18**

Juan Diego Naranjo. Meteorólogo. Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica. Instituto Meteorológico Nacional.

Werner Stolz. Meteorólogo. Jefe Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica. Instituto Meteorológico Nacional.

Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en el transporte terrestre en Costa Rica durante el período 1995- 2010 **28**

Ana Rita Chacón Araya. Ingeniera Química. Departamento de Climatología e Investigaciones Aplicadas. Instituto Meteorológico Nacional.

La quema en el cultivo de la caña de azúcar y su impacto en la emisión de gases con efecto invernadero en Costa Rica **35**

Johnny Montenegro Ballester. Ingeniero Agrónomo, PhD. Funcionario del Instituto Nacional de Transferencia en Tecnología Agropecuaria. Instituto Meteorológico Nacional.

Marco Chaves Solera. Ingeniero Agrónomo, MSc. Gerente. Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar, LAICA.

Efecto indirecto de la tormenta tropical Sandy sobre la precipitación del 2012 en Costa Rica **52**

José Alberto Retana. Ingeniero Agrónomo. Investigador del Departamento de Climatología e Investigación Aplicada. Instituto Meteorológico Nacional.

Un sistema de alerta temprana de sequías basado en el fenómeno El Niño: en ruta hacia la adaptación del sector agropecuario ante el cambio climático

JOSÉ ALBERTO RETANA¹

Resumen

Las estimaciones sobre cambio climático para Costa Rica presentan semejanzas con escenarios de variabilidad producto de eventos ENOS (El Niño Oscilación del Sur). Las zonas que históricamente han presentado la mayor frecuencia de sequías producto de la fase cálida del ENOS (El Niño), son coincidentes con las áreas donde se espera la mayor reducción de precipitación anual debido al clima futuro en Costa Rica. Por tal motivo, un Sistema de Alerta Temprana de sequías basado en pronósticos de El Niño, manejado bajo la plataforma de la gestión del riesgo para Guanacaste, parte de la Zona Norte, la Región Central y el Pacífico Central, adquiere un gran significado a la luz de la adaptación sectorial y regional ante el cambio de clima.

PALABRAS CLAVE: SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA, SEQUÍA, VARIABILIDAD CLIMÁTICA, ADAPTACIÓN, RIESGO, CAMBIO CLIMÁTICO, ENOS, EL NIÑO.

Abstract

The estimations of climate change in Costa Rica have similar climate characteristics with ENSO phases (El Niño South Oscillation). Historical droughts areas affected by the warm phase of ENSO, expect the greatest reduction in annual precipitation for the future climate in Costa Rica. Therefore, an Early Warning System of droughts based on forecasts of El Niño, acquires great significance for regional adaptation to climate change. This system should be conducted under risk management platform for Guanacaste, part of the Northern Region, Central Region and Central Pacific.

KEYWORDS: EARLY WARNING SYSTEM, DROUGHT, CLIMATE VARIABILITY, ADAPTATION, RISK, CLIMATE CHANGE, ENSO, EL NIÑO.

1. Introducción

Las alertas tempranas sobre la evolución de fenómenos atmosféricos, son uno de los insumos de mayor utilidad para la elaboración de planes de adaptación, prevención, atención de emergencias y rehabilitación de comunidades. Un Sistema de Alerta Temprana (SAT), se puede definir como una colección de información variada y sistematizada que, mediante monitoreo constante y análisis, permite advertir anticipadamente al usuario sobre situaciones amenazantes a la seguridad

(alimentaria, civil, vial, sistemática, ecológica, educativa, entre otros), con el fin de emprender acciones estratégicas que permitan reducir los daños y pérdidas, así como responder adecuadamente a las presiones derivadas de la variabilidad climática.

El SAT debe ser lo suficientemente efectivo como para prever a tiempo probables situaciones de crisis, y permitir a la vez elegir respuestas apropiadas (Buchanan, 2000).

1 Ingeniero Agrónomo. Investigador del Departamento de Climatología e Investigación Aplicada. Instituto Meteorológico Nacional. Correo electrónico: jretana@imn.ac.cr

De acuerdo con la OMM (1999 b), estos sistemas deben de contribuir con cuatro fases: prevención, preparación, respuesta y recuperación. Por tanto, el SAT no solo actúa durante un evento, sino en forma preventiva antes y en forma reconstructiva luego del impacto.

Tal y como lo citan Retana y Herrera (1995), en sus orígenes la mayor parte de los SAT se desarrollaron de manera privada como sistemas de monitoreo del tiempo, en beneficio de la agricultura. Por lo tanto, el fundamento del SAT es el pronóstico meteorológico a corto plazo aplicado al usuario final, el sector agropecuario. Así se informa y alerta a los agricultores sobre el desarrollo de fenómenos perjudiciales para sus cultivos. Un ejemplo claro de esto son los sistemas de alerta de heladas, como el desarrollado por Servicios Meteorológicos privados en Israel y Canadá, aplicado para cultivos como manzana, ciruela, aguacate y plátano.

Algunos sistemas de avisos más complejos, usan información agropecuaria y modelos computacionales de simulación que hacen del pronóstico o monitoreo, insumos para actividades muy particulares. De esta forma, se aplica el pronóstico meteorológico a una alerta temprana de situaciones emergentes tan variadas como la aparición de enfermedades, plagas, heladas, vientos fuertes, contaminación, aparición de plagas migratorias, olas de calor y ambientes de estrés en relación a la producción zootécnica y agrícola, entre otras. A estos sistemas corresponden también el desarrollo de "índices" como el MT (Wetness Index), que utiliza información meteorológica para prevenir el estado de prevalencia de *Fasciola hepática* en campos de pastoreo de ovejas de Gran Bretaña (Gibson, 1978), o el sistema de pronóstico climático de la Sigatoka (*Mycosphaerella musicola* Leach ex Mulder) en banano, que utiliza mediciones de evaporación y temperatura para explicar el desarrollo de la enfermedad (Jiménez, 1995).

Más recientemente, debido a la variabilidad del clima experimentado en las últimas décadas y los daños a nivel nacional asociados, los SAT han sido replanteados y contemplados como parte de sistemas de prevención y atención de emergencia públicos, no solo enfocados en el entorno agropecuario. Son considerados parte de los mecanismos de seguridad estatal. En Estados Unidos por ejemplo, los planes para combatir la sequía han llegado a ser ampliamente

aceptados como herramientas de planificación gubernamental a todos los niveles y aplicados para reducir los riesgos de eventos futuros (Wilhite y Svoboda, 2000).

El SAT para situaciones de sequía, se dirige principalmente al mantenimiento de la seguridad alimentaria por medio de la advertencia meteorológica sobre el desarrollo de fenómenos climáticos, pero su radio de acción se extiende aún más, ya que el impacto de sequías recurrentes que afectan el sector agropecuario, inevitablemente afecta también los requerimientos nutricionales y de agua potable para la población, la conservación ambiental y los procesos de desarrollo comunal. Desde este punto de vista, el SAT se convierte en una estrategia de reducción de impactos sociales, un mecanismo de erradicación de pobreza y a la vez, una herramienta de eficiencia presupuestaria, puesto que la inversión en la prevención tiende a hacer más eficiente el presupuesto de mitigación y atención de emergencias.

La atención de las sequías por medio de un SAT, van dirigidas al uso racional de recursos, potenciar efectos positivos y disminuir las pérdidas en todo sentido. De acuerdo con Flores, Salas, Astorga y Rivera (2010), comparando las pérdidas económicas ocasionadas por eventos hidrometeorológicos extremos entre 1999 y el 2008, se requieren 1,6 eventos lluviosos extremos para igualar las pérdidas ocasionadas por un solo evento seco extremo en Costa Rica. De acuerdo con los autores, un evento de sequía corresponde a una pérdida estimada en 54 millones de dólares en promedio.

Según Villalobos, Retana, Ramírez y Machado (2002), el impacto económico en el sector agropecuario producto de la sequía ocasionada por el fenómeno de El Niño 1997-1998, se estimó en 42 millones de dólares.

El combate a las sequías se convierte en un tema estratégico a nivel de Estado por múltiples razones. El impacto económico directo es alto, la duración del fenómeno es extensa, por lo tanto, sus efectos son sumamente erosivos en los medios de vida y la disponibilidad de recursos. La dispersión de los efectos indirectos se extiende a todo el ámbito social, debido a los diferentes eslabones de la cadena alimenticia. Además, si a estas características sumamos el componente de cambio climático, la necesidad de atender estratégicamente las sequías se potencia.

De acuerdo con las representaciones futuras del clima en Costa Rica, desarrolladas por Alvarado (2006), así como por Alvarado, Contreras y Jiménez (2011), existe una semejanza notoria con los escenarios de variabilidad climática producto de El Niño. La región Pacífico Norte, los cantones fronterizos de la Zona Norte, parte del Pacífico Central y la región Central son propensos a sequías históricas. De hecho, estas áreas forman parte del corredor seco de Costa Rica identificado por Retana et al. (2012). Por tanto, son zonas que históricamente han presentado las sequías de mayor magnitud y recurrencia en el país, de acuerdo con un período registral de aproximadamente 50 años. La mayor parte de estas sequías están relacionadas con la presencia del fenómeno El Niño (Retana y Villalobos, 2000; Retana et al., 2009). A pesar de que este evento de orígenes océano atmosférico, puede ser pronosticado con unos dos o tres meses de anticipación, el sector agropecuario aún no cuenta con un plan sistematizado para atender estratégicamente la sequía. Un SAT basado en el pronóstico de El Niño, vendría a llenar el vacío de sistematización de procesos para atender los efectos de la variabilidad climática y empezaría a organizar el sector con planes robustos de adaptación ante el cambio climático.

La adaptación a las sequías producto de fenómenos de variabilidad climática, es el inicio de la estrategia de adaptación a los efectos del cambio de clima para estas zonas del país inmersas en el corredor seco.

El objetivo de este estudio es proponer un SAT para sequías basado en el pronóstico de la fase cálida de ENOS, El Niño, con el fin de que sea el inicio de una sistematización de información y experiencias que permitan al sector agropecuario de las zonas inmersas dentro del corredor seco nacional, asumir la responsabilidad de enfrentar los procesos necesarios para adaptarse planificadamente a la variabilidad climática primero y paulatinamente, a un clima futuro más severo.

2. Metodología

El SAT que se propone es un diseño de acciones bajo dos marcos conceptuales: la gestión del riesgo y la adaptación ante el cambio climático.

Recientemente, las consideraciones sobre el abordaje metodológico para el análisis de la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático, han utilizado la plataforma técnica y conceptual de la Gestión del Riesgo (Retana, Villalobos, Campos y Chacón, 2005).

Una oportunidad de desarrollo que cada vez toma más fuerza en Latinoamérica, en torno al tema del cambio del clima, es la unificación de esfuerzos entre gestores de cambio local con las instituciones técnico-científicas. La mejor muestra es la intensión de articular regionalmente las agendas de la comunidad de Gestión de Riesgo y la comunidad de Cambio Climático (EIRD, 2009).

La meteorología, como una ciencia utilizable (no solo por el pronóstico del tiempo, sino por el monitoreo y análisis de fenómenos atmosféricos evolutivos), puede asociarse a los diferentes organismos especializados en Gestión del Riesgo. El problema de “escalas espaciales” entre cambio climático y el riesgo local, se atenúa cuando la ciencia advierte sobre el peligro de una amenaza extrema de características regionales (como El Niño) y quienes gestionan operativamente el riesgo, llegan a la comunidad con acciones concretas. El problema de “escalas temporales” entre el cambio del clima (decenas de años) y la prevención y atención de emergencias (días y meses), se soluciona cuando la articulación se basa en eventos de variabilidad climática que pueden servir de espejo a los escenarios futuros de clima. Uno de estos eventos es El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), ampliamente reconocido como el fenómeno de variabilidad climática más influyente en el trópico y que ha tenido una huella de impactos profundos en la sociedad y la economía de las naciones. Por sus efectos y recurrencia, el ENOS se convierte en un laboratorio para la adaptación en toda su extensión.

La metodología para el diseño del SAT utiliza el enfoque de riesgo representado por la formulación matemática citada por Villagrán (2006).

$$R = V \times A$$

donde: R: riesgo
V: vulnerabilidad
A: amenaza

2.1. Vulnerabilidad

De acuerdo con el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés, 2001), la vulnerabilidad es el grado al cual un sistema es susceptible ante una amenaza, o es incapaz de hacer frente a efectos adversos del cambio climático, incluyendo variabilidad climática y eventos meteorológicos extremos. Puede ser explicada a partir de dos componentes: sensibilidad y exposición.

- Sensibilidad del sistema ante la amenaza. Se refiere al grado de respuesta del sistema ante la presión de una sequía. Puede ser manejada a partir de indicadores relacionados con la ganancia o pérdida económica.

En el caso del sector agropecuario es necesario definir indicadores de producción que resulten sensibles al clima, específicamente a la sequía. Estos pueden ser el rendimiento, registros sobre plagas y enfermedades, área de cosecha, índices de fertilidad, riego, entre otros.

- Grado de exposición a la amenaza. Se refiere a la medida del tiempo y área que la actividad permanece expuesta ante la presión. En el caso del sector agrícola, el mejor indicador es el área. Se puede utilizar el área de siembra o el área de cosecha. Para ganadería extensiva, un indicador de exposición puede ser el área dedicada a pastos, número de cabezas, entre otros.

El poder comprender estos dos ejes y su función dentro del concepto general, es fundamental para el análisis operativo de la vulnerabilidad. De lo contrario, se convertiría en un ejercicio eminentemente teórico.

Partiendo de estos dos ejes, la vulnerabilidad debe ser explicada de acuerdo con su sensibilidad y grado de exposición a la amenaza. Estas dos características pueden ser identificadas con análisis de impactos sencillos, como por ejemplo un registro histórico de pérdidas económicas durante años Niño. La exposición se puede referir a la frecuencia de estos eventos y dónde han impactado más fuertemente. Definir grupos poblacionales vulnerables, medios de vida vulnerables y zonas vulnerables, ayuda mucho a

caracterizar la vulnerabilidad de los sistemas. La resiliencia en este caso, homologada a la capacidad adaptativa, puede ser analizada por aparte. Aquí se identifican los inventarios y los recursos, las capacidades instaladas para prevenir, mitigar o adaptar. Igualmente, deben ser localizables, definibles y cuantificables.

2.2. Amenaza

La amenaza según CRID (2003), es la probabilidad de que un fenómeno de origen natural o humano produzca un impacto en un determinado tiempo y espacio. La amenaza es una presión sobre un sistema y tiende a desestabilizarlo. Por tanto, la amenaza va a presionar con una magnitud, si esta magnitud excede los límites de la resistencia y si la vulnerabilidad es alta, el sistema se deforma. Si la resiliencia del sistema es alta, al cabo de un tiempo retornan las formas originales, o bien se puede transformar para reducir el impacto de una nueva amenaza.

Mucha de la historia evolutiva de las comunidades, se basa en los principios de amenaza y resiliencia. Las guerras, inundaciones, sequías o enfermedades han amenazado e impactado civilizaciones enteras, que ante la presión se han visto en la necesidad de adoptar formas distintas para sobrevivir, hacerse más fuertes o bien, desaparecer. En el caso del SAT propuesto, la amenaza se refiere solamente a la sequía producida por el fenómeno de El Niño.

2.3. Gestión del Riesgo

La OMM (1999) define el riesgo como “las pérdidas esperadas” (vidas, propiedades, económicas), debido a una amenaza particular dada en un espacio y tiempo determinado. Para Labell (2002), gestionar un riesgo es una serie compleja de procesos y acciones encaminadas a disminuir pérdidas ante los impactos de un evento.

A la luz de estas dos comunidades de pensamiento, la gestión de un riesgo climático se puede concebir como un proceso estratégico de acciones intencionadas que buscan en primer lugar disminuir las eventuales pérdidas ante el impacto de un evento extremo de clima, pero aprovechando a la vez las oportunidades que

permitan avanzar en el desarrollo de una actividad o una comunidad. Un aspecto importante de la conceptualización, es que para que exista el riesgo deben coincidir en tiempo y espacio la amenaza y la vulnerabilidad. En otras palabras, pueden existir áreas muy vulnerables pero si la amenaza no impacta esa zona el riesgo será bajo o nulo. Esto es muy importante para gestionar el riesgo, priorizando zonas con el fin de utilizar los recursos de la forma más eficiente posible.

El abordaje metodológico del SAT, implica la administración de la información como una de las formas de gestionar el riesgo por sequías. En la figura 1, se esquematiza la visión del riesgo aplicada a una amenaza climática que presiona un sistema.

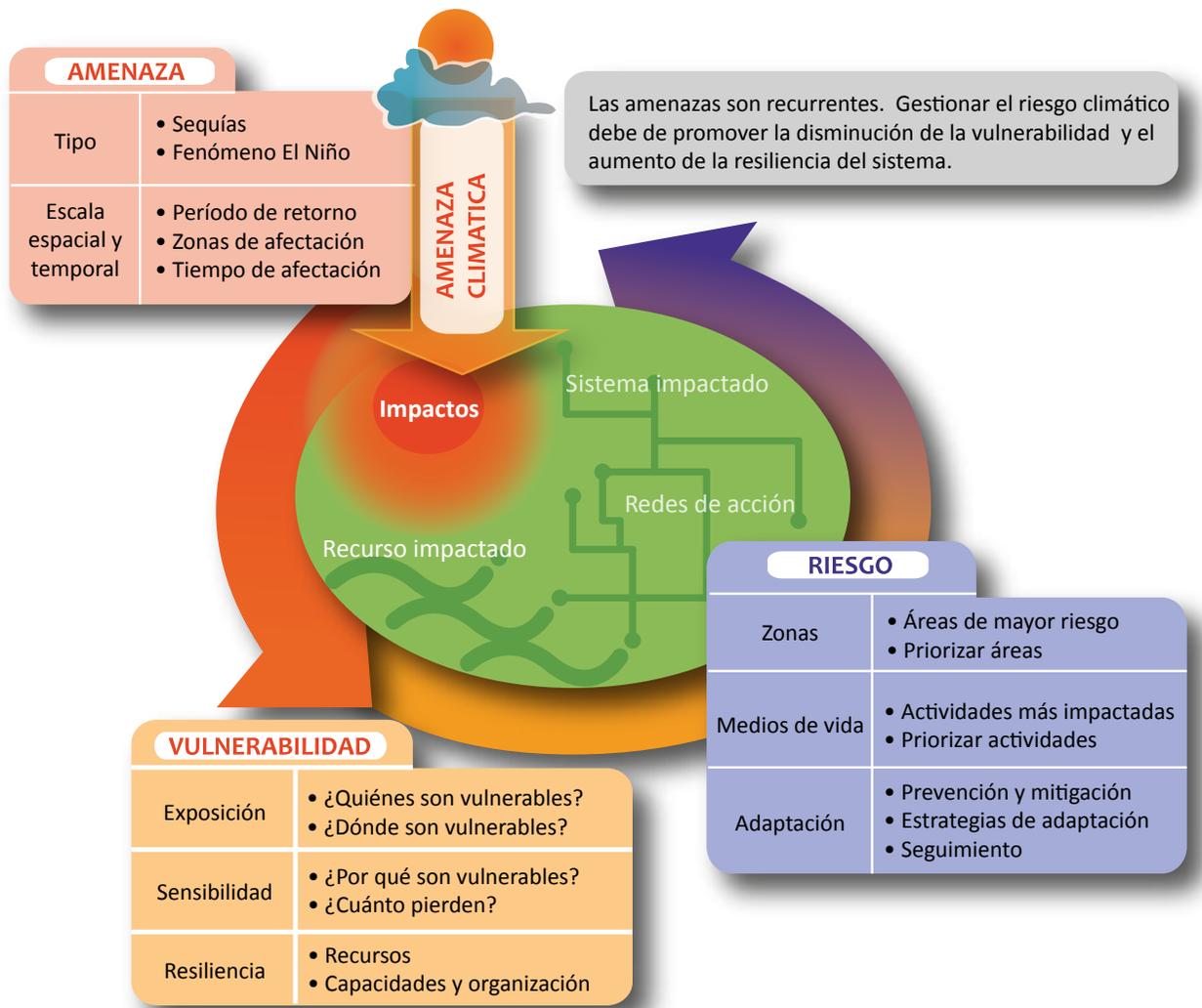


Figura 1. Gestión del riesgo ante una amenaza climática.

El SAT basado en el pronóstico de El Niño, es un proceso cíclico y evolutivo. Cíclico porque las etapas o niveles se activan en forma consecuyente y se repiten cada vez que se activa el sistema.

Evolutivo porque cada experiencia debe de alimentar el sistema para evaluarlo, mejorarlo, transformarlo o replantearlo. El SAT debe entenderse como un proceso estratégico, en el

sentido que debe de impulsar el desarrollo de actividades clave para la atención de emergencias y además, debe de servir para la planificación y el diseño de competencias (aprovechar mercados, disminuir áreas de siembra, diversificación).

3. Resultados y discusión

Para que el SAT sea funcional y pueda evolucionar debe poseer claridad de mensaje, composición o estructura flexible y mantenimiento continuo. Por otra parte, El Niño, reúne características ideales para ser usadas en SAT:

- a. Provoca cambios en el comportamiento climático del país.
- b. Estos cambios en el clima impactan diferentes sectores sociales y productivos.
- c. Son eventos de escala evolutiva de meses y años, lo cual permite la organización y participación comunal en planes de prevención.
- d. Son eventos pronosticables.
- e. Existe una amplia investigación científica sobre el fenómeno.
- f. Son cíclicos pero aperiódicos, por lo que van a volver a ocurrir.
- g. Permiten el manejo del concepto de adaptación ante el cambio climático, si se usan como eventuales escenarios del cambio futuro de clima.
- h. Permiten el manejo operativo y la articulación multisectorial.

3.1. Cuantificación de las variables

La amenaza y la vulnerabilidad deben ser cuantificadas para obtener valores de riesgo. De acuerdo con Retana y Villalobos (2000), El Niño tiene altas probabilidades (entre 80 y 70%) de producir sequías en el Pacífico Norte, Pacífico Central y Región Central de Costa Rica. Estos eventos provocan alteraciones significativas en el

ciclo hidrológico. Sin embargo, no necesariamente produce impactos sociales o económicos en el sistema. El impacto va a estar condicionado por la vulnerabilidad de los grupos o medios de vida y por la magnitud y duración de la amenaza. Por ejemplo, reducciones en la lluvia pueden no traer pérdidas en una determinada actividad agrícola porque temporalmente los meses secos no coincidieron con fases del cultivo sensibles a la falta de humedad. Por tanto, el análisis de la vulnerabilidad resulta imprescindible para poder gestionar el riesgo.

Para gestionar el riesgo técnicamente, es aconsejable monitorear y cuantificar algunos indicadores de vulnerabilidad agrícola, como: el rendimiento, la producción, la densidad de plagas y los recursos financieros perdidos, entre otros. Esto con el fin de que al mejorar la gestión de dichos indicadores mediante planes de prevención, atención y adaptación, se logre alcanzar una reducción de la vulnerabilidad, siguiendo una de las primeras máximas en el uso de indicadores de productividad “lo que se puede medir, se puede mejorar”.

3.2. SAT El Niño

Este consta de 6 fases que se desarrollan progresivamente de acuerdo con el grado de evolución de El Niño y su impacto sobre el sector agrícola, tal y como se presenta en la figura 2.



Figura 2. Esquema de funcionamiento del SAT.

El SAT se inicia con la vigilancia atmosférica y oceánica. Las siguientes fases de Aviso, Activación, Intervención, Recolección de Información, Evaluación y Diagnóstico son progresivas. De la fase “Aviso” a la fase “Intervención”, el cambio de fase obedece a juicio de experto que decide la pertinencia y conveniencia de pasar de nivel. Si no existe la necesidad de cambiar de fase, se retorna al punto de inicio. En las fases de Recolección de información, Evaluación y Diagnóstico, los resultados deben de ser limitados a un tiempo prudencial. Estas tres fases deben de sistematizarse mediante el uso de recursos tecnológicos apropiados y acordes con la realidad nacional. No se puede pensar en tener un centro de acopio y procesamiento de datos de primer orden, si en el campo los extensionistas hacen su trabajo solo con lápiz y papel.

Solo al momento de terminar el evento y estimar los impactos, se puede tener una evaluación final que debe concluir con un diagnóstico, el cual se incorpora nuevamente al sistema, en la etapa de Vigilancia. Como las sequías son fenómenos de evolución lenta, es recomendable tener “avances” periódicos con el fin de diagnosticar y ajustar acciones. Teóricamente, el diagnóstico final va a evidenciar la vulnerabilidad del sistema y los impactos de la amenaza. Este insumo debe mejorar las apreciaciones siguientes sobre el verdadero efecto de la sequía en la región de

análisis. El diagnóstico final va a ser material fundamental para la elaboración de nuevas estrategias de adaptación, con lo cual se podrá observar el grado de evolución del sistema e incluso el grado de evolución de la amenaza ante el cambio de clima.

Fase de vigilancia (1): Se refiere al monitoreo de los diferentes indicadores técnicos que definen la presencia o no de El Niño como la temperatura superficial del mar en las regiones Niño, el índice de Oscilación del Sur, indicadores de sequía y el monitoreo de parámetros meteorológicos asociados con sequías como son la lluvia, la temperatura y el viento. Esta fase es constante en el tiempo. Debe ser una labor rutinaria de los Servicios Meteorológicos que en el caso de Costa Rica está fijada por ley. Además del monitoreo, esta fase contempla el período positivo entre eventos, que es el momento en que se permite tomar medidas preventivas y planificar la estrategia antes de que se presente un nuevo fenómeno El Niño. Por tanto, para el Instituto Meteorológico esta etapa contempla todo un análisis de diagnóstico del evento, así como la caracterización y cuantificación de variables como: magnitud, frecuencia de aparición, zonas de impacto, identificación de corredores secos, sequías extremas, indicadores de sequía, probabilidad de lluvias, atlas y mapas.

Para el sector productivo durante el período positivo, se deben de elaborar los estudios de vulnerabilidad de cada actividad agropecuaria con el fin de identificar aquellas de mayor prioridad. Estos estudios deben de ser elaborados por cada sector involucrado, a la escala espacial y temporal que permitan los datos registrales. Los análisis de sensibilidad y exposición permiten definir las zonas, los grupos y los momentos del año de mayor vulnerabilidad. Paralelamente se deben de llevar inventarios de recursos, con el fin de conocer la resiliencia de estas zonas. Estos estudios se actualizan año con año por medio del uso de indicadores sistematizados, la unión del diagnóstico de la amenaza y el de vulnerabilidad se reúnen para crear escenarios hipotéticos de riesgo. A partir de las zonas de mayor riesgo, se debe de hacer la priorización para las acciones de prevención, adaptación y atención de sequías.

Tanto la información diagnosticada de la amenaza como de la vulnerabilidad, es clave y necesaria para la toma de decisiones. Es la diferencia entre una visión general y poco precisa, con la visión local indispensable para la toma de decisiones y no se puede avanzar sin esta información. Si los índices de El Niño, los modelos de pronóstico del fenómeno y el monitoreo de parámetros meteorológicos lo justifican, el Instituto Meteorológico debe de evaluar la pertinencia de pasar a una segunda fase.

Fase de Aviso (2): Una vez que se demuestre la evolución de la fase cálida, se debe pasar al nivel de aviso. La comunicación se da entre el organismo técnico-científico que monitorea y pronostica (Instituto Meteorológico Nacional), el organismo coordinador de atención de emergencias (Comisión Nacional de Emergencias) y la parte gerencial (Poder Ejecutivo, presidencia o ministerios involucrados). El objetivo de este nivel es que la eventual situación de emergencia se conozca primero en la esfera político-decisora, y se maneje como tema de seguridad del Estado, porque a fin de cuentas es un tema que involucra la seguridad civil y alimentaria. En esta fase no hay comunicación con otros sectores, ni con la prensa, para evitar la especulación.

El Instituto Meteorológico Nacional y La Comisión Nacional de Emergencia deberán rendir un informe técnico, claro y preciso sobre el pronóstico, el impacto esperado y las medidas generales de atención de la emergencia a la Presidencia de la República. De acuerdo a lo planificado, el Poder Ejecutivo deberá facilitar un primer trámite para el desembolso de fondos para atender una eventual declaratoria de emergencia. Este primer trámite de desembolso, permite agilizar el proceso de financiación, de esta manera, los fondos quedarían en una antesala de uso, a la espera de la evolución del fenómeno. Este paso debe de ser rápido y ágil, puesto que la fase cálida del fenómeno ENOS se está desarrollando y la información internacional empieza a dispersarse creando expectativas.

Fase de Activación (3): Luego de que se juzgue necesario cambiar de fase debido a que el evento evoluciona y el peligro es inminente, se debe de pasar a la fase de Activación. Por orden ministerial (Ministerio de Agricultura y Ganadería), se convoca a todos los actores clave de las zonas de mayor riesgo, para que se inicie un proceso de organización interna donde se asignen y definan las responsabilidades y funciones. Se da prioridad de activación a las zonas identificadas como de mayor riesgo climático, de acuerdo a la eventual exposición y sensibilidad ante la amenaza.

Es oportuno mencionar, que en esta fase se deben de tener listos los análisis de vulnerabilidad (exposición y sensibilidad) y de riesgo (amenaza y vulnerabilidad) de las diferentes actividades agropecuarias, los cuales debieron ser elaborados durante los períodos positivos en la fase 1. En esta fase se deben activar comités multisectoriales por unidad de área (cuenca), cuyo primer material de consulta es la información oficial del riesgo, además se debe de poner en funcionamiento un protocolo de operación.

Desde el momento en que se da la activación de los comités sectoriales, se debe de tener una organización y respuesta en el plazo de un mes, a la espera de pasar de fase. De esta forma, se podría considerar que durante la etapa de formación de El Niño, el país pueda presentar

una organización básica en las zonas de mayor prioridad. Evidentemente, el tiempo y uso del SAT deben de mejorar los períodos de respuesta.

Fase de Intervención (4): El tiempo que ha tomado la preparación para enfrentar la eventual emergencia, permite a su vez que la actualización del pronóstico sea cada vez más precisa. Con base en el monitoreo y el pronóstico se debe de juzgar la pertinencia de cambiar de paso en el SAT, o de abortar el sistema.

Si los impactos del fenómeno lo ameritan se debe declarar estado de emergencia por el Poder Ejecutivo, estos impactos van a depender mucho de la magnitud del déficit o exceso de lluvia y de la vulnerabilidad de los sectores. El conocimiento previo en la esfera de decisión política, permite la agilidad de estos trámites administrativos, así como el desembolso de dineros para la ejecución de planes de acción. Los comités sectoriales y grupos de trabajo inician todas las acciones previamente estudiadas y organizadas, que obedecen a la información base de riesgo. Todas las acciones ejecutadas forman parte de la resiliencia del sistema, por lo cual deben de ser documentadas, sistematizadas y cuantificadas. Si bien es cierto que la fase obedece a la intervención o atención de la emergencia, se deben de procurar espacios de organización para realizar ejercicios de planificación futura, al descubrir vacíos en actividades claves o prácticas de mala adaptación.

Fase de recolección de información (5): Es necesario crear un sistema de información técnica que permita el acopio y análisis de este tipo de información. Debe ser una comisión ministerial que integre a la Secretaría Ejecutiva de Planificación del Sector Agropecuario (SEPSA) y al Ministerio de Planificación (MIDEPLAN). Se debe de levantar y recoger toda la información que se considere importante para documentar la experiencia: información sobre el comportamiento de la sequía (cobertura espacial, intensidad, duración), información sobre impactos (pérdidas económicas, rendimientos, mercados) e información sobre la resiliencia del sistema (acciones, recursos, respuestas, organización). Esta información debe ser cuantitativa, diseñada por expertos y que

permita no solo evaluar pérdidas, sino identificar vacíos, debilidades y fortalezas. Para cada sector impactado por una sequía producto del efecto de El Niño, se debe manejar un único formato para el levantamiento de la información, a fin de que pueda ser comparada con otras regiones y que permita derivar conclusiones válidas.

Fase de evaluación (6): Una vez que se decreta oficialmente la finalización del evento y se pueda recoger la información acumulada, se inicia una etapa de evaluación que va a ser clave para desarrollar el diagnóstico final. Se espera que por cada actividad impactada, exista información cuantificable sobre las pérdidas y los recursos invertidos en atención y reconstrucción, así como la georeferencia de las zonas afectadas. La fase de evaluación debe dejar números y estimaciones.

Fase de diagnóstico (7): En esta fase se debe de integrar la información primaria generada en la anterior, en un sistema de información clave que debe abarcar al menos seis aspectos:

- El evento El Niño (extensión temporal y espacial de la sequía, magnitud y anomalía de lluvias, comparación entre el pronóstico y lo observado).
- Zonas afectadas (áreas de mayor impacto por extremos meteorológicos en cuanto a disminución de lluvias, aumento de temperatura y disminución de caudales).
- Sectores impactados (sectores sociales y productivos afectados por reducción o aumento de lluvia, pérdidas sufridas por sector).
- Medidas de mitigación y adaptación (planes y acciones desarrollados para tratar de disminuir el impacto del fenómeno. Se deberá estimar el costo de cada medida).
- Limitantes y fortalezas del SAT (una evaluación integral del funcionamiento, desde la fase 1 a la 6).
- Lecciones aprendidas.

El diagnóstico es el insumo que vuelve al sistema, recoge la experiencia, la evalúa y la pone en perspectiva de evolución. Esto es, lo que se debe corregir para mejorar. El diagnóstico debe ser validado por el grupo de actores que participaron en la fase de intervención.

El flujo de actividad del SAT se esquematiza de la siguiente manera:

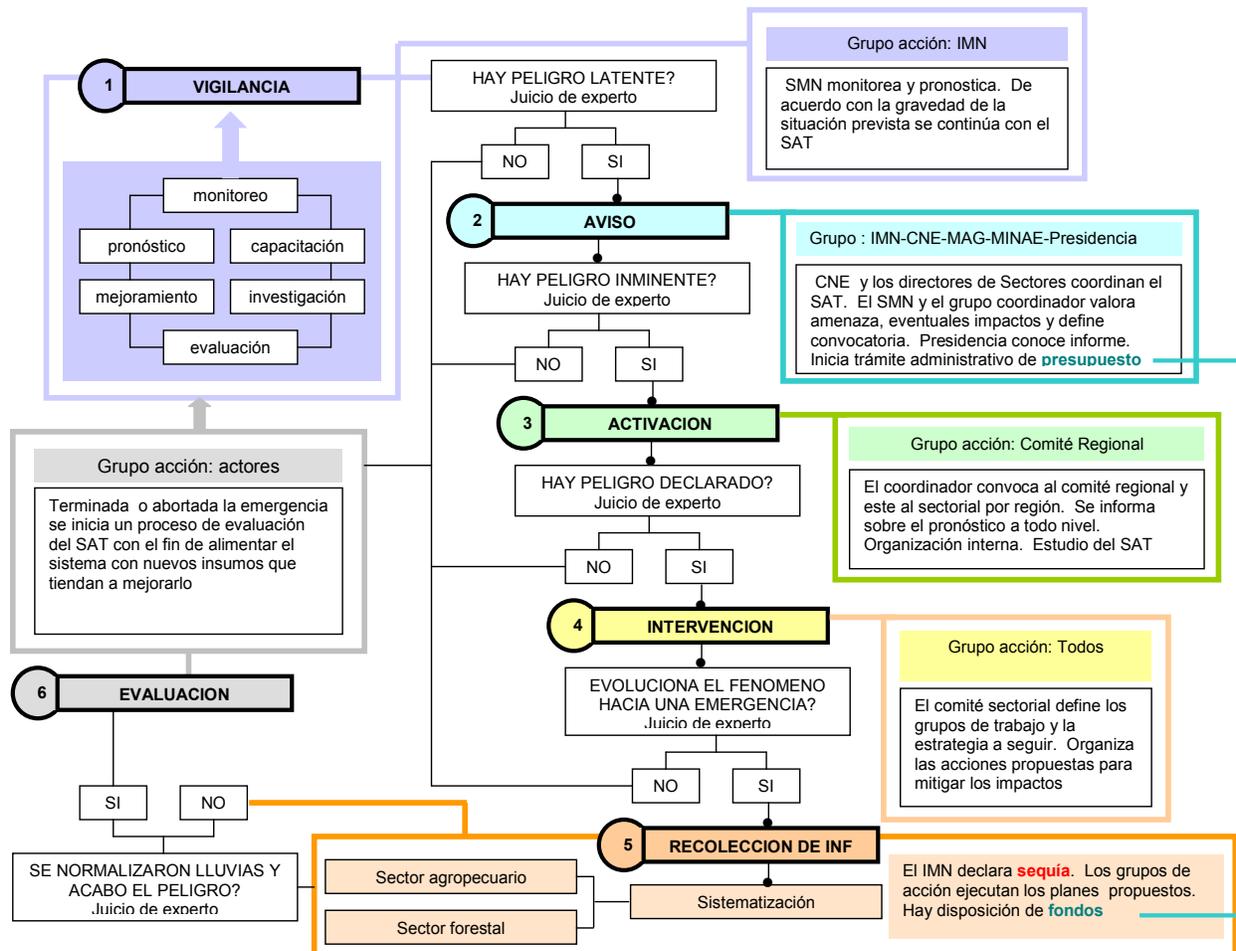


Figura 3. Flujo del SAT.

4. Conclusiones

Un Sistema de Alerta Temprana como el que se propone en este estudio, tiene como objetivo principal mejorar la organización ya existente en el país. De hecho, el sector agropecuario de Costa Rica es por mucho, el sector productivo que más rápido responde ante eventos secos extremos. Particularmente el Pacífico Norte presenta una experiencia acumulada de atención de emergencias, que debe de ser trasladada a

otras regiones del país que tienen una resistencia pasiva como la Zona Norte o la Región Central. Uno de los puntos principales de este SAT y que concuerda con la línea internacional de aplicación de medidas de adaptación, es la incorporación e intervención de funcionarios del más alto nivel gubernamental para catalizar el grado de respuesta ante situaciones de eventuales emergencias (Adeel y Glantz, 2001).

En este sentido, la intervención pública debe de ampliar su espectro de acción y compromiso buscando el mecanismo adecuado para reorientar la gestión de riesgo. Se necesita inversión para construir o aumentar la capacidad regional de almacenamiento de agua, alimentos y forrajes durante los tiempos de sequía. Además, es necesario que se creen los mecanismos o se intensifiquen los ya existentes en materia de transferencia interregional de alimentos. Esto tiene que ver con la mejora de las redes de transporte y el establecimiento de acuerdos comerciales adecuados. Por otro lado, se necesita compromiso político para asegurar el mantenimiento de las actividades agropecuarias más vulnerables al clima y que se encuentran en un período de depresión.

Es necesario que la investigación climatológica, agrometeorológica y la gestión del riesgo, se vean reforzadas con presupuesto y capacitación, ya que esta es una herramienta muy importante en el esquema de mejoramiento y evolución del SAT propuesto. La investigación debe de ser orientada bajo el punto de vista de ciencia utilizable, de forma tal que sea más atractiva a la corriente financiera internacional.

El SAT propuesto significa un ordenamiento de planes existentes y una lógica para la acción. Sin embargo, la puesta en marcha de tal sistema significa disminuir las limitantes de operación, derivar otros sistemas de funcionamiento institucional y comprometer a los sectores involucrados con la filosofía de operación-efectividad. Un SAT no puede ser un mecanismo que se vuelva obsoleto con el tiempo, debe ser un sistema evolutivo de amplio margen de acción y expuesto-dispuesto a la reconstrucción y mejoramiento por medio de metodologías de evaluación.

5. Referencias

- Adeel, Z.; Glantz, M. (2001). A retrospective study of the 1997-1998 El Niño: Identifying mayor challenges and opportunities. *Work in Progress*. United Nations University. 16(2):8-9.
- Alvarado, L. (2006). *Escenarios de Cambio Climático para Centroamérica y Costa Rica*. Proyecto Evaluación de impactos ocasionados por eventos extremos sobre el sector hídrico y medidas de adaptación bajo condiciones de cambio climático en América Central (AIACC-LA06). Sistema de la Integración Centroamericana (SICA), Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH), Universidad de Costa Rica (UCR), Centro de Investigaciones Geofísicas de la UCR. 35p.
- Alvarado, L.; Contreras, W.; Jiménez, S. (2011). *Escenarios de Cambio Climático regionalizados para Costa Rica*. Departamento de Climatología e Investigación Aplicada. Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Ministerio de Ambiente y Energía (MINAET). San José, Costa Rica. 43p.
- Buchanan, M. (2000). *Role of Early Warning Systems in decision makin processes*. In: Wilhite, D.; Sivakumar, M.; Wood, D. 2000. Early Warning Systems for drought preparedness and drought management. Portugal: World Meteorological Organization-Institute of Meteorology Lisbon-National Drought Mitigation Center, Secretariat of the United Nations Convention to Combat Desertification, United Nations Development Programme.

- Centro Regional de Información sobre Desastres. (2003). Consultado de: www.crid.or.cr/crid/ESP/CAPACIT/capcitabody.htm
- Estrategia Internacional de Reducción de Desastres. (2009). *Primera Sesión de la plataforma regional para la reducción del riesgo de desastres en las Américas*. (EIRD). Ciudad de Panamá, Panamá. 17-19 de marzo.
- Flores, R.; Salas, J.; Astorga, M.; Rivera, J. (2010). *Impacto económico de los eventos naturales y antrópicos extremos en Costa Rica*. 1988-2009. Costa Rica: MIDEPLAN.
- Gibson, T. (1978). The "MT" system for forecasting the prevalence of fascioliasis. In: WMO (World Meteorological Organization) 1978. *Weather and parasitic animal disease*. Technical Note 159. WMO-497. Geneva, Switzerland: OMM.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2001). *Impacts, adaptation and vulnerability*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Jiménez, F. (1995). El uso de la meteorología en el combate de enfermedades fitopatógenas. In: García, J., Fuentes, G., Monge, J. 1995. *Opciones al uso unilateral de plaguicidas sintéticos en Costa Rica: pasado, presente, futuro*. Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a Distancia.
- Lavell, A. (2002). *Conceptos y definiciones de relevancia en la gestión del riesgo*. Basado en Cardona, O. 2000. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. PNUD. Consultado de: www.snet.go.sv/documentos/conceptos
- Organización Meteorológica Mundial. (1999a). *Comprehensive risk assessment for natural hazards*. Switzerland: WMO/TD 955.
- Organización Meteorológica Mundial. (1999b). *Sistemas de alerta temprana para casos de sequía y desertificación: papel de los servicios meteorológicos e hidrológicos nacionales*. Suiza: OMM 906.
- Retana, J., Herrera, H. (1995). La agrometeorología en la protección agropecuaria. En: García, J., Fuentes, G., Monge, J. 1995. *Opciones al uso unilateral de plaguicidas sintéticos en Costa Rica: pasado, presente, futuro*. Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a Distancia.
- Retana, J.; Villalobos, R.; Campos, M.; Chacón, A. (2005). *Estimación del riesgo del sistema hídrico de la zona noroeste del Valle Central de Costa Rica ante los efectos de eventos meteorológicos extremos*. Costa Rica: PNUD-CATHALAC-IMN.
- Retana, J.; Alvarado, L.; Solano, J.; Solera, M.; Araya, C.; Sanabria, N.; Pacheco, R.; Castro, V.; Calderón, F. (2009). *Clima, Variabilidad y Cambio Climático en Costa Rica*. Costa Rica: IMN-CRRH-MINAET-PNUD.
- Retana, J.; Villalobos, R. (2000). Caracterización pluviométrica de la fase cálida de ENOS en Costa Rica con base en probabilidades de ocurrencia de eventos en tres escenarios: seco, normal y lluvioso. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 7(2):117-124.

- Retana, J.; Alvarado, L.; Araya, C.; Sanabria, N.; Solano, J.; Solera, M.; Alfaro, M. (2012). Caracterización del corredor seco en Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 11(1):18-28.
- Villagrán, J. (2006). *Vulnerability. A conceptual and methodological review*. Series of UNU-EHS. (4):64. United State of América: UNU-EHS. SOURCE.
- Villalobos, R.; Retana, J.; Ramírez, S.; Machado, P. (2002). *Mejoramiento de la capacidad técnica para mitigar los efectos de futuros eventos de la variabilidad climática en Costa Rica. El Niño*. Proyecto Mitigación de Desastres en Centroamérica. Gobierno de Japón- BID. Costa Rica: CRRH-CEPREDENAC-IMN-SEPSA-ICE.
- Wilhite, D.; Svoboda, M. (2000). Drought early warning systems in the context of drought preparedness and mitigation. In: Wilhite, D.; Sivakumar, M.; Wood, D. (2000). *Early Warning Systems for drought preparedness and drought management*. Portugal: OMM.

El Índice Estandarizado de Precipitación y sus aplicaciones en Costa Rica

JUAN DIEGO NARANJO¹
WERNER STOLZ²

Resumen

Se aplica el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) a series de datos, en diferentes periodos, registradas por las estaciones meteorológicas mecánicas de Limón –región Caribe- y Liberia –región noroeste de la vertiente del Pacífico- de Costa Rica. En ambos casos se muestra el comportamiento del periodo lluvioso correspondiente, de tal manera que se refleje la variabilidad a nivel mensual, trimestral, estacional, anual y decadal. Se considera que el SPI puede ser utilizado como una variable estadística en la definición de sequía meteorológica.

PALABRAS CLAVE: VARIABILIDAD CLIMÁTICA, SEQUÍA METEOROLÓGICA, ENOS, FRENTE FRÍO.

Abstract

Standardized Precipitation Index (SPI, for its acronym in English) was applied to a data series recorded by mechanical meteorological stations located at Limón –Caribbean region- and Liberia –Northwest Pacific region- of Costa Rica. In both cases, it shows the behavior of the rain, the variability is displayed at monthly, seasonal, annual and decadal time scales. SPI index is considered that can be regarded as a statistical variable in the definition of meteorological drought.

KEYWORDS: CLIMATE VARIABILITY, METEOROLOGICAL DROUGHT, ENSO, COLD FRONT.

1. Introducción

Varios estudios han demostrado que las oscilaciones atmosféricas y oceánicas de diversas escalas espaciales y temporales modulan la variabilidad climática de Centroamérica, particularmente en lo que al comportamiento pluviométrico se refiere.

El Fenómeno “El Niño” -de variación interanual- causa que la Zona de Convergencia Intertropical se ubique al sur de su posición normal (Rasmusson

& Carpenter, 1981) desfavoreciendo la actividad lluviosa sobre el país. Además, este fenómeno está relacionado, entre otras cosas, con la disminución de lluvias en Guanacaste, la cual, dependiendo de su severidad, puede llegar a ser tipificada como “sequía meteorológica” (Villalobos, Retana, Zúñiga y Ríos, 1997).

Alfaro y Amador (1997) analizaron la variabilidad climática de las series de largo plazo de diversas variables meteorológicas, en las escalas sinóptica y planetaria.

1 Meteorólogo. Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica. Instituto Meteorológico Nacional. Correo electrónico: jnaranjo@imn.ac.cr

2 Meteorólogo. Jefe Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica. Instituto Meteorológico Nacional. Correo electrónico: wstolz@imn.ac.cr

El periodo de Sequía de Mitad de Verano (Magaña, Amador y Medina, 1999), popularmente conocido como veranillo o canícula, está asociado entre otros factores atmosféricos y oceánicos, con el reforzamiento del viento sobre el Mar Caribe, lo que tendría implicaciones en la intensidad de los periodos caniculares en Costa Rica.

Mora y Amador (2000) demostraron que el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en sus diferentes fases, tiene implicaciones en la intensidad de la Corriente en Chorro de Bajo Nivel del Caribe (Amador, 1998), la cual, a su vez, es el mecanismo dinámico que podría generar las fuertes lluvias sobre el sector occidental del mar Caribe.

Zárate (2013), sugiere la posible relación entre la Oscilación Ártica y la cantidad de empujes y frentes fríos que llegan a Centroamérica, éstos de gran importancia dado que aportan un gran porcentaje de la cantidad de lluvia sobre la región caribeña en la estación de invierno del Hemisferio Norte.

Por lo anteriormente expuesto, la variabilidad del comportamiento de las lluvias a lo largo del año en el país depende de muchos factores atmosféricos y oceánicos, por lo que debería de disponerse de una herramienta que cuantifique y clasifique dicho comportamiento en función de diversas escalas de tiempo. Esto permitiría monitorear la actividad lluviosa, así como potenciar las investigaciones que permitan determinar más predictores de mediano y largo plazo de dicha variabilidad.

Para tal efecto se propone la implementación del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés). Este índice también podría contemplarse como una variable a tomar en cuenta en la definición de sequía meteorológica, si bien es cierto, este concepto contempla el comportamiento tanto espacial como temporal de las lluvias.

El Índice Estandarizado de Precipitación

El Índice Estandarizado de Precipitación fue desarrollado, inicialmente, por McKee, Doesken & Kleist (1993) y Edwards & McKee (1997), para cuantificar la intensidad de la sequía.

El cálculo del SPI requiere ajustar a la función Gamma (Thorn, 1966) la serie de datos de lluvia de la estación meteorológica en estudio. Posteriormente, se calcula la distribución de probabilidad acumulada para la precipitación observada. Ésta es transformada a una distribución normal estandarizada con promedio igual a cero y varianza igual a uno, la cual corresponde al SPI.

Para una escala de tiempo dada, los valores de SPI son positivos (negativos) para precipitaciones mayores (menores) al promedio. Los valores del índice son una medida del comportamiento de la actividad lluviosa (Guttman, 1999).

McKee et al. (1993) estableció las categorías del valor del SPI (ver cuadro 1) con el objetivo de calificar cuantitativamente el comportamiento de las lluvias.

Sin embargo, dado que el seguimiento del comportamiento de la estación lluviosa por medio de los valores del SPI no tiene como objetivo detectar únicamente los eventos moderados y extremos, se proponen los siguientes valores para caracterizar escenarios cercanos al rango promedio, de tal manera que se definan los siguientes intervalos o muy categorías: a) promedio: valor de SPI de ± 0.5 ; ligeramente lluvioso: 0.51 a 0.99 y c) ligeramente seco: -0.51 a -0.99.

Cuadro 2. Categorías del comportamiento del régimen de lluvias en función del valor del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) correspondiente, tanto el propuesto por McKee como el del IMN.

Valor del SPI	Categoría del comportamiento del régimen de lluvias propuesto por McKee et al. ,1993	Categorías propuestas del comportamiento del régimen de lluvias propuesto por el IMN
≥ 2.0	Extremadamente lluvioso	Extremadamente lluvioso
1.5 a 1.99	Muy lluvioso	Muy lluvioso
1.0 a 1.49	Moderadamente lluvioso	a 1.49 (Moderadamente lluvioso) 0.51 a 0.99 (Ligeramente lluvioso)
-0.99 a 0.99	Normal	-0.5 a 0.5 (Normal)
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco	-0.51 a -0.99 (Ligeramente seco) -1.0 a -1.49 (Moderadamente seco)
-1.5 a -1.99	Severamente seco	Severamente seco
≤ -2	Extremadamente seco	Extremadamente seco

2. Metodología

Se utilizaron los datos mensuales de lluvia de las estaciones meteorológicas mecánicas ubicadas en Limón (81003) y Liberia (74020), correspondientes al registro histórico del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) del periodo 1980-2012. Las fases mensuales del ENOS y su intensidad se definen por el Índice Oceánico de El Niño (ONI, por sus siglas en inglés) desarrollado por la Agencia de Administración de Océanos y Atmósfera de Estados Unidos (www.cpc.ncep.noaa.gov).

El software para calcular el SPI fue creado por Press, Flannery, Teukolsky, and Vetterling (1988) en el “Centro Nacional para la Mitigación de la Sequía” de la Universidad de Nebraska (EEUU). La documentación y el programa computacional fueron accesados en: <http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx>. El programa se aplicó a datos previamente dispuestos de manera mensual de tal manera que se encontraron las series del SPI para diferentes escalas temporales.

3. Resultados y análisis

Se aplicó el software SPI a los datos de las estaciones meteorológicas de Limón y Liberia del periodo 1980-2012 para analizar su variabilidad en diferentes lapsos de tiempo de tal forma que se obtuvieron los valores del índice para las escalas estacional, mensual, trimestral, anual y decadal. Los resultados permiten establecer una cuantificación de la intensidad de las anomalías de la lluvia y su comportamiento.

El rango promedio se definió por los valores de SPI comprendidos entre -0.5 y +0.5, que se corresponden con anomalías –en relación al promedio histórico- de precipitación que varían de 10% a -10% para Limón y -15% a 15% para Liberia.

3.1. Variabilidad de la lluvia anual en la estación meteorológica de Limón y cálculo del SPI

El comportamiento de la lluvia anual en Limón cambia por diversos factores, tanto oceánicos

como atmosféricos, entre otros: la intensidad de los vientos Alisios, la cantidad de empujes y frentes fríos que llegan a la región Caribe, el predominio o no de los vientos del oeste sobre el país, la intensidad de las ondas tropicales y diversas circulaciones atmosféricas modulan la cantidad de lluvia que se acumula a lo largo de un año.

En la figura 1 se puede observar que los años 1985 y 1995 -años del fenómeno La Niña- acumularon cantidades anuales de lluvia de 2558 mm y 2195 respectivamente, con valores negativos de SPI: -1,69 y -2,37, reflejo de los déficits anuales de 31% y 41%. Por el contrario, los años 1997, 2002 y 2009 -años del fenómeno El Niño- registraron

índices positivos de SPI de 1,76, 2,43 y 1,55 o a las cantidades de lluvia acumulada de 4870 mm, 5345 mm y 4697 mm y superávits de 35%, 48% y 30% correspondientemente.

Se muestran años secos consecutivos como en los periodos de 1983 a 1985 y 2006 a 2008; por el contrario, también se observan periodos más lluviosos de 2000 a 2002. Los años con valores más extremos fueron 2002 -año de El Niño- con un SPI de +2.5 y 1995 -año de fase neutral y fase de La Niña en la última parte del mismo- con un SPI de -2.5. También se han presentado conjuntos de años que reflejan una disminución consecutiva de las lluvias como en el periodo 2004 a 2008.

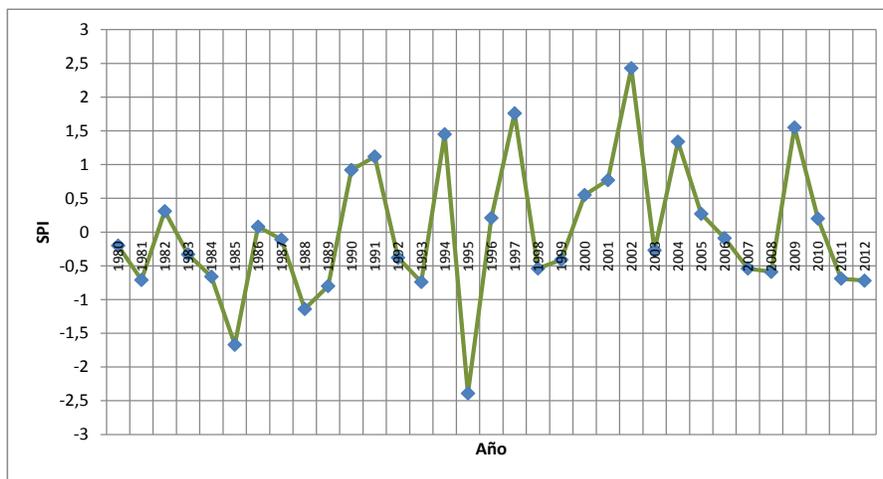


Figura 1. Valores anuales de SPI correspondientes a la estación meteorológica de Limón en el período de 1980-2012.

3.2. Variabilidad de la lluvia trimestral en la estación meteorológica de Limón

El trimestre diciembre-enero-febrero (ver figura 2) genera un gran porcentaje de la lluvia acumulada anualmente en Limón y está modulado, entre otras cosas, por los empujes y frentes fríos que arriban

a la región centroamericana y al país procedentes de las latitudes medias (Zárate, 2013).

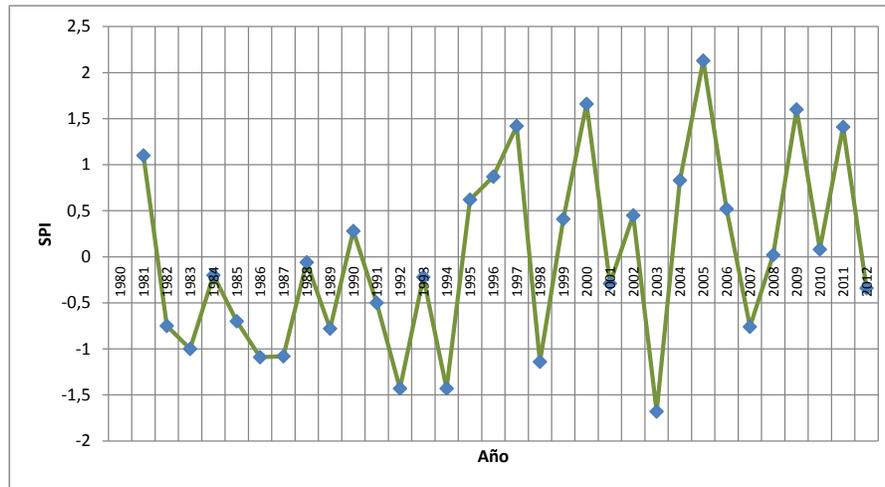


Figura 2. Valores trimestrales de SPI (diciembre-enero-febrero) de la estación meteorológica de Limón en el período 1980-2012.

El periodo 1982-1994 registró valores trimestrales por debajo de -0.5, es decir, fue un periodo normal-seco y, por ende, con una incidencia de empujes fríos menor de lo normal (Zárate, 2013); posteriormente, se observa una variabilidad de mayor rango, llegando algunos años a superar el valor SPI de 2 (extremadamente lluvioso) como el año 2005; por otro lado, el año 2003 con un SPI de -1.5, es decir, muy seco. Sin embargo, el periodo evidencia una clara tendencia a mostrar valores dentro lo normal o superiores, reflejo de la anomalía positiva de empujes fríos que arribaron a Centroamérica.

3.3. Variabilidad de la lluvia mensual en la estación meteorológica de Limón

La figura 3 muestra el comportamiento mensual de las lluvias en Limón del año 2012. El índice permite dilucidar que el trimestre de abril a junio fue deficitario y luego hubo una alta variabilidad, dado que se alternaron meses con superávit como julio y meses deficitarios como agosto. Del total del año 7 meses reportaron valores por debajo de lo normal (febrero, abril, mayo, junio, agosto, setiembre y diciembre), mientras que mayo, agosto y octubre se catalogan como moderadamente secos según el SPI.

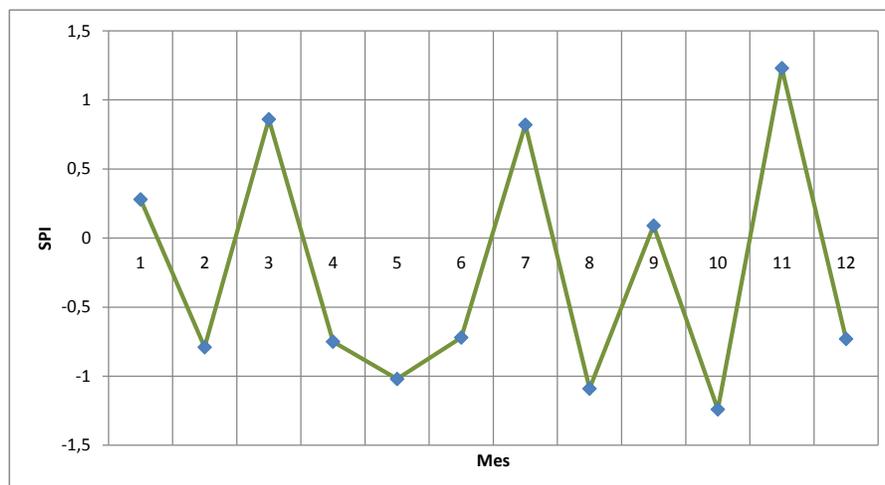


Figura 3. Valores mensuales de SPI de la estación meteorológica de Limón en el año 2012.

3.4. Variabilidad de la lluvia anual en Liberia

La variabilidad de las lluvias interanuales en Liberia (ver figura 4) está relacionada, entre otros factores, con el fenómeno ENOS. Generalmente, la fase cálida del mismo causa déficits de lluvia (Villalobos et al., 1997) y por el contrario, la fase fría, superávits.

El rango promedio se enmarca entre los valores de SPI que varían de -0.5 a 0.5. De la figura 4 se deduce que los años en que prevaleció el fenómeno La Niña registraron superávit: 1981, 1995, 1996, 1999, 2007, 2008 y 2010. Al contrario, los años en donde imperó el fenómeno El Niño, tales como 1987, 1990, 1991, 1997, 2006 y 2012, mostraron valores deficitarios con valores de SPI por debajo de -1. No solamente se concluye que

la señal del ENOS modula el comportamiento anual de las lluvias en dichos años, sino que tanto los superávits como los déficits están asociados con valores extremos (Retana, Alvarado, Araya, Sanabria, Solano, Solera y Alfaro, 2013).

Los años 1999, 2008 y 2010 con el fenómeno La Niña activo, acumularon una lluvia anual de 2752 mm, 2650 mm y 2568 mm respectivamente, con valores positivos de SPI de 1.9, 1.74 y 1.62, reflejo de los superávits anuales de 61%, 56% y 51%. Estos años se catalogan como muy lluviosos según los valores del SPI.

De la serie de tiempo analizada ningún año tuvo un SPI superior a -1.5, sin embargo, varios años muestran valores cercanos a éste, ya dentro del rango moderadamente seco: 1987, 1997 y 1990 con acumulados de 1072 mm, 1087 mm y 1093 mm respectivamente.

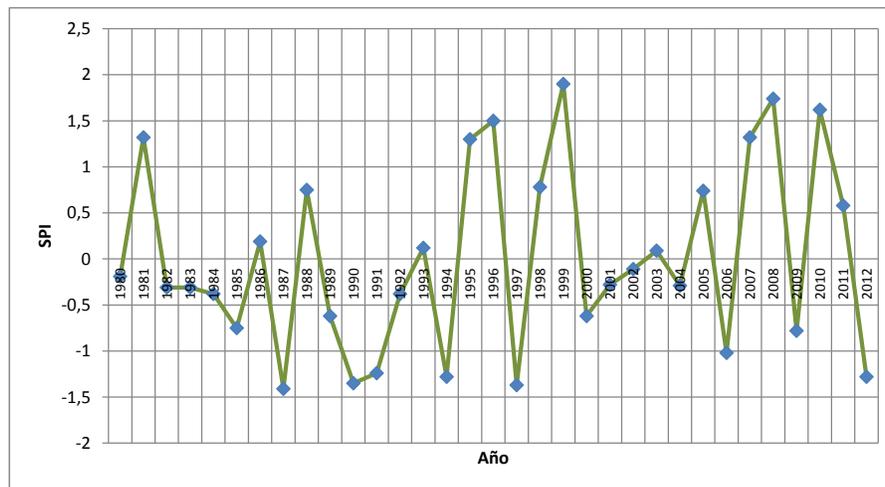


Figura 4. Valores anuales de SPI de la estación meteorológica de Liberia en el período 1980-2012.

3.5. Variabilidad de la época lluviosa en Liberia (mayo a octubre)

La época lluviosa en Liberia comprende los meses de mayo a octubre, siendo varios los factores atmosféricos que modifican su comportamiento, entre otros: el ENOS, la circulación general, brisas locales, interacción del flujo con la orografía, vientos Alisios más fuertes de lo normal, ondas tropicales, ciclones tropicales. La figura 5 muestra

la alta variabilidad en el periodo de la estación lluviosa en esta región del país.

Los años 1981, 1988, 1995, 1996, 1999 y 2008 se clasifican como moderadamente lluviosos. Los años 1990 (SPI= -1.52), 1994 (-1.53) y 1997 (-1.89) fueron severamente secos y tienen asociados las siguientes fases del ENOS: neutral cálida, Niño moderado y Niño fuerte. Ningún año desde 2005, estuvo dentro del rango normal con valores de SPI entre 0.5 y -0.5.

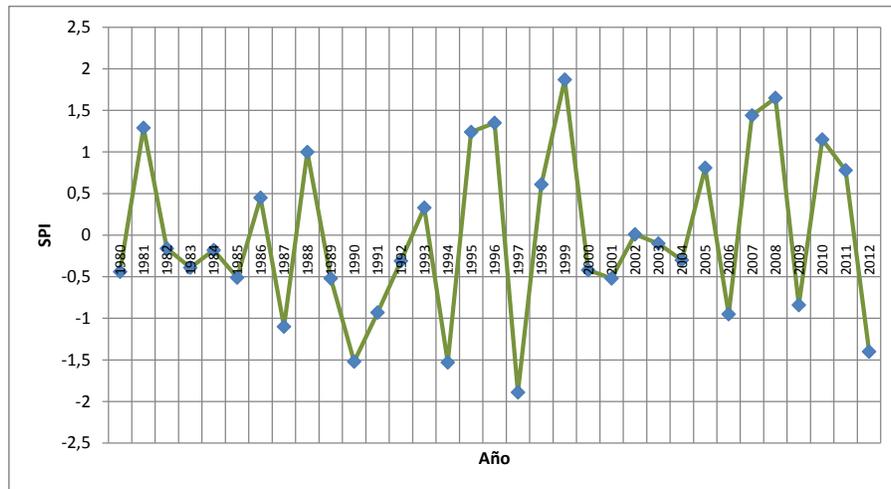


Figura 5. Valores semestrales (periodo de estación lluviosa) de SPI de la estación meteorológica Liberia en el período 1980 a 2012.

3.6. Variabilidad de las lluvias del año 2012 en Liberia

Liberia tiene una estación seca de diciembre a marzo, siendo abril y noviembre meses de transición de una estación a la otra y el resto del año, estación lluviosa.

En la figura 6 se puede observar que el año 2012 mostró valores, aunque dentro del rango normal,

deficitarios consecutivos desde mayo. El valor del SPI de julio refleja un fuerte periodo canicular (Chinchilla y Stolz, 2012). En este año estuvo activo el fenómeno El Niño a nivel local –no se clasificó como tal a nivel internacional, es decir, el calentamiento se limitó a las regiones NIÑO 1.2 y NIÑO 3- y sus efectos fueron muy perceptibles en el país, reflejo de la persistencia de los meses deficitarios de lluvia en Liberia.

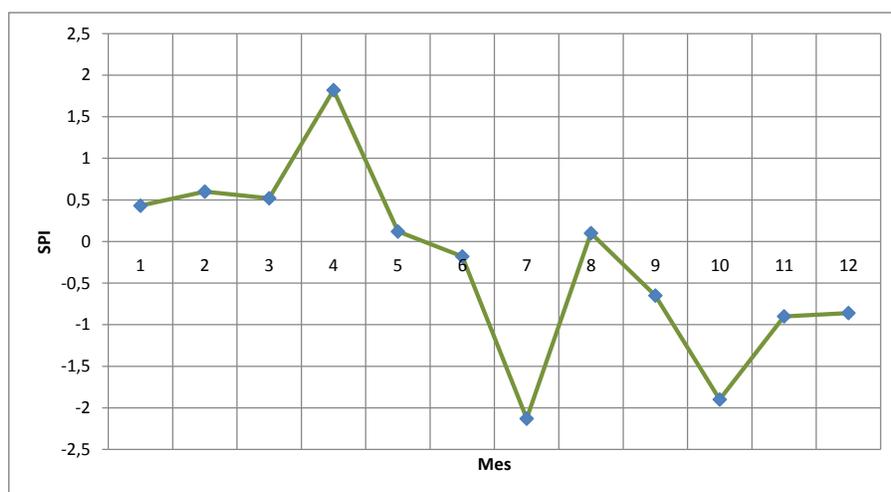


Figura 6. Valores mensuales de SPI de la estación meteorológica de Liberia del año 2012.

3.7. Análisis decadal de la serie de datos de lluvia de la estación meteorológica de Limón en el periodo de 1961 a 2012

Con el propósito de analizar el comportamiento decadal de la estación meteorológica mecánica de Limón, se tomó una serie de datos de mayor registro, desde 1961 hasta el 2012.

El análisis se realizó sumando todos los valores anuales del SPI de las décadas 1960, 1970, 1980, 1990, 2000 y 2010, para la estación en estudio. Los resultados muestran una alternancia interdecadal (ver figura 7) dado que las décadas 1960, 1980 y 2010 son negativas y las décadas restantes, 1970, 1990 y 2012 son positivas. La década más seca fue 1960 y la más lluviosa, 2000.

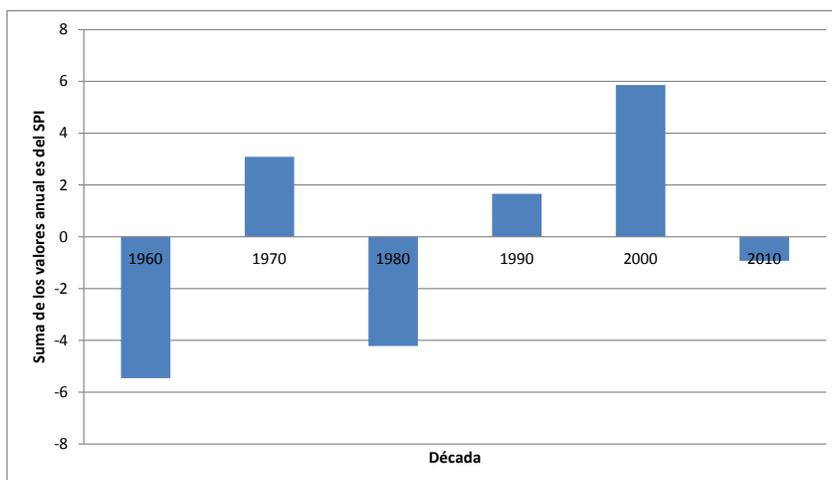


Figura 7. Suma de los valores anuales del SPI por década (1961-201), para la estación de Limón.

Se debe tomar en cuenta que si bien es cierto la década de 1970 fue lluviosa, esto no implica que todos los años que la conforman fueron lluviosos

(secos) (valores positivos (negativos) de SPI –ver figura 8-, por la misma variabilidad de la serie de datos.

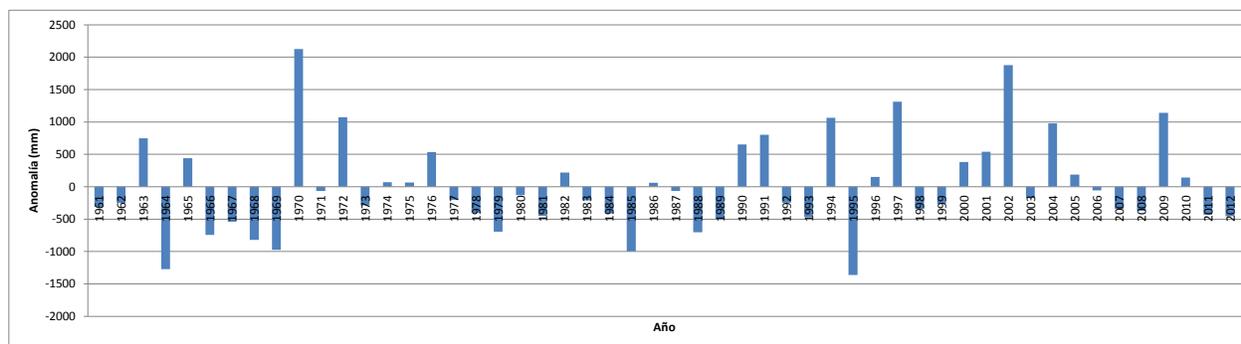


Figura 8. Valores anuales de la anomalía en la precipitación (1961-2012) de la estación meteorológica de Limón.

4. Conclusiones

El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) es una herramienta útil para darle seguimiento a la actividad lluviosa del país con el objetivo de determinar su intensidad y variabilidad. Dicho índice puede emplearse, además, para determinar relaciones entre éste y otros índices atmosféricos, con el fin de prever el comportamiento de la estación lluviosa. También, puede contribuir a la comprensión de la variabilidad climática de esta variable pluviométrica en función de varias escalas de tiempo desde lo mensual hasta lo decadal.

5. Recomendaciones

Se recomienda ampliar el estudio a todas las regiones de país y desarrollar un análisis del comportamiento lluvioso en el país en función del SPI.

Se debe implementar el SPI y su cálculo mensual para monitorizar la actividad lluviosa y así detectar los escenarios presentes, particularmente cuando se presentan meses secos extremos de manera consecutiva.

Se debe desarrollar un rango del SPI que contribuya a definir, entre otros múltiples factores, la sequía meteorológica en Costa Rica.

6. Referencias

- Alfaro, E. y Amador, J. (1997). Variabilidad y cambio climático en algunos parámetros sobre Costa Rica y su relación con fenómenos de escala sinóptica y planetaria. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 4(1): 51-62.
- Amador, J. A. (1998). A climate feature of the tropical Americas: The trade wind easterly jet. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 5(2): 91-102.
- Chinchilla, G. y Stolz, W. (2012). Resumen meteorológico de Julio. *Boletín Meteorológico Mensual*. Instituto Meteorológico Nacional.
- Edwards, D. C. and McKee, T. B. (1997). Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology Report 97-2*, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Golden Gate Weather Service (s.f.). *El Niño and La Niña Years and Intensities, Based on Oceanic Niño Index (ONI)-NOAA*. Recuperado de <http://ggweather.com/enso/oni.htm>
- Guttman, N. B. (1999). Accepting the standardized precipitation index a calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*. 35(2): 301-322.
- Magaña, V.; Amador, J. A y Medina, S. (1999). The Midsummer Drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 12, 1577-1588.
- McKee, T.B.; Doesken, N.J. and Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scale. In: *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*. American Meteorological Society, 179–184.
- Mora I. y Amador, J.A. (2000). EL ENOS, el IOS y la corriente en chorro de bajo nivel en el oeste del Caribe. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 7(1): 27-39.

- National Drought Monitoring Center (s.f.). *Program to Calculate Standardized Precipitation Index*. Recuperado de: <http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx>
- National Weather Service, Climate Prediction Center (s.f.). *Cold and Warm Episodes by Season*. Recuperado de: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml Press, W. H.; Flannery, B. P.; Teukolsky, S. A. and Vetterling, W. T. (1988). *Numerical Recipes in C. The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press. Cambridge, England. 735p.
- Rasmusson, E. and Carpenter T. (1981). Variations in Tropical Sea Surface Temperature and Surface Wind Fields Associated with the Southern Oscillation /El Niño. *Monthly Weather Review*, 110, 354-384.
- Retana J. y Villalobos R. (2002). *Procedimientos actuales para ofrecer advertencias y servicios agrometeorológicos a los agricultores y usuarios finales*. Informe Técnico. Gestión de Desarrollo. Instituto Meteorológico Nacional. 16p.
- Retana, J. (2009). *Gestión integral del riesgo climático por medio de un sistema de alerta temprana basado en ENOS*. PREVDA-IMN. Estudios de cooperación. San José, Costa Rica. 11p.
- Retana J.; Alvarado, L.; Araya, C.; Sanabria, N.; Solano, J.; Solera, M. y Alfaro, M. (2013). Caracterización del corredor seco en Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 11 (1), 18-29.
- Thorn, H. C. S. (1966). *Some Methods of Climatological Analysis*. WMO Technical Note Number 81. Secretariat of the World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland. 53 p.
- Villalobos, R.; Retana, J.; Zúñiga, B. y Ríos, A. (1997). *Pronóstico de la precipitación total anual para la Región Chorotega mediante un método de asociación de grupos de años*. Informe Técnico N° 5. Instituto Meteorológico Nacional. San José, Costa Rica. 9p.
- Villalobos, R.; Retana, J.; Ramírez, S. y Machado, P. (2002). *Mejoramiento de la capacidad técnica para mitigar los efectos de futuros eventos de la variabilidad climática en Costa Rica. El Niño*. Proyecto Mitigación de Desastres en Centroamérica. Gobierno de Japón- BID. CRRH-CEPREDENAC-IMN-SEPSA-ICE. San José, Costa Rica. 182p.
- Wang, C. (2002-a). Atmospheric Circulation Cells Associated with the El Niño-Southern Oscillation. *Journal of Climate*. 15, 399-419.
- World Meteorological Organization. (2012). *Standardized Precipitation Index-User Guide*. WMO-No. 1090.
- Zárate E. (2013). Climatología de masas invernales de aire frío que alcanzan Centroamérica y el Caribe y su relación con algunos índices Árticos. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 12(1), 35-55.

Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en el transporte terrestre en Costa Rica durante el período 1995- 2010

ANA RITA CHACÓN ARAYA¹

Resumen

El sector transporte es muy importante en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero en Costa Rica, de acuerdo a los resultados del Inventario Nacional de Emisiones por fuentes y absorción por sumideros de gases de efecto invernadero. La metodología utilizada para la evaluación de las emisiones en este sector es la propuesta por el Panel Intergubernamental de Expertos de Cambio Climático, siendo los resultados presentados en unidades de CO₂ equivalente. El crecimiento en las emisiones que se ha producido en estos 15 años evaluados, supera el 75%, siendo los principales emisores los vehículos particulares y los de carga por su cantidad y uso respectivamente.

PALABRAS CLAVE: GASES DE EFECTO INVERNADERO, INVENTARIOS, TRANSPORTE, CAMBIO CLIMÁTICO.

Abstract

Transportation is a very important sector in terms of greenhouse gas emissions in Costa Rica, according to the results of the National Inventory of Emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases. The methodology used for the emissions assessment in this sector is that proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change, and the results are showed in units of CO₂ equivalent. The growth in emissions has occurred in these 15 years evaluated exceeds 75%, the main emitters private vehicles and cargo for its quantity and use respectively.

KEYWORDS: GREENHOUSE GASES, INVENTORIES, TRANSPORT, CLIMATE CHANGE.

1. Introducción

En el año 1988 se creó el Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), cuyo principal objetivo es evaluar la información científica, técnica y socioeconómica, relevante para la comprensión del impacto del cambio climático inducido por las actividades humanas y proveer opciones de mitigación y adaptación.

El IPCC ha desarrollado la metodología para la evaluación de los inventarios de gases de efecto invernadero, con el fin de que sea usada por todos los países en la elaboración de sus inventarios

nacionales y de esta forma, los resultados puedan ser precisos, confiables, completos y comparables con los de otras naciones.

El Instituto Meteorológico Nacional (IMN), tiene a su cargo la elaboración del inventario nacional de emisiones por fuentes y absorción por sumideros de gases de efecto invernadero (GEI), y dentro de éste se encuentra la evaluación del sector transporte. Esta valoración se realiza siguiendo los lineamientos del IPCC, como parte del compromiso adquirido ante la Convención Marco de las Naciones Unidas de Cambio Climático.

1 Ingeniera Química. Departamento de Climatología e Investigaciones Aplicadas. Instituto Meteorológico Nacional. Correo electrónico: archacon@imn.ac.cr

2. Metodología

2.1. Alcance

El inventario de emisiones de gases con efecto invernadero en el sector transporte terrestre, abarca la flota vehicular del país, así como los diferentes combustibles utilizados.

Se incluyen en esta evaluación los tres combustibles más comunes: gasolina (regular y súper), diesel y LPG, además se evalúan las siguientes modalidades: particular (automóvil, jeep y microbús familiar) público (microbús público, autobús, taxis), carga (pesada, liviana y equipo especial) y motos (motocicletas, cuadraciclos y bicimotos).

La evaluación de las emisiones se presenta para el período comprendido entre el año 1995 y el año 2010.

2.2. Metodología

En la estimación de las emisiones del sector transporte terrestre, se utilizaron las Directrices

del IPCC del 2006 para Inventarios Nacionales de Gases con Efecto Invernadero y la Orientación del IPCC sobre las Buenas Prácticas, así como la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.

Los gases evaluados fueron: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O). No obstante, se presenta la evaluación en unidades de CO₂ equivalente, esto con el fin de hacerlo fácilmente comparable.

3. Resultados

3.1. Flota vehicular

Según las estimaciones de la Dirección Sectorial de Energía, la flota vehicular de Costa Rica alcanzó 1.369.274 vehículos, en el año 2010.

En el cuadro 1 se presenta el desglose de la flota costarricense por tipo de vehículo.

Cuadro 1. Parque vehicular de Costa Rica según modalidad en el año 2010.

Modalidad	Cantidad de vehículos
Particular	1.085.712
Carga	193.386
Público	177.160
Motos	193.192
Total	1.369.274

Fuente. Dirección Sectorial de Energía.

En el período estudiado, la flota vehicular creció considerablemente pasando de alrededor de 400.000 a 1.400.000 vehículos. En la figura 1 se puede observar el crecimiento por modalidad,

destacándose el mayor incremento en el número de vehículos particulares.

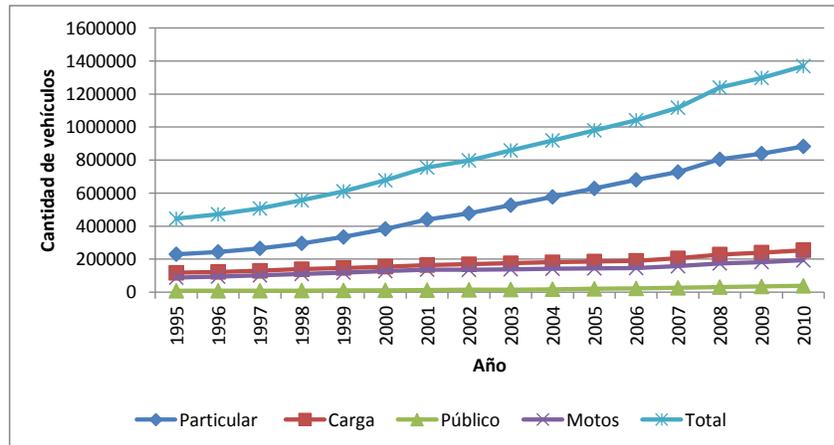


Figura 1. Suma de los valores anuales del SPI por década (1961-201), para la estación de Limón.

Fuente: Elaboración propia con datos de la Dirección Sectorial de Energía.

3.2. Emisiones de gases

En el cuadro 2 se presentan las emisiones totales

de gases expresadas en CO₂ e, producidas por la flota vehicular del país durante el período 1995 a 2010.

Cuadro 2. Emisiones de gases de efecto invernadero expresadas como CO₂ e de la flota vehicular en el período 1995 – 2010.

Año	Emisiones de CO ₂ e (miles de toneladas)
1995	2.675,6
1996	2.700,0
1997	2.768,5
1998	3.066,4
1999	3.188,5
2000	3.078,3
2001	3.272,4
2002	3.620,0
2003	3.768,4
2004	3.692,0
2005	3.884,5
2006	4.090,9
2007	4.397,9
2008	4.504,5
2009	4.562,3
2010	4.711,0

Las emisiones producidas por el consumo de combustible en la flota vehicular expresadas como CO₂ equivalente para el período en estudio, se presentan en la figura 2. Como se puede observar, los automóviles, los vehículos de carga pesada y liviana son los que presentan no sólo las mayores emisiones, sino el mayor crecimiento en

todo el período. Las emisiones producidas por los automóviles pasan de aproximadamente 800.000 toneladas en el año 1995 a más de 1.400.000 toneladas en el 2010, mientras que los vehículos de carga en conjunto pasan de 1.131.400 toneladas en 1995 a 1.995.200 toneladas en el 2010.

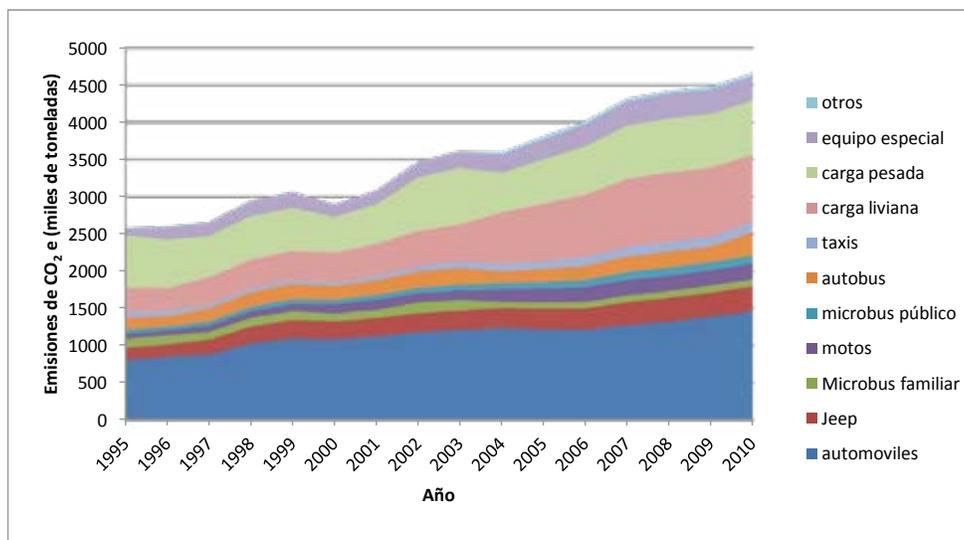


Figura 2. Evolución de las emisiones expresadas como CO₂ e por la flota vehicular de Costa Rica en el período 1995 – 2010.

En la figura 3, se presenta la distribución de emisiones de CO₂ e, por tipo de combustible, por año. Se puede observar el comportamiento de dichas emisiones según el combustible utilizado,

donde se destaca una participación similar para el diesel y la gasolina, presentándose una emisión pequeña por el uso de LPG a partir del año 2005.

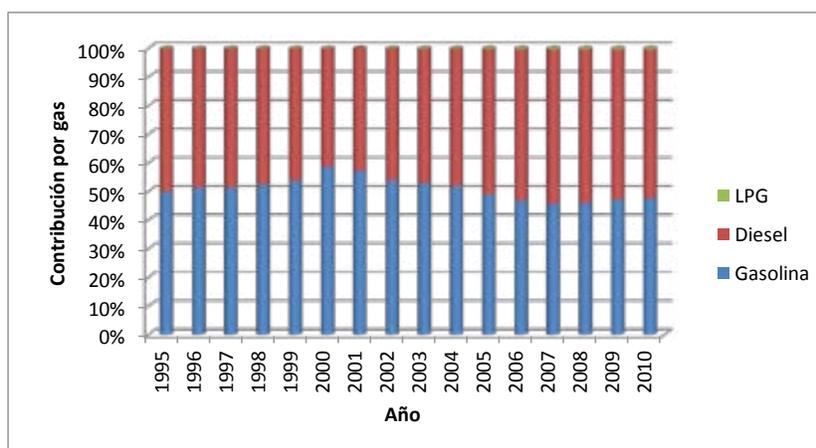


Figura 3. Distribución de las emisiones expresadas en CO₂ e por tipo de combustible en el transporte terrestre en el período 1995 – 2010.

Con respecto a la distribución de las emisiones de CO₂ e, para el año 2010, el transporte de carga representó un 42%, el uso particular un 41% y un

17% para el uso restante. El transporte público como puede apreciarse en la figura 4 representó un 11% de las emisiones en ese año.

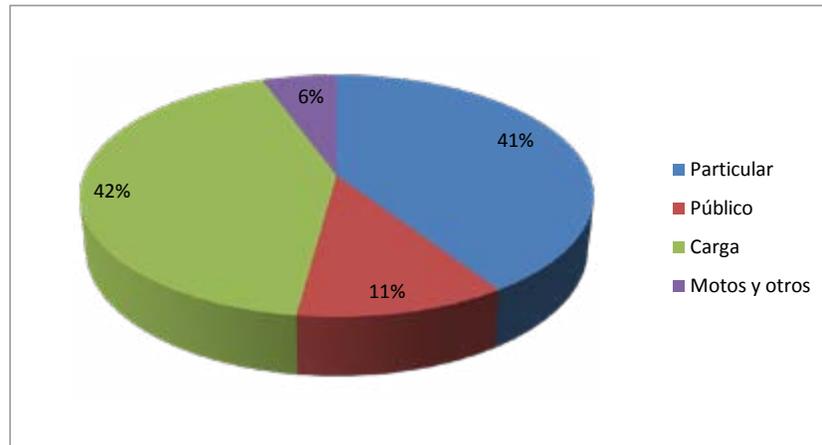


Figura 4. Distribución de las emisiones de CO₂ e por clasificación de la flota vehicular en el año 2010.

La distribución de las emisiones por tipo de vehículo se presenta en la figura 5, se puede observar que los automóviles aportaron el 31% de

las emisiones de CO₂ e en el año 2010, seguidos por los vehículos de carga liviana con un 20% y la carga pesada con un 16%.

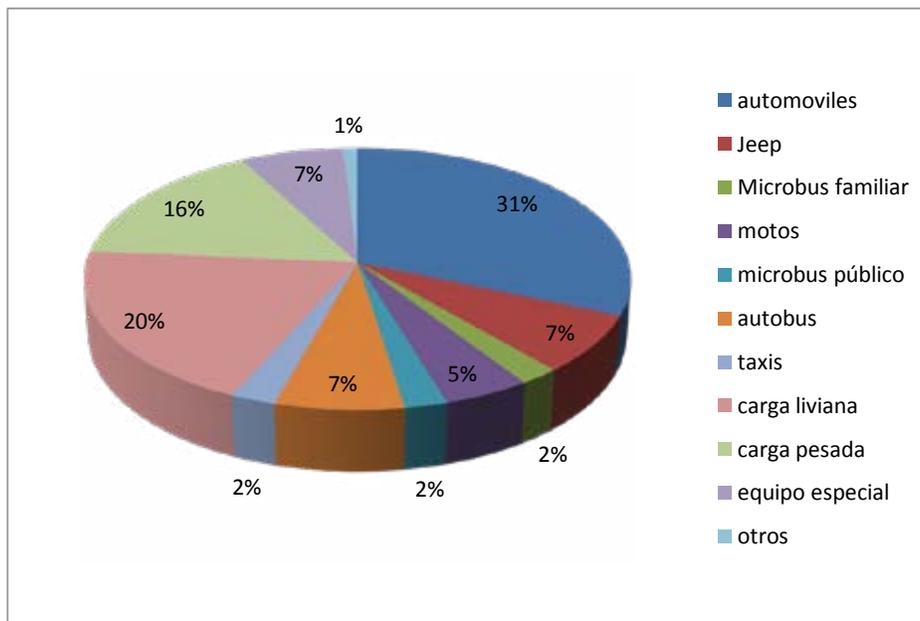


Figura 5. Distribución de las emisiones de CO₂ e por clasificación de la flota vehicular en el año 2010.

3. Conclusiones y recomendaciones

Las emisiones de CO₂ equivalente derivadas de la flota vehicular en Costa Rica, han presentado un crecimiento sostenido durante el período evaluado (1995 – 2010), pasando de 2.675.600 toneladas a 4.700.000 toneladas, lo que equivale a un aumento del 76% en dicho período.

Los automóviles particulares han presentado el mayor incremento en las emisiones debido al aumento en el número de vehículos en esta modalidad, seguidos por el transporte de carga tanto pesada como liviana, que han aumentado considerablemente sus emisiones, sin embargo, en este último caso el aumento de la cantidad de vehículos no ha sido tan drástico.

Es recomendable hacer una evaluación del transporte de carga liviana del país, por su relevancia en la distribución de las emisiones de CO₂ e, que alcanzó un 20% en el año 2010, esto con el fin de definir acciones de reducción de emisiones en esta modalidad.

Se recomienda además, realizar un estudio de factores de emisión nacionales para determinar cambios en los mismos con respecto a edad de la flota, calidad del combustible, tecnología del vehículo, entre otras variable. Lo anterior, con el propósito de afinar los resultados de las emisiones y poder recomendar acciones para la reducción de emisiones, focalizadas en los distintos tipos de vehículos.

4. Referencias

Alvarado, F., Fernández, D., Martínez, F., Picado, L. y Ruiz, G. (2009) *Memoria Estadística del Sector Energía 1989 – 2008*. Ministerio de Ambiente y Energía. Dirección Sectorial de Energía. San José, Costa Rica.

Ballestero, L. (2002). *Balance Energético Nacional, 2000*. Ministerio de Ambiente y Energía. Dirección Sectorial de Energía. San José, Costa Rica.

Ballestero, L. (2001). *Balance Energético Nacional, 1998 - 1999*. Ministerio de Ambiente y Energía. Dirección Sectorial de Energía. San José, Costa Rica.

Ballestero, L. (1998). *Balance Energético Nacional, 1996*. Ministerio de Ambiente y Energía. Dirección Sectorial de Energía. San José, Costa Rica.

Dirección Sectorial de Energía. (2011). *Diagnóstico Sector Energía de Costa Rica IV Plan Nacional de Energía 2012 - 2030*. San José, Costa Rica.

Dirección Sectorial de Energía. (2005). Encuesta de consumo energético nacional en el sector transporte *Revista: Energía*. Edición No. 47. M&RG S.A. San José, Costa Rica.

Dirección Sectorial de Energía. (2004). Balance Energético Nacional: Pieza fundamental de la Planificación. *Revista: Energía*. Edición No. 42. San José, Costa Rica.

Dirección Sectorial de Energía. (2003). El Balance Energético Nacional para el año 2001. *Revista: Energía*. Edición No. 39. San José, Costa Rica.

Panel Intergubernamental de Cambio Climático. (2003). *Orientación del IPCC sobre buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Ginebra, Suiza.

Panel Intergubernamental de Cambio Climático. (2006). *Directrices del IPCC del 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. IGES, Japón.

Molina, A. (2009). *Balance Energético Nacional, 2008*. Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones. Dirección Sectorial de Energía. San José, Costa Rica.

Molina, A. (2010). *Balance Energético Nacional, 2009*. Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones. Dirección Sectorial de Energía. San José, Costa Rica.

Molina, A. (2012). *Balance Energético Nacional, 2010*. Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones. Dirección Sectorial de Energía. San José, Costa Rica.

La quema en el cultivo de la caña de azúcar y su impacto en la emisión de gases con efecto invernadero en Costa Rica

JOHNNY MONTENEGRO BALLESTERO¹
MARCO CHAVES SOLERA²

Resumen

Con el objeto de estimar la cantidad de Gases con Efecto Invernadero (GEI) producidos por la quema de las plantaciones de caña de azúcar previo a la cosecha, se procedió a evaluar cinco escenarios teóricos: 0, 33, 50, 66 y 100 % de quema del área sembrada y cosechada del cultivo, correspondiente a 58.979 hectáreas, aplicables a zonas productoras de caña destinada a la fabricación de azúcar en Costa Rica. Se utilizó para el cálculo cuatro diferentes metodologías de estimación: 1) la sugerida por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), Tier I o nivel básico, 2) la desarrollada por Cabrera y Zuaznabar (2010) en cañaverales de Cuba, 3) se emplearon valores nacionales obtenidos en plantaciones de Costa Rica y, 4) una metodología utilizada por FAO/Gobierno de México. Los resultados revelaron diferencias importantes (39%) entre metodologías. La metodología III que utiliza indicadores nacionales fue la que generó los valores más altos y estimó mejor la emisión, siendo por ello la más recomendable al caso particular de la caña. Se determinó la emisión anual a la atmósfera de 12.061 t de CO₂ equivalente lo cual equivale a quemar el 50% del área cosechada en el país, para una emisión unitaria de 0,409 t de CO₂ e ha⁻¹ año⁻¹. Resulta necesario y estratégico desarrollar investigación en el sector azucarero nacional, orientada a generar y validar la información básica necesaria para ajustar, vincular y aplicar los cálculos y las estimaciones a nuestras condiciones productivas y ecológicas.

PALABRAS CLAVE: CAÑA DE AZÚCAR, QUEMA, EMISIÓN, GASES CON EFECTO INVERNADERO, ÓXIDO NITROSO, METANO.

Abstract

In order to estimate the amount of Greenhouse Gas (GHG) emissions produced by the burning of sugar cane plantations before harvest, were assessed five theoretical scenarios: 0, 33, 50, 66 and 100 % of burning of planted and harvested crop area, which correspond to 58,979 hectares, to manufacture sugar in Costa Rica. There was used four different methodologies to do the calculations: 1) suggested by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Tier I or basic level, 2) developed by Cabrera and Zuaznabar (2010) in sugarcane fields of Cuba, 3) Tier II with values obtained in sugar plantations in Costa Rica and, 4) a methodology used by FAO / Government of Mexico. The results revealed significant differences in the total amount of GHG released by the burning of sugar cane plantations before harvest depending on the methodology utilized. According to the results, the methodology that used national values was the one that better estimated the emission, and therefore is the one that can be recommended. This methodology determined that the annual emission to the atmosphere, coming from the 50% of the harvested area of sugar cane plantations, should totalize 12,061 t of CO₂ equivalent, for an emission equivalent to 0.409 t CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹. It is necessary and strategic to develop research designed to generate and validate the basic information necessary to adjust the required indexes to do calculations in a confident way and so, to get good emission estimation according to our productive and ecological conditions.

1 Ingeniero Agrónomo, PhD. Funcionario del Instituto Nacional de Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Costa Rica. Correo electrónico: jmontenegro@imn.ac.cr, jmontenegro@inta.go.cr.

2 Ingeniero Agrónomo, MSc. Gerente. Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA-LAICA), Costa Rica. Correo electrónico: mchavez@laica.co.cr.

KEYWORDS: SUGAR CANE PLANTATION, BURNING, GHG, EMISSION, NITROUS OXIDE, METHANE.

1. Introducción

El manejo agronómico de las plantaciones comerciales de caña de azúcar (*Saccharum spp*), mantiene como práctica habitual y utilizada a nivel mundial, la quema de la planta para realizar su cosecha. Existe también la modalidad de efectuar la quema posterior a la cosecha, a los residuos vegetales remanentes que quedan sobre el suelo luego de cortar y acarrear los tallos industrializables que serán procesados en el ingenio para extraer y fabricar el azúcar.

La quema es una práctica agrícola antigua y arraigada en algunas regiones productoras de caña del país, que se ejecuta principalmente en fincas dedicadas a la producción de materia prima destinada a la fabricación de azúcar. En Costa Rica no todas las plantaciones de caña se queman, ni tampoco esta es de igual calidad e intensidad aún dentro de una misma unidad productiva, pues varía según localidad, condición productiva y características de la plantación, lo cual incide y determina de manera significativa el impacto provocado y con ello la emisión potencial y efectiva de Gases con Efecto Invernadero (GEI).

Los cambios acontecidos en el país en términos de cobertura e intensidad, tanto del cultivo de la caña como de la práctica de quema son importantes si son valorados en el tiempo. De hecho, de acuerdo con un estudio realizado por Kempkes (1998), no solo se determinó que la práctica se realizaba en todo el país, sino que también dependiendo de la región productora, la misma se practicaba en un rango que iba desde 47% en el Valle Central, hasta alrededor del 99% en el Pacífico Central y Guanacaste; siendo la misma de muy baja ejecución en las zonas cañeras Norte y Sur.

Durante los últimos años han acontecido cambios importantes en torno a esta práctica inducidos por varias circunstancias, pues actualmente es en la Región Sur donde porcentualmente se queman más plantaciones de caña, pero es la región de Guanacaste la que más área (hectáreas) quemada

incorpora (Chaves, comunicación personal 2013), ya que representa el 55% (34.514 ha) del total sembrado en el país, estimado para el 2012 en 63.316 ha (Chaves, 2007bc; Bermúdez y Chaves, 2013).

Existen diversas razones y motivos del porqué se utiliza esta práctica, tan cuestionada ambientalmente, para justificar y entender su arraigo y permanencia, pese a las ingentes medidas adoptadas e impulsadas institucionalmente por los entes competentes como LAICA para procurar regularla, mitigarla y de ser posible erradicarla. De igual modo, existen diversos efectos (positivos y negativos) que se derivan de la quema, los cuales van desde los agronómicos, pasando por los económicos, sociales y de salud pública; hasta aquellos de una perspectiva legal-jurídica, ecológica y microbiológica del suelo. Más recientemente se ha integrado un importante frente adicional al tema, el cual se relaciona directamente con el cambio climático inducido por la generación de GEI durante la combustión del material orgánico que se quema previo o después de la cosecha. Como se infiere, el tema de la quema es amplio, multidisciplinario en sus alcances, razón por la cual se requiere para su correcta interpretación y análisis objetivo y realista, de enfoques holísticos y también de carácter específico.

La información disponible sobre estos tópicos en el país y vinculada directamente con la caña de azúcar, es amplia y diversa en sus valoraciones, lo que ratifica la importancia de la quema como práctica de manejo agrícola y sus efectos sobre el ambiente, como lo demuestran entre otras las publicaciones de Chaves Solera (2007bcd, 2009abcdef, 2010), Chaves y Bermúdez (1999, 2006abcd), Larios (2010) y Montenegro y Chaves (2009, 2011). Existe sin embargo, un importante y sentido vacío en lo concerniente a la medición de los posibles impactos de la quema sobre los diversos elementos del entorno productivo, sean estos atmosféricos, edáficos o sobre la biodiversidad, entre los cuales la emisión de gases a la atmósfera resulta fundamental. Es por este motivo necesario, prioritario y razonable generar información confiable de acuerdo con nuestras condiciones productivas, para evitar la utilización de datos generados en otras condiciones ajenas a nuestro país.

1.1. Componente vegetal y residuos agroindustriales del cultivo

La caña de azúcar es una planta excepcional debido a sus sobresalientes características y atributos

naturales del tipo C_4 , que complementado con su activo y prolongado ciclo vegetativo, posee la capacidad de generar gran cantidad de material vegetal potencialmente combustible (Montenegro y Chaves 2009, 2011). La planta se compone de varias fracciones: tallos limpios industrializables, tallos no industrializables (secos, podridos, deteriorados), mamones, hojas (verdes y secas), cogollo, raíces, cepa, a los que se incorpora material inorgánico como tierra y piedras cuando de entregas al ingenio se refiere. Obviamente el interés principal se concentra en los tallos comerciales limpios, pues de ahí se extrae la sacarosa y se obtiene el bagazo como residuo celulósico de alto valor calórico, el cual es empleado en las calderas para generar la energía requerida por el proceso industrial del azúcar (Chaves, 2001 y 2007a). La diferencia y ventaja entre cosechar una plantación quemada y otra sin quemar en términos de facilidad, esfuerzo, rendimiento ($t\ ha^{-1}$), costos relacionados es muy significativa, como se muestra la figura 1.



Figura 1. Plantación en modalidad quemada y cruda sin quemar.

La cantidad y calidad del material vegetal que se produce en las plantaciones comerciales de caña es muy variable y depende de diferentes factores bióticos y abióticos vinculados, entre los que se pueden citar: a) nivel tecnológico incorporado a la plantación, expresado como atención agronómica y que incluye la preparación del suelo, el uso de semilla mejorada de alta calidad y pureza genética, riego, nutrición balanceada, malezas, y manejo fitosanitario; b) rendimiento agrícola alcanzado, medido en toneladas de caña cosechadas por unidad de área y expresado como productividad de campo; c) variedad cultivada, pues su porte y área foliar son variables; d) ciclo vegetativo de la plantación, la cual puede variar desde once hasta veinticuatro meses; e) condiciones ambientales prevalecientes, que varían ampliamente entre las diferentes regiones productoras, así como también anualmente; f) condición edáfica y grado de fertilidad natural de los suelos y, g) entorno productivo en general.

El aporte de cada una de esas fracciones vegetales es, por lo anotado anteriormente, muy variable entre localidades y plantaciones aún de un mismo lugar, razón por la cual los valores son dinámicos y volátiles según la condición particular. Esto pone de manifiesto la necesidad de generar esta

información para evitar caer en extrapolaciones. En este sentido Chaves (2007a) determinó que la composición estructural y distribución porcentual de las diferentes fracciones de una planta de caña sin quemar y en edad adulta, sería: tallos limpios e industrializables 72%, vainas-hojas secas 20% y cogollo-hojas verdes 8%. Previamente, Subirós (1995) había indicado que la composición vegetativa de la caña de azúcar durante su fase de madurez era de 72% de tallos molederos, 12% de cogollos, 7% de mamones y el 9% restante estaría compuesto por hojas y otros materiales vegetales. Se nota que la composición biomásica es variable y producto de la gran cantidad de factores que intervienen en su definición, lo que es válido y entendible desde una perspectiva productiva.

En una evaluación de los componentes de materiales determinados durante la cosecha de la caña, Angulo y Chaves (1999b), reportan que para la región de Miramar de Puntarenas (340 msnm), la composición de las entregas de caña (Zafra 1998-1999) procedente de plantaciones quemadas, variaban en su fraccionamiento según la cosecha de la misma se realizara de forma manual o mecánica, como se anota en el cuadro 1.

Cuadro 1. Composición de las entregas de caña según modalidad de cosecha. Guanacaste, Costa Rica.

Componente	Aporte según modalidad, %		
	Mecanizada	Manual	Promedio
Caña Limpia	94,9	91,7	93,3
Hojas	2,4	2,1	2,2
Cogollo	1,7	1,9	1,8
Caña Seca	0,3	0,7	0,5
Raíces + Cepa	0,5	0,5	0,5
Tierra	0,2	3,1	1,7
Total	100	100	100

De los resultados anteriores se infiere que, pese a haberse quemado la plantación para su corta, alza y transporte, la combustión del material vegetal es parcial e incompleta, por lo que la presencia de otras fracciones residuales no azucaradas resulta casi ineludible de encontrar, afectando el rendimiento industrial e incrementando los costos relacionados. Se reconoce a nivel nacional e internacional, como de hecho acontece en el campo, que la quema de la planta de caña no necesariamente elimina toda la cobertura vegetal existente.

Ribera, citado por Chaves (2007a), determinó para la zona alta (1.165 msnm) de Juan Viñas, Costa Rica, en entregas comerciales de materia prima quemada y no quemada de las variedades hawaianas H60-8521 y H61-1721, una composición promedio de materia extraña o “trash”, como se detalla seguidamente: tallos molederos (92%), caña no moledera (3%), caña seca y podrida (1,5%), hojas (1,5%), cogollo y mamones (1%), raíces (0,6%) y tierra (0,1%). La caña no quemada (cruda) mostró como era de esperar, contenidos superiores de materia extraña en relación con la quemada, presentando un promedio de 12% y 7%, respectivamente. Se concluye que la quema contribuye de manera significativa a eliminar buena parte, no toda, la materia vegetal adherida a los tallos de la caña.

En otra valoración de campo efectuada en la zona seca de Cañas (86 msnm), Guanacaste, Angulo y Chaves (1999a) determinaron que en entregas comerciales de caña quemada originada a partir de plantaciones pertenecientes a productores independientes y también propia del Ingenio Taboga, hay fracciones difíciles de eliminar pese a quemarse, como acontece con las hojas y el cogollo, las cuales en promedio implicaron 8% del total complementado por tallos limpios (89%), caña seca (2%); raíces, cepa y tierra representaron 1%.

De acuerdo con Chaves (2001, 2007a), hay variación entre regiones productoras de caña en Costa Rica en cuanto a tallos industrializables, que es la fracción de mayor interés económico, pero esta no es tan significativa, pues su presencia en

las entregas comerciales varió entre 90% y 94%. Si se evidenció diferencia importante en algunas de las restantes fracciones evaluadas, lo que denota manejo diferencial de las plantaciones y en la eficiencia del proceso de cosecha, donde la quema de la planta fue importante pero no determinante en la eliminación total de residuos vegetales, como se aprecia en el cuadro 2. Lo anterior ratifica nuevamente la incapacidad de la quema para eliminar algunas fracciones vegetales y dejar los tallos industrializables totalmente limpios. Queda claro que la combustión de material vegetal no es completa.

Cuadro 2. Composición porcentual de las entregas comerciales de caña según región productora, Costa Rica.

Componente	Aporte según fracción, %						Promedio
	Región Productora e Ingenio						
	Guanacaste Taboga	Puntarenas El Palmar	Valle Central Argentina	San Carlos Cutris	Turrialba Juan Viñas	Zona Sur El General	
Tallos Industrializables	89,6	93,3	94,3	94,0	91,6	90,9	92,3
Tallos No Industrializables	1,8	0,5	2,5	3,4	4,8	--	2,6
Hojas + Cogollo	8,0	4,1	2,1	1,6	2,2	7,9	4,3
Raíces + Cepa	0,1	0,5	0,1	0,2	0,6	0,1	0,3
Mamones	--	--	0,9	0,4	0,6	--	0,6
Tierra + Otro	0,5	1,6	0,1	0,4	0,2	1,1	0,7
Total	100	100	100	100	100	100	100

1.2. Aporte de GEI por la caña de azúcar

Debido a la pobre mezcla existente entre el material combustible y el aire, y el atrapamiento de los gases de combustión por el aire circundante en el medio, es que durante la quema se emite a la atmósfera gran cantidad de productos de la combustión incompleta, tales como humo, partículas, hidrocarburos gaseosos y monóxido de carbono, entre otros.

Los compuestos orgánicos que contienen nitrógeno y que están presentes en el material combustible y parte del nitrógeno (gas), son convertidos a óxidos de nitrógeno (siendo el óxido nitroso (N_2O) uno de ellos) durante el proceso de la combustión. Otro gas de gran importancia por su elevado potencial de calentamiento, que también se genera durante la combustión de los residuos agrícolas, es el metano (CH_4).

Estos dos gases implican pérdidas netas de nutrimentos importantes para cualquier sistema de producción agrícola, razón por la cual se deben

estimar para conocer con certeza la magnitud de esas pérdidas, pero especialmente para tener conocimiento de la cantidad potencial de GEI que se liberan a la atmósfera durante el proceso de quema de la plantación, para así determinar la verdadera contribución e impacto de esta práctica al calentamiento global del planeta.

En este sentido, estudios previos realizados en diferentes latitudes y ambientes productivos han valorado la magnitud de las emisiones de GEI durante la quema de las plantaciones de caña de azúcar. Cabrera y Zuaznabar (2010) determinaron en Cuba que, la quema realizada durante la cosecha generó entre trece y diecisiete toneladas de CO_2 ha^{-1} $año^{-1}$, valores que son muy similares a los reportados por Torres en 1989, citado por Herrera, Milanés, Molina, Ordoñez, Elorza, Castillo, Enríquez y Rodríguez (2009), quien determinó que la emisión de la quema de una hectárea de caña generaba entre 12 y 20 t de CO_2 $año^{-1}$. Estos valores relativamente altos, se explican por el hecho de que probablemente incluyen el CO_2 que se genera durante la combustión de los residuos biomásicos del cultivo.

En Tucumán, Argentina, Acreche y Valero (2011), realizaron un balance energético y de emisiones de GEI por parte de la agroindustria sacro-alcoholera y determinaron que la quema produjo una emisión de $0,7 \text{ t de CO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Similarmente, De Figueiredo y La Scala (2011) en un estudio efectuado en Brasil, estimaron la emisión en aproximadamente $1,0 \text{ t de CO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; en ambos estudios se partió de la quema de la caña para su cosecha. De Figueiredo, Panosso, Romao y La Scala (2011) utilizaron en su estudio, la metodología sugerida por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), partiendo de un estimado de producción de tallos de 81 t ha^{-1} y un residuo de 15 t ha^{-1} , para obtener una relación de tallo cosechado/residuo en el campo de 0,1852. Previamente, De Figueiredo (2010) había determinado que la quema de los residuos en el campo de la caña de azúcar emitió $1,21 \text{ t de CO}_2\text{e ha}^{-1}$, siendo el metano responsable del 72% de esta emisión.

Como se puede deducir de la información anterior, se reporta gran variabilidad en cuanto a la cantidad de GEI emitidos a la atmósfera producto de la quema de biomasa en el cultivo de la caña de azúcar durante su cosecha, lo cual está en concordancia con la posible variación prevaleciente en los estudios accesados en cuanto a la productividad agrícola (t caña ha^{-1}) que resulta del manejo técnico del cultivo, el tipo de suelo, la variedad sembrada, la condición hídrica, nutricional y fitosanitaria prevalecientes, así como las características de la zona agroecológica donde se ubicaron las plantaciones evaluadas. La producción de residuos agroindustriales generados a partir de las fases de producción y procesamiento de la caña para la fabricación de azúcar son muy variados en naturaleza y cantidad, tal como lo demostró Chaves (2001, 2007a) para el caso de Costa Rica.

Es por ello y debido a la gran trascendencia del tema, no solo por su impacto en diferentes elementos como los reseñados al inicio del documento, sino también, por la enorme relevancia que tiene actualmente esta práctica con relación al cambio climático, que se hace necesario desarrollar

investigación en nuestras propias condiciones y ambientes productivos, que permita obtener un estimado de acuerdo con nuestra realidad agrícola y ecológica, para no caer en errores producto de extrapolaciones de datos generados en condiciones que no son representativas de las diferentes zonas productoras de caña de azúcar de Costa Rica.

El presente trabajo de investigación se realizó con el propósito fundamental de estimar la cantidad de gases con efecto invernadero (GEI) liberados por la quema, previo a la corta de los tallos, utilizando para ello cuatro diferentes metodologías de cálculo. El estudio se realizó para cinco escenarios teóricos de quema, aplicables a zonas productoras de caña destinada a la fabricación de azúcar en Costa Rica.

2. Metodología

2.1. Metodologías utilizadas

La estimación de la emisión de GEI proveniente de la quema de las plantaciones de la caña de azúcar, se realizó utilizando y comparando cuatro diferentes metodologías:

- a. La sugerida por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007), para la realización oficial de los Inventarios Nacionales de Gases con Efecto Invernadero que efectúan los países y que se encuentra disponible en las Guías Metodológicas que para tal efecto ha distribuido ampliamente la mencionada institución internacional. En este caso se utilizó para realizar el cálculo el Tier I.
- b. La desarrollada por Cabrera y Zuaznábar (2010), quienes utilizaron para sus estimaciones los siguientes índices y relaciones:
 - Materia seca de la biomasa aérea: 31%
 - Relación masa hojas secas/masa de tallos: 25%
 - Contenido de carbono de las hojas: 43%

- Carbono remanente en el campo: 10%
- Considera solo la combustión de las hojas secas
- c. Se emplearon valores nacionales obtenidos por DIECA en diferentes plantaciones ubicadas en la región productora de Guanacaste, con los cuales se procedió a calcular las siguientes relaciones:
 - Materia seca de las hojas secas: 93% (Aguilar y Chaves, 2009)
 - Relación masa hojas secas/masa de tallos: 10,4 ± 3,2%
 - Las mediciones efectuadas a nivel de campo presumen que la combustión consume completamente las hojas secas.

A partir de estos valores se estimó la emisión utilizando para ello el procedimiento sugerido por el IPCC (2007) en el Tier II.

- d. Una metodología utilizada por FAO/Gobierno de México (2012). En esta metodología para estimar las emisiones de metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) que se desprenden de la quema de los residuos de la caña de azúcar, se utilizaron las siguientes fórmulas de cálculo:

$$\text{CH}_4: P * R_{R/C} * MS * F_q * F_o * C_f * ER_{\text{CH}_4} * CR_{\text{CH}_4}$$

$$\text{N}_2\text{O}: P * R_{R/C} * MS * F_q * F_o * C_f * R_{\text{CN}} * ER_{\text{N}_2\text{O}} * CR_{\text{N}_2\text{O}}$$

Donde:

P: Producción anual de caña de azúcar por unidad de área, toneladas (t).

R_{R/C}: Relación tallos/hoja seca: 10%

MS: Contenido de materia seca del cultivo: 78%

F_q: Fracción de la materia seca que se **quema**: 90%

F_o: Fracción de la materia seca que se **oxida**: 90%

C_f: Fracción de carbono en el residuo: 41%

R_{CN}: Relación carbono/nitrógeno en el residuo: 1%

ER_{CH₄ / N₂O}: Razón de emisiones C-CH₄/N-N₂O

CR_{CH₄ / N₂O}: Factor de conversión C-CH₄/N-N₂O

Para el cálculo de algunas de estas variables se utilizaron criterios específicos aportados por el INE-INIFAP (2006), en consideración de que ellos desarrollaron factores de emisión específicos para el sector agrícola de México.

Para todos los escenarios evaluados y cuando la información disponible lo permitió, se estimó tanto el contenido de metano como el de óxido nitroso, así como también el CO₂ generado durante la combustión de las hojas secas. Todos los resultados se expresan en toneladas de CO₂ equivalente (CO₂e).

Para efectos de valorar cada una de las anteriores metodologías y poder compararlas bajo un mismo criterio, se realizó el cálculo de emisión utilizando el total de la producción nacional de caña obtenida en la Zafra 2012-2013, así como también, el área sembrada y cosechada en hectáreas (Bermúdez y Chaves, 2013).

2.2. Escenarios de quema

Con el objeto de conocer la emisión de GEI potencialmente generada por la quema de plantaciones comerciales, se definieron y establecieron con base en el área de caña efectivamente cosechada (estimada en 58.979 ha), y no el área total sembrada (estimada para el 2012 en 63.316 ha), cinco escenarios de quema. Se estimó que 4.337 ha (7% del área total) no se cosecharon. Esta relación se estableció como resultado del hecho de que en Costa Rica no toda la caña sembrada se cosecha en un mismo año, debido a que los ciclos vegetativos son diferentes (de 11 a 24 meses) por motivos de altitud (0-1.550 msnm). La estimación se realizó y proyectó sobre las siguientes áreas potenciales de quema del área cosechada.

Cuadro 3. Escenarios de quema establecidos, en porcentaje y área para las plantaciones de caña en Costa Rica.

Área cosechada y quemada	
Porcentaje	Hectáreas
0	0
33	19.463
50	29.490
66	38.926
100	58.979

Es muy importante dejar claro, que la presente estimación de la emisión de GEI es exclusiva para lo que acontece con la práctica de la quema de la plantación, durante su cosecha en los anteriores escenarios, razón por la cual, no considera otras fuentes potenciales de emisión de GEI, entre otras, las que provienen de la fertilización nitrogenada (N_2O), la fermentación (CH_4) de material vegetal en el campo y el empleo de equipo mecánico.

Si la comparación se realiza con los totales, que incluyen la cantidad emitida de CO_2 , se puede observar que las Mtdg I y III presentan valores similares y mayores que los obtenidos con las dos restantes metodologías (cuadro 4).

3. Resultados y discusión

3.1. Según metodología utilizada

La magnitud de la emisión varió dependiendo de la metodología (Mtdg) empleada para el respectivo cálculo de los GEI generados durante la combustión de la planta. Cuando se consideró solo el CH_4 y el N_2O , la emisión presentó un rango variable ubicado entre 0,291 y 0,409 t de CO_2 e ha^{-1} año⁻¹ (cuadro 4), siendo el valor más bajo el estimado con la Mtdg II (0,291 t CO_2 e ha^{-1} año⁻¹). Esta diferencia implicó una amplitud de 0,118 t CO_2 e ha^{-1} año⁻¹ lo que es equivalente a 29% de lo estimado con la Mtdg III, valor bastante significativo que ratifica la importancia de definir una metodología apropiada, objetiva, representativa y certera, previo a cualquier estimación que se pretenda realizar. Los valores de las Mtdg I y III son por su parte relativamente similares al obtener índices de 0,383 y 0,409 t CO_2 e ha^{-1} año⁻¹, respectivamente.

Cuadro 4. Emisión estimada de GEI, expresada como t CO₂e, por la combustión de la hojarasca en el cultivo de caña de azúcar empleando cuatro diferentes metodologías.

Índice Estimado	I*	II*	III*	IV*
	Cantidad, t ha⁻¹			
Producción de tallos		71,2	71,2	71,2
Producción de hojas secas		17,7	7,4	6,9
Residuo, materia seca	6,5	5,5	7,0	5,4
Residuo quemado	6,5	5,5	7,0	4,4
Gases generados				
• CH ₄	1,76 10 ⁻²		1,88 10 ⁻²	1,18 10 ⁻²
• N ₂ O	4,55 10 ⁻⁵		4,86 10 ⁻⁵	1,94 10 ⁻⁴
Total, t CO₂e ha⁻¹ año⁻¹	0,383	0,291**	0,409	0,308
• CO ₂	9,85		10,52	6,18***
Total, t CO₂e ha⁻¹ año⁻¹	10,23	7,79	10,93	6,48

* Metodología de estimación empleada.

** Asumiendo las proporciones de CH₄ y N₂O sugeridas por el IPCC (2007).

*** Inferido.

Probablemente la Mtdg III sobre-estime en algún grado la emisión debido a varias razones. La primera es que se considera que el 100% de las hojas secas se queman totalmente, algo que de acuerdo con observaciones realizadas en el campo no ocurre, pues la combustión es predominantemente incompleta, con las posibles excepciones del caso. Sin embargo, no se dispone de datos nacionales al respecto que puedan dilucidar el punto. De igual forma, esta metodología asume como criterio de cálculo, que el 100% del material vegetal orgánico que se quema se oxida, pero no existen datos nacionales para apoyar o refutar con argumento sólido dicha aseveración, así que la decisión fue considerar como principio metodológico que todo el material es oxidado.

Asimismo, se asume que todo el carbono se pierde con la quema al ser oxidado por el fuego. Sin embargo, las observaciones de campo son claras en el sentido de que muestran la presencia de una capa de material carbonoso que cubre el suelo luego de realizar la quema, como se aprecia en la figura 2. Esta fracción de carbono no se ha determinado en términos de su masa, por lo que

debe ser cuantificada para conocer cuál es la cantidad de carbono que se desprende y se pierde del sistema de producción de caña de azúcar, como resultado de la práctica de la quema.

Como puede comprobarse en el campo luego de ejecutar la quema de una plantación de caña de azúcar en pie (figura 2), el impacto del fuego (calor) sobre el suelo es muy reducido debido a que el tiempo de incidencia del calor es muy corto, como resultado de la velocidad con que ocurre la combustión del material vegetal. Esto, asociado a que el suelo no es un buen conductor de calor, como está ampliamente demostrado por la física edáfica, contribuye a explicar las observaciones de campo. Quien ha visto quemar un cañaveral, verificará que las corrientes de calor emergen hacia arriba, hacia la atmósfera y no hacia el suelo, lo que hace que la intensidad del calor en ese punto sea menor. Por tanto, resulta cuestionable lo aducido con relación al posible perjuicio de la quema al contenido de materia orgánica presente en el mismo, menos aún en los horizontes internos del substrato.



Figura 2. Residuos de la combustión de la biomasa de la caña e impacto sobre el suelo.

También es cuestionable la aseveración que atribuye a la quema de caña a la “esterilización e infertilidad del suelo”, sin embargo, si se acepta que la quema de residuos vegetales que algunos productores realizan al material que queda en el suelo, podría eventualmente generar problemas mayores, en consideración de que la residencia y concentración del calor es mucho mayor, por lo que técnicamente no se recomienda el manejo de residuos en esa forma. Por tanto, es fundamental marcar muy bien la diferencia que existe entre una quema agrícola controlada y, por ejemplo, un incendio forestal, tal como lo ha señalado ampliamente Chaves (2006abcd, 2007cd, 2009abcdef y 2010).

Con fundamento en la información generada y expuesta en el cuadro 4, el área actual sembrada con caña de azúcar (aproximadamente 63.316 hectáreas, según Bermúdez y Chaves, (2013), el resultado de los estudios de Kempkes (1998) y más recientemente estimados y actualizados por LAICA (Chaves, comunicación personal, 2013), quienes determinaron que la práctica de quemar las plantaciones comerciales de caña para su cosecha en Costa Rica, se realiza en aproximadamente el 50% (29.490 ha) del área efectivamente cosechada del cultivo (58.979 ha); se realizaron los cálculos pertinentes con el fin de conocer la posible magnitud de los GEI emitidos a la atmósfera por las plantaciones de caña de azúcar que han sido quemadas (cuadro 5).

Cuadro 5. Emisión total de gases con efecto invernadero, t año⁻¹, por la combustión de la hojarasca en el cultivo de caña de azúcar, estimada con cuatro diferentes metodologías.

Índice Estimado	I*	II*	III*	IV*
	Cantidad, t año⁻¹			
Gases generados				
• CH ₄	518		553	348
• N ₂ O	1,34		1,43	5,74
Total, t CO₂e año⁻¹	11.284	8.592	12.061	9.077
Diferencia, t CO₂e año⁻¹	-777	-3.469	---	-2.984

El cuadro 5 presenta la emisión total de CH_4 y N_2O , y su equivalente expresado como CO_2 . De acuerdo con lo sugerido por el IPCC (2007), el cuadro 5 reporta solo la emisión de otros gases diferentes del CO_2 que se generan por la quema de las hojas secas de la caña de azúcar, ya que el CO_2 emitido durante la combustión fue fijado durante la fase de crecimiento vegetativo del cultivo y asume que el mismo volverá a ser nuevamente fijado en el siguiente ciclo de crecimiento vegetativo. Esta consideración es importante en la expresión de los resultados, pues en el caso de incluir la emisión de CO_2 se tendrá entonces una sobreestimación. De acuerdo con la consideración anterior, se selecciona y acepta la Mtdg III como apropiada para el caso de Costa Rica, dado que esta contiene índices de las fracciones provenientes de mediciones de campo realizadas en el país, se puede inferir que la utilización de otras metodologías alternativas empleadas para estimar la cantidad de GEI que se generan durante la quema, estarían subestimando la cantidad total generada en más de 3.400 toneladas de CO_2 equivalente año⁻¹. Esto pone de manifiesto que para poder conocer con mayor precisión la magnitud de las emisiones GEI nacionales, con un nivel bajo de incertidumbre, se requiere desarrollar un proceso de investigación para poder disponer de la información requerida en la cantidad y calidad necesaria.

En todo caso, queda demostrado que si bien la cantidad total emitida de estos 2 GEI (metano y óxido nitroso) son importantes, en la realidad, la magnitud de los mismos no es significativa si se compara con la emisión generada por otras prácticas y sectores económicos del país. Sin embargo, esto no significa, que no se deban realizar esfuerzos para procurar reducir esta práctica (la quema), puesto que además de emitir GEI, también reduce drásticamente la incorporación de valioso material vegetal al suelo, lo que en el largo plazo se podría estar traduciendo en menores contenidos de materia orgánica, lo cual posiblemente afecte negativamente la productividad agroindustrial y el rendimiento económico y rentable de las fincas cañeras. Este es un tema que también debe ser investigado, para determinar si realmente existe un efecto negativo de la quema en la cantidad de carbono que se puede potencialmente incorporar y almacenar en el suelo.

3.2. Según escenarios de quema

La quema en Costa Rica es una práctica no generalizada en toda el área cubierta por el cultivo de la caña de azúcar. A fin de conocer la reducción en la emisión de CO_2 que se podría producir por la eliminación parcial o total de esta práctica, se presenta a continuación la emisión que en teoría se esperaría en cinco posibles escenarios teóricos de quema (cuadro 6).

En adición a este punto, cabe destacar como anotaran oportunamente Bermúdez y Chaves (2013), que pese a que en Costa Rica hay identificadas actualmente 63.316 hectáreas sembradas con caña y destinadas a la fabricación de azúcar, de ese total solo se cosecharon durante la Zafra 2012-2013 un total de 58.979 ha, correspondiente al 93% del área sembrada. Las 4.337 ha (6,8%) restantes no se queman y tampoco ingresan como materia prima al ingenio para su procesamiento fabril, ya que se destinan a otros usos alternativos como son la producción de semilla, el uso pecuario como forraje, la elaboración de dulce, o corresponden a plantaciones cuyo ciclo vegetativo es mayor al año (18 a 24 meses) como acontece en las localidades con alturas superiores a 1.000 msnm, que emplean como material de siembra variedades de origen hawaiano, Sigla H, adaptadas a esas condiciones tan particulares de producción.

Bajo las actuales circunstancias y respetando el considerando de que en Costa Rica se quema aproximadamente el 50% del área cosechada de caña, se estima (Mtdg II) que actualmente se estarían emitiendo a la atmósfera un total aproximado de 12.061 toneladas de CO₂e cada año. Ello significa, que por ser una práctica de ejecución no generalizada en el país, la atmósfera

está dejando de recibir la misma cantidad de CO₂e (12.061 t año⁻¹), tal como ocurriría si se quemara el 100% de las plantaciones comerciales, en cuyo caso la emisión sería de 24.122 t año⁻¹. El cuadro 6 detalla la cantidad de GEI emitida a la atmósfera, estimada por cada una de las cuatro metodologías de cálculo evaluadas, para los cinco escenarios teóricos de quema.

Cuadro 6. Escenario porcentual de quema y emisión de GEI, en t de CO₂e equivalente año⁻¹, con diferentes escenarios de quema en el cultivo de la caña de azúcar en Costa Rica.

Escenario de área quemada	Metodologías de estimación de emisión de GEI				
	%	I*	II*	III*	IV*
0	---	---	---	---	---
33	7.447	5.670	7.959	5.991	
50	11.284	8.592	12.061	9.077	
66	14.895	11.341	15.920	11.982	
100	22.568	17.183	24.121	18.154	

* Metodología usada en el cálculo.

Si esta práctica pudiera eliminarse parcialmente de forma sistemática y progresiva, de tal manera que en poco tiempo alcanzara solo un tercio (33%) del área cosechada, se estarían dejando de emitir a la atmósfera 4.102 t de CO₂e año⁻¹. Ello es equivalente a sacar de circulación 2.732 vehículos livianos, o bien, sembrar aproximadamente 341 hectáreas de alguna especie forestal conocida. Esto demuestra la significativa contribución que se estaría haciendo a la mitigación de GEI, con la reducción parcial de la práctica de quemar las plantaciones de caña para realizar su cosecha.

Si se lograra eliminar totalmente esta práctica, la mitigación que se realizaría sería aún mayor, pues sería equivalente a sacar de circulación 8.040 vehículos livianos o la siembra de 1.005 ha de especies forestales.

Con estos resultados se demuestra el importante beneficio ambiental, ligado al cambio climático, que produciría el realizar un esfuerzo institucional y personal por parte de los productores

independientes de caña, orientado a lograr la reducción o eliminación de la práctica de la quema, sin que se incluya en esta visión otros beneficios colaterales vinculados y relacionados para este importante sector productivo. Entre ellos se puede mencionar el potencial de incremento en el contenido de la materia orgánica del suelo (lo cual significa captura de carbono) y el mejoramiento de la actividad microbiológica del mismo, ambas de gran importancia para lograr sistemas de producción sostenibles y con menor requerimiento de insumos externos. Con ello se estarían desarrollando sistemas de producción más competitivos y rentables, lo cual es clave actualmente debido a las exigentes condiciones de mercado que buscan productos con una mejor relación con el ambiente.

4. Conclusiones

Se determinó que existen diferencias importantes en la cantidad de gases con efecto invernadero estimado mediante las cuatro metodologías de cálculo utilizadas, lo cual sugiere la necesidad de investigar más al respecto, con el objeto de obtener la información requerida basada en índices nacionales, que permitan realizar la determinación de los gases evaluados con alto grado de confiabilidad y baja incertidumbre.

Entre metodologías se detectó un rango de variación en los valores mínimo (0,291 t de CO₂ e ha⁻¹ año⁻¹) y máximo (0,409 t de CO₂ e ha⁻¹ año⁻¹), correspondiente a las metodologías II y III y equivalente a un 39% (0,118 t de CO₂ e ha⁻¹ año⁻¹), valor que ratifica la importancia de definir y validar una metodología apropiada, objetiva y certera, previo a cualquier estimación de GEI que se pretenda realizar.

La metodología que se considera estimó mejor la emisión de GEI fue la III, ya que utilizando parámetros nacionales, determinó la liberación a la atmósfera de 12.061 t de CO₂ equivalente, producto de la emisión de 0,409 t de CO₂ e ha⁻¹ año⁻¹. La estimación se establece bajo el supuesto de que actualmente se deja de quemar el 50% del área cosechada quemada a nivel nacional. A su vez esta metodología fue la que reportó los valores de GEI más altos en los cinco escenarios de quema evaluados.

La magnitud de la emisión de GEI está en relación directa con el área de caña cosechada y quemada, ya que se determinó una emisión creciente conforme se aumentó el porcentaje de plantaciones sometidas a la quema para realizar su cosecha.

5. Recomendaciones

Regionalizar por zonas productoras de caña las estimaciones de GEI emitidas durante la quema de plantaciones, de tal manera que permita dictaminar con mayor certeza la situación local y nacional.

Desarrollar y actualizar de manera continua y sistemática, un registro oficial del área nacional de plantaciones de caña de azúcar que es quemada anualmente, lo cual se sugiere se regionalice y zonifique. Esto permitiría cumplir con alto grado de certeza y exactitud el punto anterior.

Desarrollar y validar la métrica nacional necesaria para sustentar los cálculos y estimaciones futuras de GEI, lo cual incluye determinar valores representativos del contenido de carbono en hojas y remantes del suelo, fracciones vegetales y residuales de la planta de caña en condición pre y post quema; así como también, la medición en campo de las emisiones de metano, óxido nitroso y dióxido de carbono, determinar la relación C/N en residuos vegetales, estimar el grado de combustión y oxidación de la materia seca quemada, conocer los contenidos de biomasa aérea (materia seca), y calcular la relación hojas secas/masa de tallos y tallos/hojas secas, entre otras.

Además, es necesario generar información complementaria de captación y fijación de CO₂ por la planta, a fin de establecer balances regionales de gases en el cultivo de la caña de azúcar.

Con el objeto de eliminar especulaciones y aseveraciones no fundamentadas en criterios y resultados científicos verificables, se recomienda también investigar el impacto del fuego en el suelo, para lo cual se sugiere involucrar a la academia.

6. Referencias

Acreche, M. y Valero, A. (2011). *Balance energético y emisiones de gases de efecto invernadero de la agroindustria sucro-alcoholera de Tucumán*. Trabajo presentado en la XVII Reunión Técnica Nacional de la Caña de Azúcar. Salta, Argentina.

- Aguilar, J.C. y Chaves, M. (2009). *Determinación de los efectos de nueve tipos y cinco porcentajes de materia extraña (basura), sobre las variables de la calidad industrial de la caña de azúcar, en Azucarera El Viejo, Costa Rica*. Trabajo presentado en el Congreso Azucarero ATACORI "Cooperativa Agrícola Industrial El General R.L.", 17. Colegio de Ingenieros Agrónomos, San José, Costa Rica.
- Angulo, A. y Chaves, M. (1999a). *Evaluación del contenido de materia extraña en caña de azúcar. Ingenio Taboga, Cañas, Guanacaste*. Trabajo presentado en el Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11. San José, Costa Rica.
- Angulo, A. y Chaves, M. (1999b). *Contenido de materia extraña en la caña de azúcar cosechada bajo la modalidad de corta manual y mecánica, en el Ingenio Palmar en Miramar de Puntarenas*. Trabajo presentado en el Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11. San José, Costa Rica.
- Bermúdez, L.A. y Chaves, M.A. (2013). Resultados agroindustriales finales de la zafra 2012-2013. *Boletín Informativo "Conexión"*, Número 7, Enero-Agosto 2013, LAICA, San José, Costa Rica. p: 3-30.
- Cabrera, J. y Zuaznabar, R. (2010). Impacto sobre el ambiente del monocultivo de la caña de azúcar con el uso de la quema para la cosecha y la fertilización nitrogenada. I. Balance del carbono. *Cultivos Tropicales*. 31 (1):5-13.
- Chaves, M. (2001). *Estimación de la cantidad de residuos y derivados producidos por la agroindustria azucarera costarricense*. Seminar on Development of Environmentally Compatible Polymers from Biowaste. San José, Costa Rica.
- Chaves, M. (2007a). *Producción potencial de residuos agroindustriales por el sector azucarero costarricense*. Trabajo presentado en el Encuentro Nacional Sobre Uso de Derivados Agroindustriales de la Caña de Azúcar. Liberia, Guanacaste.
- Chaves, M. (2007b). *Actualidad sobre la práctica de quemar las plantaciones comerciales de caña de azúcar en Costa Rica*. Trabajo presentado en Pérez Zeledón, Costa Rica.
- Chaves, M. (2007c). Actualidad sobre la quema de cañaverales en Costa Rica. Trabajo presentado en DIGECA, MINAET. San José, Costa Rica.
- Chaves, M. (2007d). *Anotaciones sobre legislación quemas de cañaverales*. San José, Costa Rica.
- Chaves, M. (2009a). *Quema de la caña de azúcar*. Trabajo presentado en el Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica.
- Chaves, M. (2009b). *Reglamento para quemas agrícolas controladas*. Decreto # 35368-MAG-S-MINAET La Gaceta # 147 30 julio 2009. Trabajo presentado en Pérez Zeledón, Costa Rica.
- Chaves, M. (2009c). *Alcances técnicos del nuevo reglamento para autorizar la práctica de la quema en la caña de azúcar*. Trabajo presentado en Pitahaya, Puntarenas, Costa Rica.

- Chaves, M. (2009d). *Nueva reglamentación para quemar cañaverales en Costa Rica: una interpretación simple y pragmática de sus alcances*. LAICA-DIECA San José, Costa Rica. 14 p.
- Chaves, M. (2009e). *Solicitud del permiso y presentación del plan de quema controlada de una plantación comercial de caña de azúcar: desarrollo de un ejemplo práctico*. LAICA-DIECA San José, Costa Rica. 16 p.
- Chaves, M. (2009f). Nueva reglamentación para quema de cañales. *Boletín Informativo "Conexión"*, 1 (2): 3.
- Chaves, M. (2010). Quemadas agrícolas controladas. *Revista Germinar*, 1(1): 19
- Chaves, M. y Bermúdez, A. (1999). *Por una mayor conciencia ambiental en el sector azucarero*. Trabajo presentado en el Congreso de ATACORI "Randall E. Mora A.", 13, Carrillo, Guanacaste, Costa Rica.
- Chaves, M. y Bermúdez, A.Z. (2006a). *Motivos y razones para quemar las plantaciones de caña de azúcar en Costa Rica*. Trabajo presentado en el Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Centroamérica (ATACA), Heredia, Costa Rica.
- Chaves, M. y Bermúdez, A.Z. (2006b). *Consideraciones para la quema tecnificada de una plantación comercial de caña de azúcar en Costa Rica*. Trabajo presentado en el Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Centroamérica (ATACA), 16. Heredia, Costa Rica.
- Chaves, M. y Bermúdez, A.Z. (2006c). *Regulaciones internacionales sobre quema de la caña de azúcar*. Trabajo presentado en el Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Centroamérica (ATACA), 16. Heredia, Costa Rica.
- Chaves, M. y Bermúdez, A.Z. (2006d). *Quema regulada de plantaciones para la cosecha de la caña de azúcar en Costa Rica: consideraciones legales*. Trabajo presentado en Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Centroamérica (ATACA), 16. Heredia, Costa Rica.
- De Figueiredo, E. y La Scala, N. (2011). Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest in Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 141:77–85.
- De Figueiredo, E.; Panosso, A.; Romão, R y La Scala, N. (2010). Research Greenhouse gas emission associated with sugar production in southern Brazil. *Carbon Balance and Management* 5:3-9.
- FAO-Gobierno de México. (2012). *Línea de Base del Programa de Sustentabilidad de los Recursos Naturales. Subíndice de Emisiones de Gases Efecto Invernadero – Metodología de Cálculo*. Levantamiento de línea de base del Programa de Sustentabilidad de los Recursos Naturales. Emisiones de GEI del Sector Agropecuario en México. 64 p.

- Herrera, A., Milanés, N., Molina, F., Ordoñez, P., Elorza, P., Castillo, A., Enríquez, V. y Rodríguez, D. (2009). Efecto del manejo de los residuos de cosecha de la caña de azúcar (*Saccharum* spp. híbrido) sobre el rendimiento de campo en Veracruz, México. *Revista UDO Agrícola* 9(3):517-521.
- INE-INIFAP. (2006). *Obtención de factores de emisión nacionales en el sector agrícola para disminuir incertidumbre en el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero*. 22 p.
- IPCC. (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Japan.
- IPCC. (2007). *Fourth Assessment Report. Working Group III Report Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kempkes, Y. (1998). *Costos de producción de la caña de azúcar en Guanacaste, Costa Rica*. CATIE-WAU-MAG. 35 p.
- Larios, G.I. (2010). *La quema de la caña de azúcar en Guanacaste, impacto ambiental. Deber del Estado de disminuir sus efectos*. Universidad de Costa Rica, Facultad de Derecho. 173 p.
- Montenegro, J. y Chaves, M. (2011). *Contribución del sector cañero a la mitigación del cambio climático*. Trabajo presentado en Congreso Azucarero Nacional ATACORI "MSc. Teresita Rodríguez Salas (+)", 18, Colegio de Ingenieros Agrónomos, San José, Costa Rica.
- Montenegro, J. y Chaves, M. (2009). *Emisión de gases por la caña de azúcar: propuesta metodológica para realizar un balance de carbono*. Trabajo presentado en Congreso Azucarero ATACORI "Cooperativa Agrícola Industrial El General R.L.", 17. Colegio de Ingenieros Agrónomos. San José, Costa Rica.
- Montenegro, J. y Abarca, S. (2001). *La importancia del sector agropecuario en la mitigación del cambio climático*. San José, Costa Rica. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Instituto Meteorológico Nacional. 96 p.
- Subirós, F. (1995). *El Cultivo de la Caña de Azúcar*. 1 ed. San José, Costa Rica: EUNED. 353-370.

Efecto indirecto de la tormenta tropical Sandy sobre la precipitación del 2012 en Costa Rica

JOSÉ ALBERTO RETANA¹

Resumen

Se estudió el efecto indirecto del sistema ciclónico asociado a la tormenta tropical Sandy, en comparación con la sequía producto del fenómeno El Niño. Ambos eventos tuvieron un efecto diferenciado en las regiones climáticas de Costa Rica. La sequía se presentó en el Pacífico Norte y Región Central de Costa Rica. En el resto del país, se produjeron meses consecutivos secos pero sin llegar a considerarse una sequía. La tormenta tropical Sandy que se presentó en octubre, aportó un acumulado de lluvia importante para la Región Central y el Pacífico Central, sin embargo los montos de lluvia no fueron suficiente como para normalizar el acumulado de lluvia anual. El peso de la sequía provocada por El Niño (3 a 4 meses) fue mucho mayor al peso del temporal provocado por Sandy (5 días).

PALABRAS CLAVE: TORMENTA TROPICAL SANDY, EVENTOS EXTREMOS, SISTEMAS CICLÓNICOS, VARIABILIDAD CLIMÁTICA, ENOS, SEQUÍA.

Abstract

Was studied the indirect effect of Sandy tropical storm against the El Niño's drought in 2012. Both events had a differential effect on climatic regions of Costa Rica. Drought occurred in the North Pacific and Central Region of Costa Rica. In the rest of the country, there were consecutive dry months. The tropical storm Sandy was presented in October. It brought a major rain accumulated in the Central Region and Central Pacific; however the amounts of rain were not enough to normalize the cumulative annual rainfall. The weight of the drought caused by El Niño (3-4 months) was higher than the Sandy storm (5 days).

KEYWORDS: TROPICAL STORM SANDY, EXTREME EVENTS, CYCLONIC SYSTEMS, CLIMATE VARIABILITY, ENSO, DROUGHT.

1. Introducción

El balance y distribución final de la precipitación acumulada durante un año, responde a los diferentes eventos hidrometeorológicos que se hayan presentado. Sequías o lluvias extremas influyen sobre el total de lluvia anual. De acuerdo con Retana y Villalobos (2000, 2003) y Retana (2010), normalmente se puede capturar la señal de los eventos extremos diarios, en los valores mensuales e incluso anuales. De esta forma, la

lluvia mensual y anual integra el paso de frentes fríos entre los meses de noviembre y febrero, los sistemas ciclónicos entre junio y noviembre o el paso constante de ondas tropicales. Eventos de mesoescala como las fases de ENOS, son también registrados por la lluvia anual, en el sentido de que sus fases tienen altas probabilidades de producir sequías extensas en el Pacífico o lluvias extremas en el Caribe.

¹ Ingeniero Agrónomo. Investigador del Departamento de Climatología e Investigación Aplicada. Instituto Meteorológico Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: jretana@imn.ac.cr

Durante el año 2012, se presentaron en Costa Rica dos eventos hidrometeorológicos extremos, que fueron contrastantes. El primero fue la fase cálida de El Niño, que se inició en junio y terminó en octubre, y produjo una sequía que impactó principalmente el Pacífico Norte y Región Central de nuestro país, generando también meses secos en el resto del país. Las precipitaciones bajo el promedio en el Caribe y Zona Norte no pueden ser explicadas por la presencia de este fenómeno, si se asume un comportamiento clásico de ENOS. La sequía del 2012 es considerada una de las más intensas del presente siglo, máxime si se considera que el patrón seco predominó en la mayor parte del año en todas las regiones climáticas del país. Un segundo evento importante se presentó a finales de octubre. Los efectos indirectos de la tormenta tropical Sandy se hicieron sentir en la Región Central, Pacífico Central y Pacífico Sur de Costa Rica ocasionando inundaciones y lluvias extremas.

El objetivo del presente estudio es dimensionar el efecto que tuvo la tormenta tropical Sandy en octubre del 2012, con relación a la sequía experimentada entre junio y diciembre del 2012.

2. Metodología

Se utilizó la información de 9 estaciones de la red meteorológica nacional, representativas de 6 regiones climatológicas del país y con suficiente historial como para obtener estadísticas robustas. Se calcularon escenarios climáticos diarios y mensuales utilizando los percentiles como criterio para fijar los umbrales críticos. La información diaria durante el período de afectación de la tormenta tropical Sandy, se comparó con tres escenarios: seco, normal y lluvioso. La información mensual del año 2012, se comparó con cinco escenarios: seco extremo, seco, normal, lluvioso y lluvioso extremo. A nivel mensual se analizó la precipitación acumulada por medio de la comparación con el promedio histórico.

3. Resultados

3.1. Análisis diario (período 21-25 de octubre del 2012)

Entre abril y mayo se empezó a gestar la fase cálida de ENOS (El Niño-Oscilación Sur), la cual alcanzó la máxima intensidad en julio y se disipó en octubre. Fue un evento de baja intensidad y corta duración (IMN, 2012b), de hecho, la comunidad internacional no catalogó el evento cálido del 2012 como un fenómeno El Niño, sin embargo, debido al impacto de la sequía generada y las características de su magnitud y extensión en el país, el Instituto Meteorológico Nacional lo oficializó para nuestras condiciones locales. La sequía provocada por El Niño, impactó básicamente tres sectores: agua potable, generación hidroeléctrica y producción agropecuaria (Cuesta, 2012).

Una vez finalizado El Niño, el diecisiete de octubre ingresó al mar Caribe una onda tropical que se organizó en un sistema ciclónico el día veintidós. En el transcurso de la mañana el sistema se intensificó hasta alcanzar la categoría de depresión tropical, la número dieciocho hasta ese momento y que antes de finalizar el día se convirtió en la tormenta tropical Sandy. Debido a su lento desplazamiento sobre aguas cálidas (29°C), el veinticuatro de octubre alcanzó el grado de huracán (IMN, 2012b). En el período comprendido entre el 21 al 25 de octubre Costa Rica fue impactada por el incremento del flujo de humedad del Pacífico, que ocasionó lluvias extremas que causaron interrupciones en algunas vías del Pacífico Sur y el aislamiento de veintidós comunidades en el Pacífico Central y Sur (Naranjo, 2012).

Los efectos de la tormenta tropical Sandy fueron diferentes para las regiones climáticas de Costa Rica. En el Pacífico Norte y el Caribe no se registraron efectos importantes en la lluvia diaria y la lluvia acumulada durante el temporal. Para todas las estaciones del Pacífico Central, Pacífico Sur y Región Central se produjeron escenarios lluviosos en la mayor parte de los días del temporal, tal y como se observa en el cuadro 1.

De acuerdo con los escenarios planteados, los efectos indirectos del huracán se presentaron

primero en el Pacífico Sur y luego se trasladaron al Pacífico Central y Región Central.

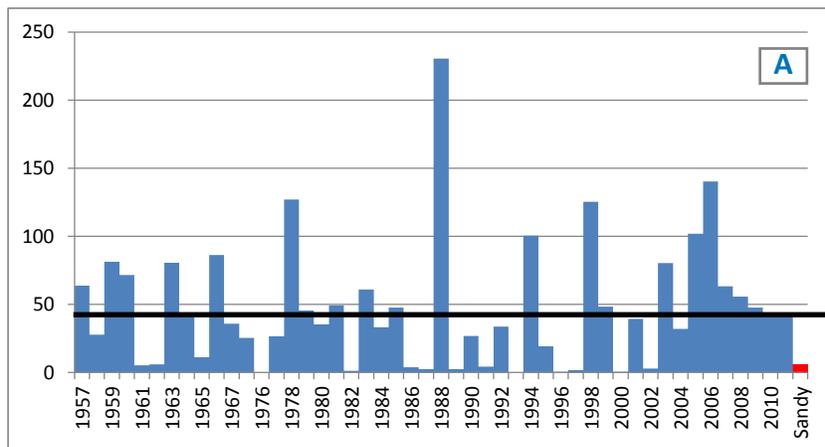
Cuadro 1. Escenarios de afectación durante los días del temporal provocados por el Huracán Sandy. Del 21 al 25 de octubre 2012.

Región	Estación	Escenario de afectación*				
		21	22	23	24	25
Pacífico Norte	Liberia					
Región Caribe	Limón					
Región Central	Alajuela					
	Fabio Baudrit					
	Pavas					
Pacífico Central	Palo Seco					
	Damas					
	Anita					
Pacífico Sur	Puerto Jiménez					

*

Seco	
Normal	
Lluvioso	

De acuerdo con la figura 1, Sandy no provocó efectos en cuanto al total de lluvia acumulada en el Pacífico Norte y Región Caribe.



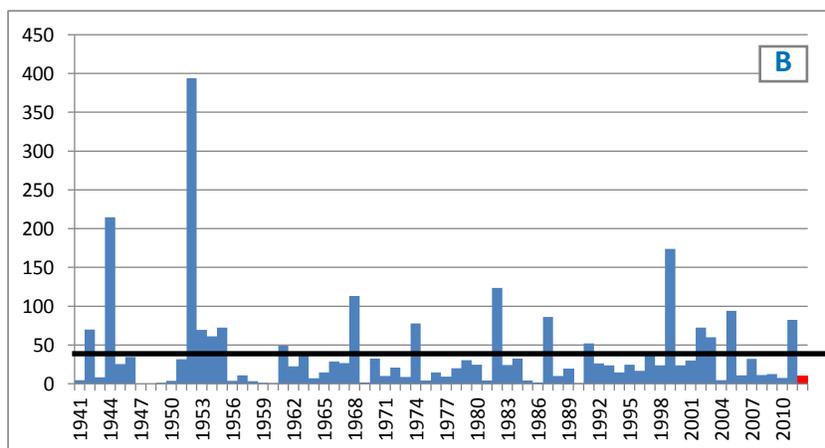
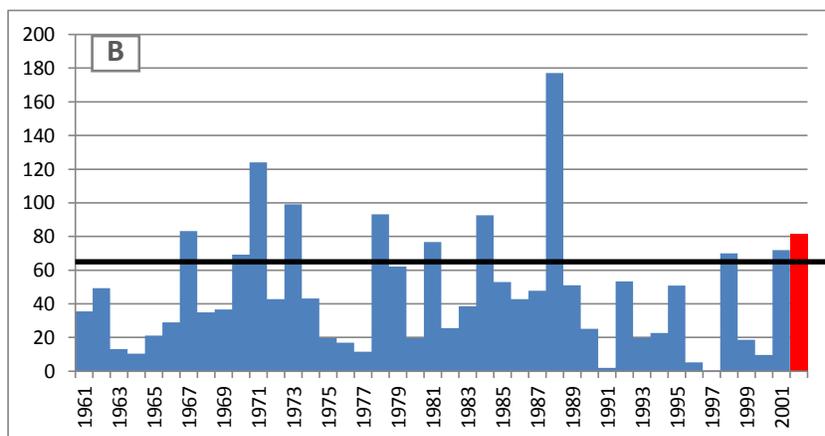
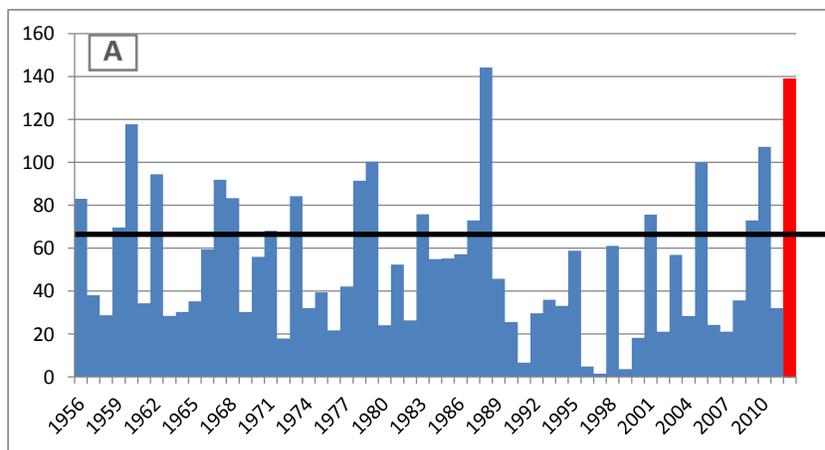


Figura 1. Serie histórica de la lluvia acumulada entre el 21 y el 25 de octubre (mm). Estación de Liberia, Pacífico Norte (A), estación de Limón, Región Caribe (B). (La línea negra corresponde al promedio y la columna en rojo al período asociado al Huracán Sandy).

En el Pacífico Central, Pacífico Sur y Región Central, Sandy produjo efectos perceptibles en el acumulado de lluvia de los 5 días de temporal. Durante este período, la lluvia acumulada

sobrepasó el promedio histórico esperado para las estaciones de la Región Central, Pacífico Central, Pacífico Sur, tal y como se observa en las figuras 2, 3 y 4.



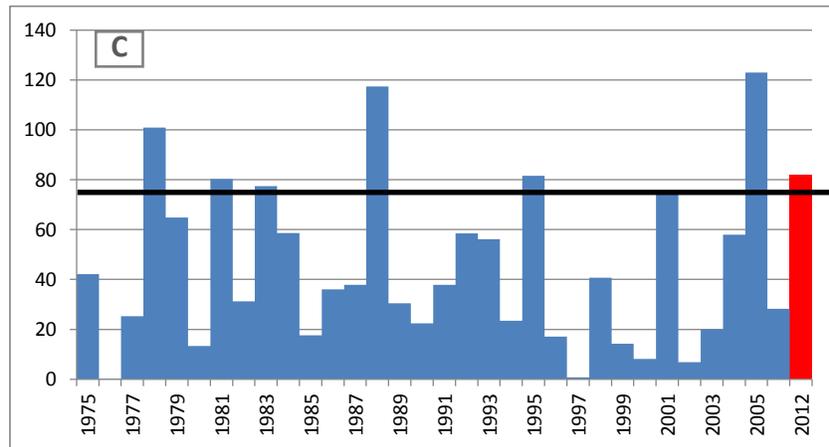
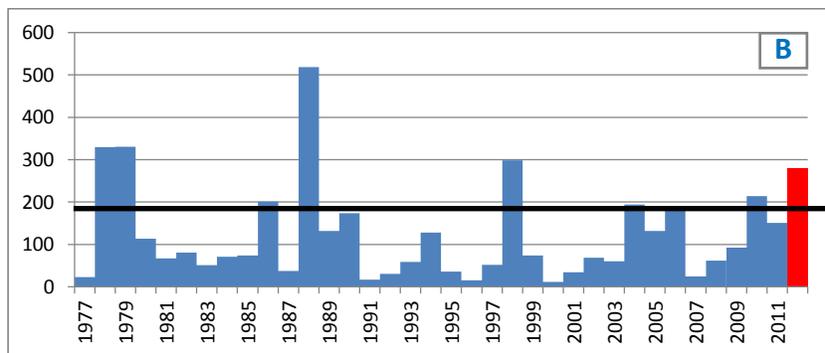
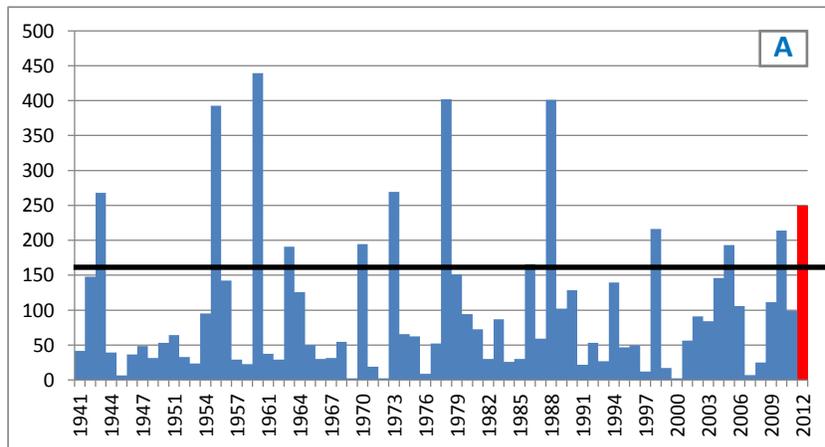


Figura 2. Serie histórica de la lluvia acumulada entre el 21 y el 25 de octubre (mm). Estación Fabio Baudrit (A), Alajuela (B) y Pavas (C), Región Central. (La línea negra corresponde al promedio y la columna en rojo al período asociado a la tormenta tropical Sandy).



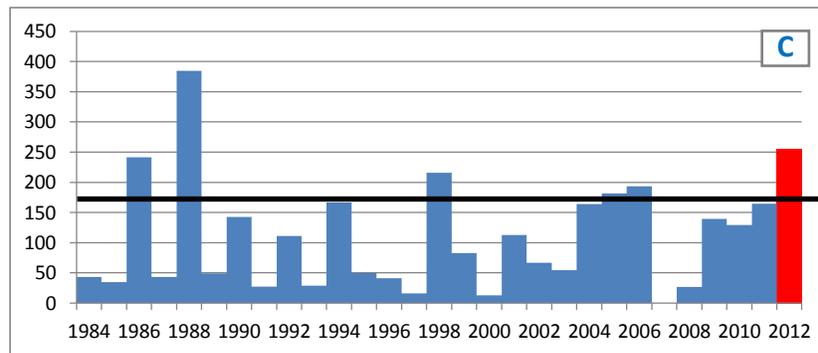


Figura 3. Serie histórica de la lluvia acumulada entre el 21 y el 25 de octubre (mm). Estación Palo Seco (A), Estación Anita (B), Damas (C) Pacífico Central. (La línea negra corresponde al promedio y la columna en rojo al período asociado a la tormenta tropical Sandy).

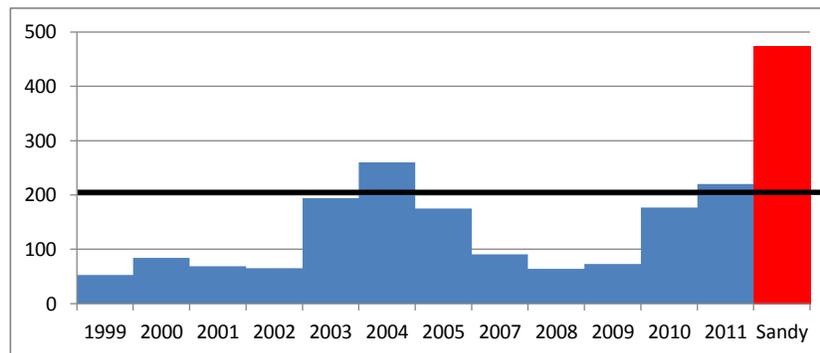


Figura 4. Serie histórica de la lluvia acumulada entre el 21 y el 25 de octubre (mm). Estación Los Patios, Puerto Jiménez. Pacífico Sur. (La línea negra corresponde al promedio y la columna en rojo al período asociado a la tormenta tropical Sandy).

A nivel diario los efectos fueron diferentes, hacia el oeste de la Región Central las mayores magnitudes de lluvia se obtuvieron entre el 23 y el 25 de octubre. En el centro del país, el temporal fue más notorio los días 22 y el 25 (ver figura 5 A y B).

De acuerdo con la figura 5 C, en la Región Central del país, el temporal alcanzó escenarios lluviosos solo hacia el oeste, no así en el centro del país donde las precipitaciones estuvieron muy cercanas a lo normal.

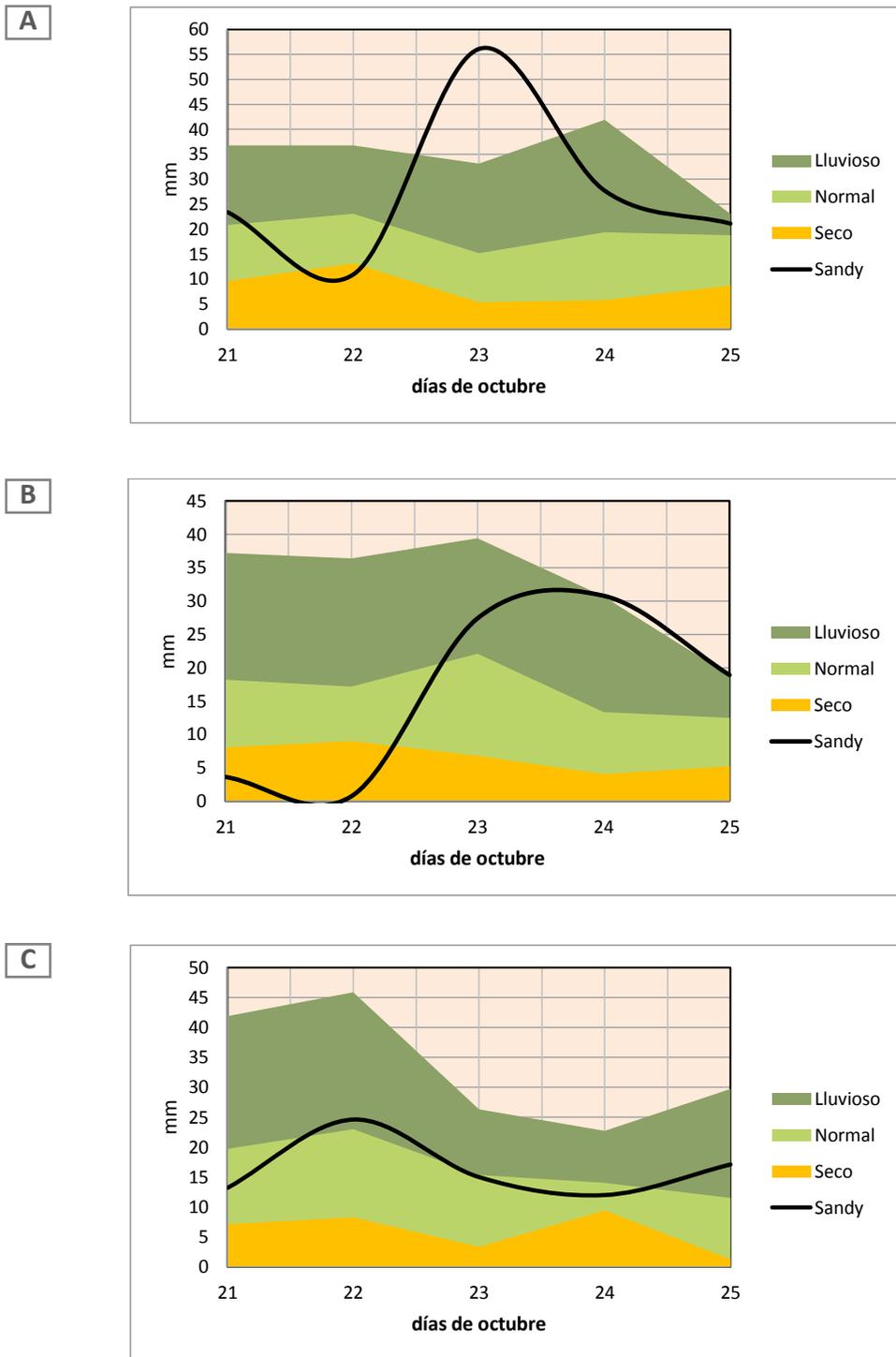


Figura 5. Precipitación (mm) entre el 21 y el 25 de octubre asociada con el paso de la tormenta tropical Sandy, comparada con tres escenarios climatológicos: seco, normal y lluvioso. Estaciones de Alajuela (A), Fabio Baudrit (B), Pavas (C). Región Central.

En el Pacífico Central, el temporal alcanzó escenarios lluviosos y se concentró entre el 23 y el

25, siendo el día veinticuatro el más lluvioso (ver figura 6).

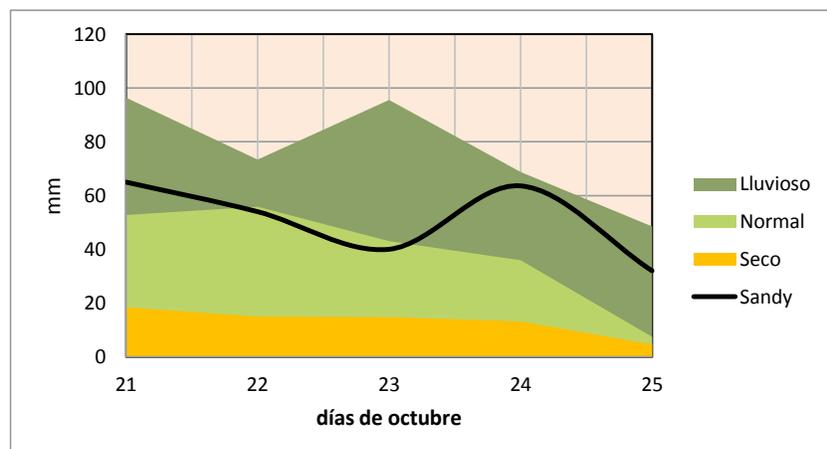
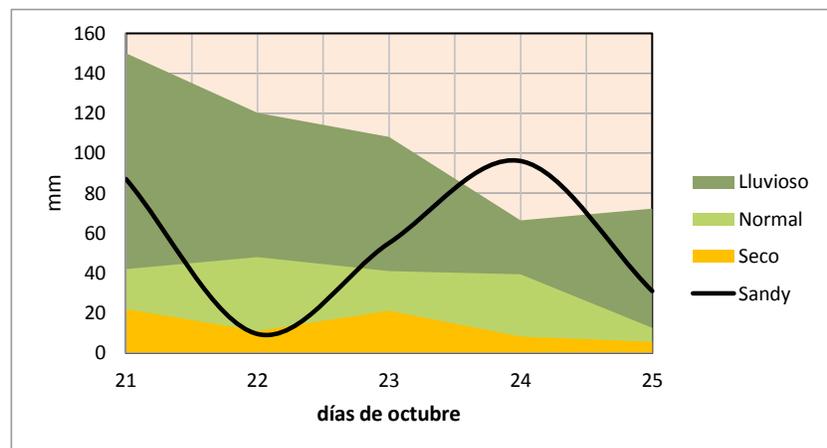
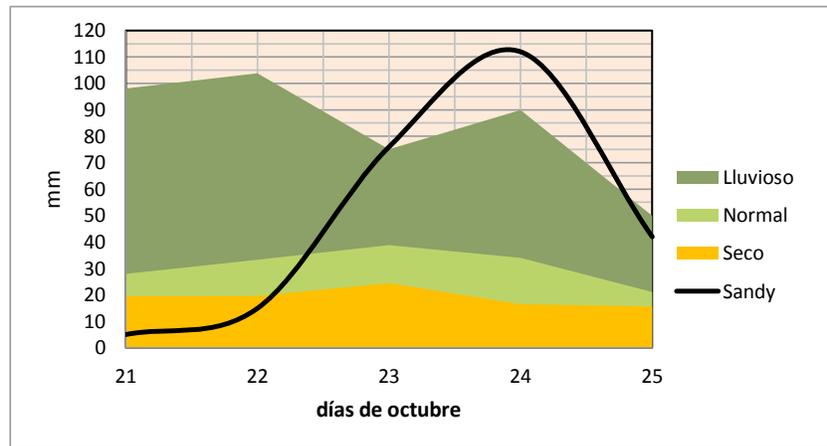


Figura 6. Precipitación (mm) entre el 21 y el 25 de octubre asociada con el paso de la tormenta tropical Sandy, comparada con tres escenarios climatológicos: seco, normal y lluvioso. Estaciones de Palo Seco (A), Anita (B), Damas (C). Pacífico Central.

En el Pacífico Sur el temporal se concentró entre el 21 y el 23 de octubre, cuando alcanzó escenarios lluviosos tal y como se aprecia en la figura 7.

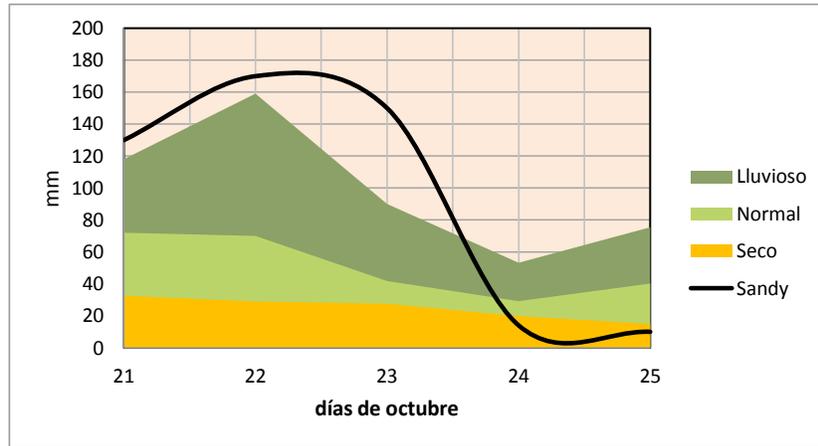


Figura 7. Precipitación (mm) entre el 21 y el 25 de octubre asociada con el paso de la tormenta tropical Sandy, comparada con tres escenarios climatológicos: seco, normal y lluvioso. Estación de Los Patios, Puerto Jiménez. Pacífico Sur.

3.2. Análisis mensual (año 2012)

En la figura 8 se compara el acumulado de lluvia de Sandy con el promedio mensual del mes de

octubre, para estimar el porcentaje de lluvia aportada por el temporal. Se puede observar que Sandy generó más del 20% de la lluvia esperada para todas las estaciones.

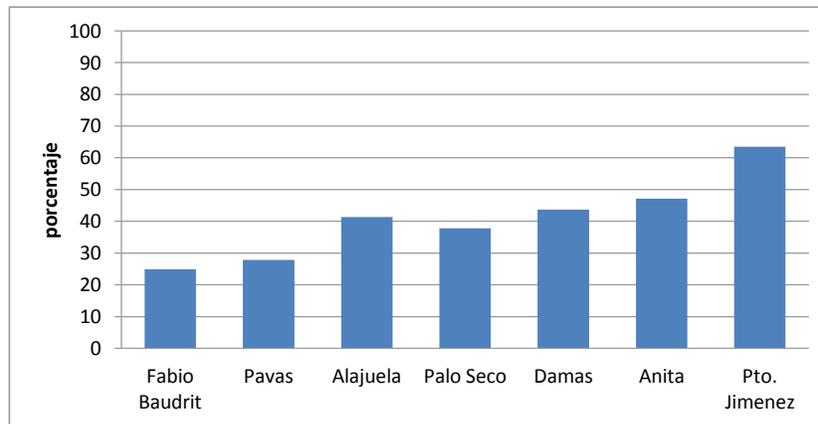


Figura 8. Aporte porcentual de la tormenta tropical Sandy a la lluvia promedio del mes de octubre para distintas estaciones meteorológicas del Pacífico Central, Pacífico Sur y Región Central de Costa Rica.

A pesar que el aporte porcentual de Sandy para el mes de octubre en la región Central fue en promedio de un 31%, su efecto no contribuyó a

detener la sequía que se prolongó hasta finalizar la época de lluvia (noviembre-diciembre), como se observa en las figuras 9 y 10.

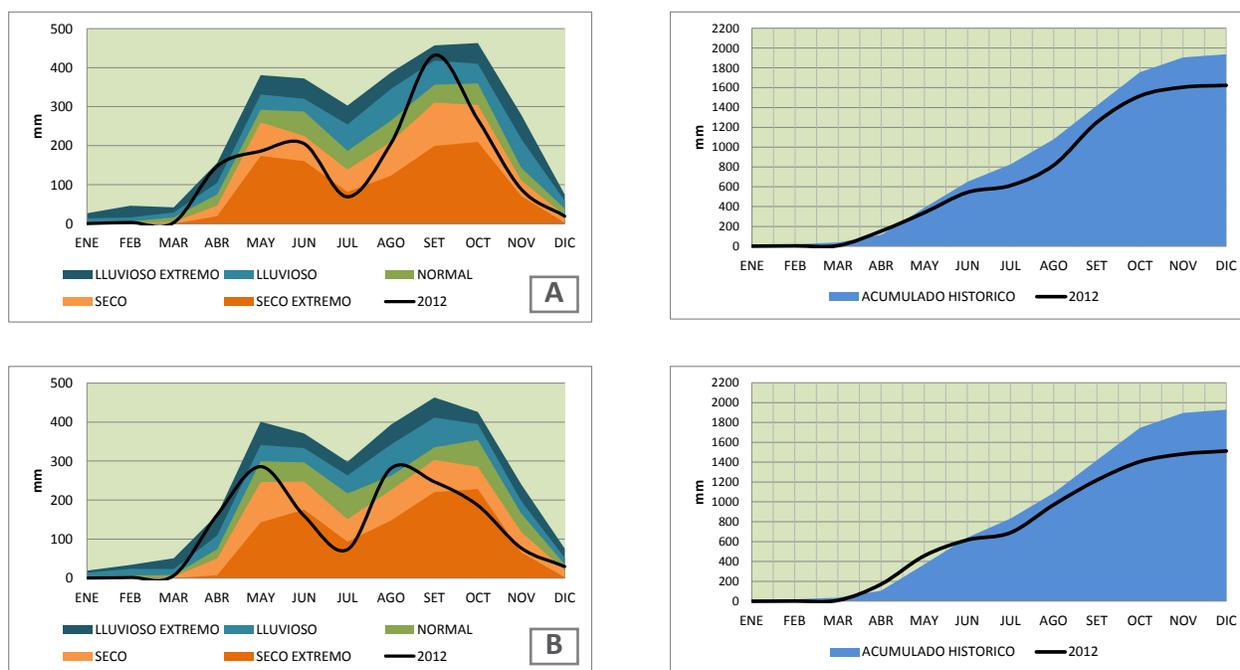


Figura 9. Aporte porcentual de la tormenta tropical Sandy a la lluvia promedio del mes de octubre para distintas estaciones meteorológicas del Pacífico Central, Pacífico Sur y Región Central de Costa Rica.

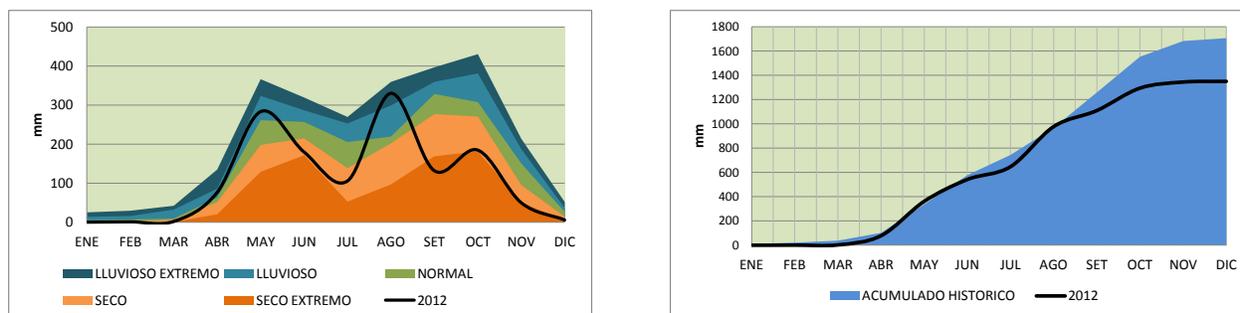


Figura 10. Precipitación mensual y acumulada durante el 2012, comparada con cinco escenarios climatológicos. Estación de Pavas. Región Central.

En el Pacífico Central y Pacífico Sur, Sandy contribuyó con un 43 y un 64% de la lluvia total del mes de octubre, que fue lluvioso. A partir

de ahí las condiciones no variaron tal y como se muestra en las figuras 11 y 12.

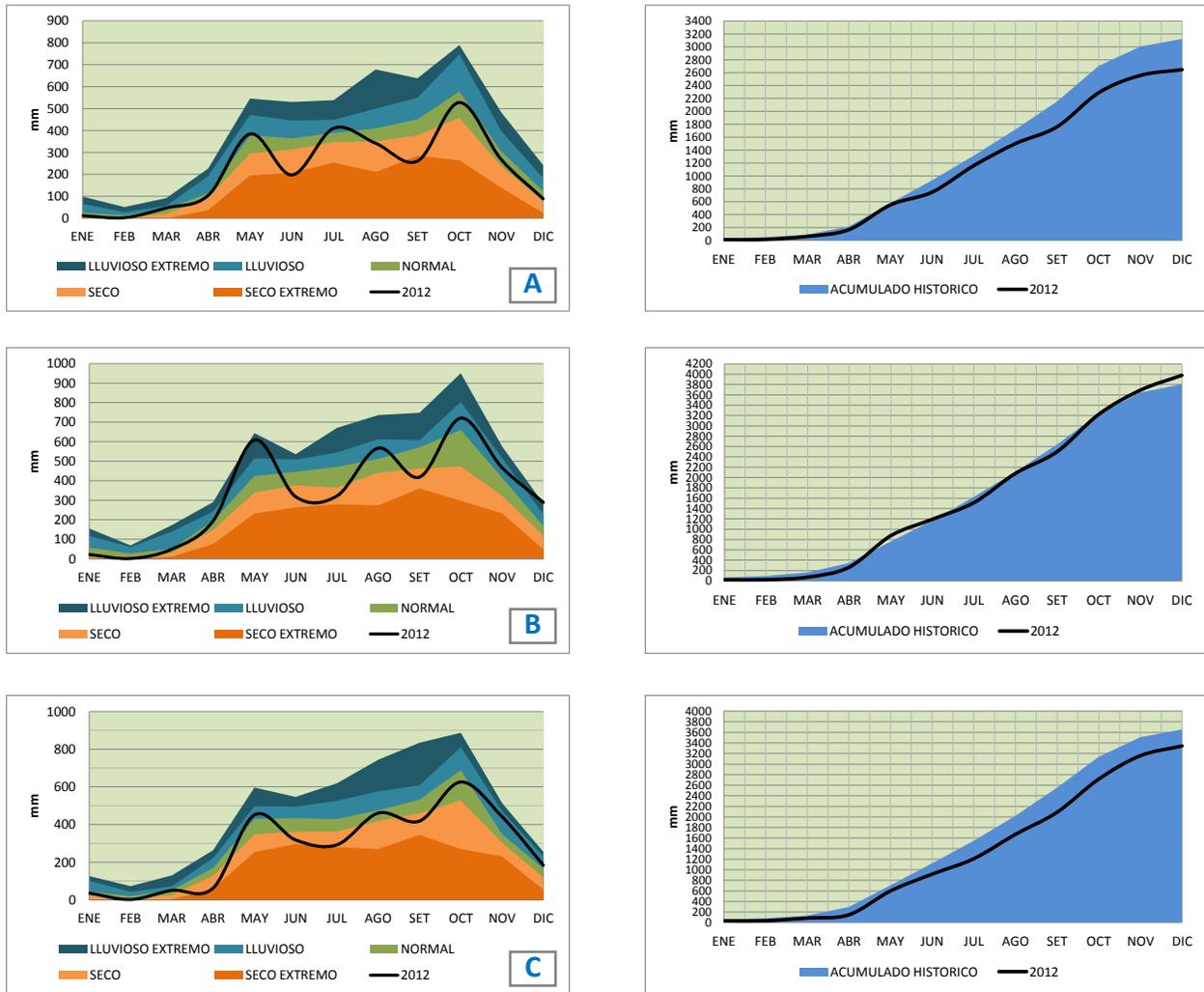


Figura 11. Precipitación mensual y acumulada durante el 2012, comparada con cinco escenarios climatológicos. Estación de Palo Seco (A), Anita (B), Damas (C). Pacífico Central.

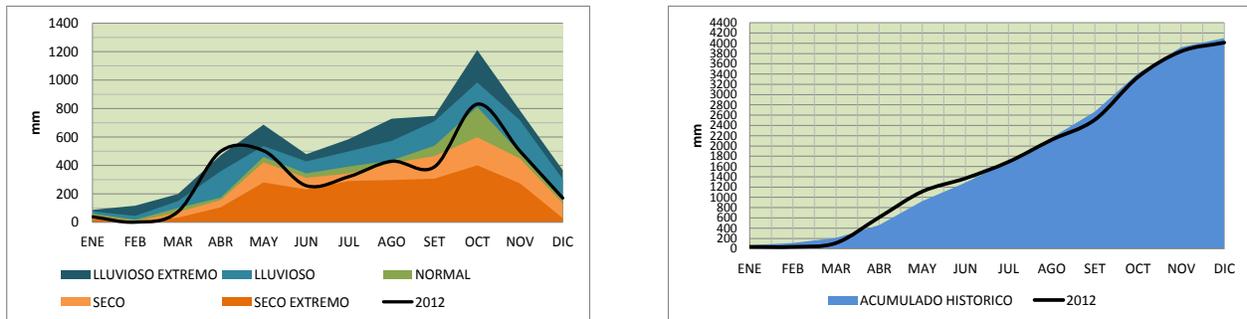


Figura 12. Precipitación mensual y acumulada durante el 2012, comparada con cinco escenarios climatológicos. Estación de Los Patios, Puerto Jiménez. Pacífico Sur.

4. Conclusiones

La sequía producto de El Niño se presentó en el Pacífico Norte y Región Central de Costa Rica. En el resto del país, se produjeron algunos meses consecutivos secos, pero que no pueden ser considerados como una sequía extensa. En el Caribe y la Zona Norte, se presentaron meses secos que no se pueden asociar al comportamiento normal de El Niño para esas áreas.

Pese a que la tormenta tropical Sandy aportó en octubre un acumulado de lluvia importante en la Región Central, este no fue suficiente para normalizar el acumulado de lluvia anual. Sin embargo, en el Pacífico Central y Sur Sandy contribuyó a provocar escenarios lluviosos mensuales y a normalizar el acumulado anual de lluvias en el Pacífico Sur.

5. Literatura citada

- Cuesta, M. (2012). *Sequía amenaza cantones de Guanacaste y el Valle Central*. El País. La Nación. Sep. 10.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2012a). Temporal del Pacífico por la Tormenta Tropical Sandy. *Boletín Meteorológico Mensual*. San José, Costa Rica. Octubre 2012. 36p.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2012b). Estado del fenómeno ENOS: disipación de El Niño. *Boletín Meteorológico Mensual*. San José, Costa Rica. Octubre 2012. 36p.
- Naranjo, J. (2012). Fuertes lluvias provocan hundimientos y caídas de material en diferentes carreteras del país. Telenoticias. Costa Rica. Documento recuperado de: www.Telenoticias7-Nacionales-Fuertes-lluvias-provocan-hundimientos-y-caída-de-materiales-en-diferentes-carreteras-del-país.mht
- Retana, J. y Villalobos, R. (2000). Caracterización pluviométrica de la fase cálida de ENOS en Costa Rica con base en probabilidades de ocurrencia de eventos en tres escenarios: seco, normal y lluvioso. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 7(2):117-124
- Retana, J. y Villalobos, R. (2003). Eventos meteorológicos extremos en Linda Vista, Valle del Guarco, Cartago. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 9(1):56-63
- Retana, J. (2010). *Precipitación mensual y anual durante el 2009 en las regiones climáticas de Costa Rica: estimación de impactos de eventos extremos*. Departamento de Climatología e Investigación Aplicada. Instituto Meteorológico Nacional. Nota Técnica 01. San José, Costa Rica. 5p.



Instituto Meteorológico Nacional

Sitios web:
www.imn.ac.cr
<http://cglobal.imn.ac.cr>

Teléfono: (506) 2222 5616

Apartado postal: 5583-1000
San José
Costa Rica

