

Universidad de Costa Rica
Vicerrectoría de Investigación
Fondo Concursable para Grupos de Investigación para el año 2019

Propuesta de Investigación

**La Corriente en Chorro del Caribe:
Observaciones, modelado multifísica, interacciones multiescala
e impacto regional**

(1 de marzo de 2019 a 31 de diciembre de 2023)

Investigador Principal: J. A. Amador ^(1,2)

**Investigadores Asociados: T. J. Maldonado⁽¹⁾, E. R. Rivera^(1,2), E. J. Alfaro^(1,2),
R. Castillo^(1,2), A. M. Durán^(1,2), M. Garbanzo^(1,2), H. G. Hidalgo^(1,2),
G. Mora^(1,2) y C. P. Vega^(1,2)**

**(1) Centro de Investigaciones Geofísicas y (2) Escuela de Física
Universidad de Costa Rica**

Junio de 2018

El desarrollo de un concepto científico, la evolución de una nueva idea o el hallazgo de un fenómeno en las ciencias básicas, es un proceso muy lento que recorre el difícil camino de la incredulidad al enfrentar sistemáticamente el método científico, para luego ser aceptado o rechazado como una realidad física por la comunidad científica mundial y por la sociedad.

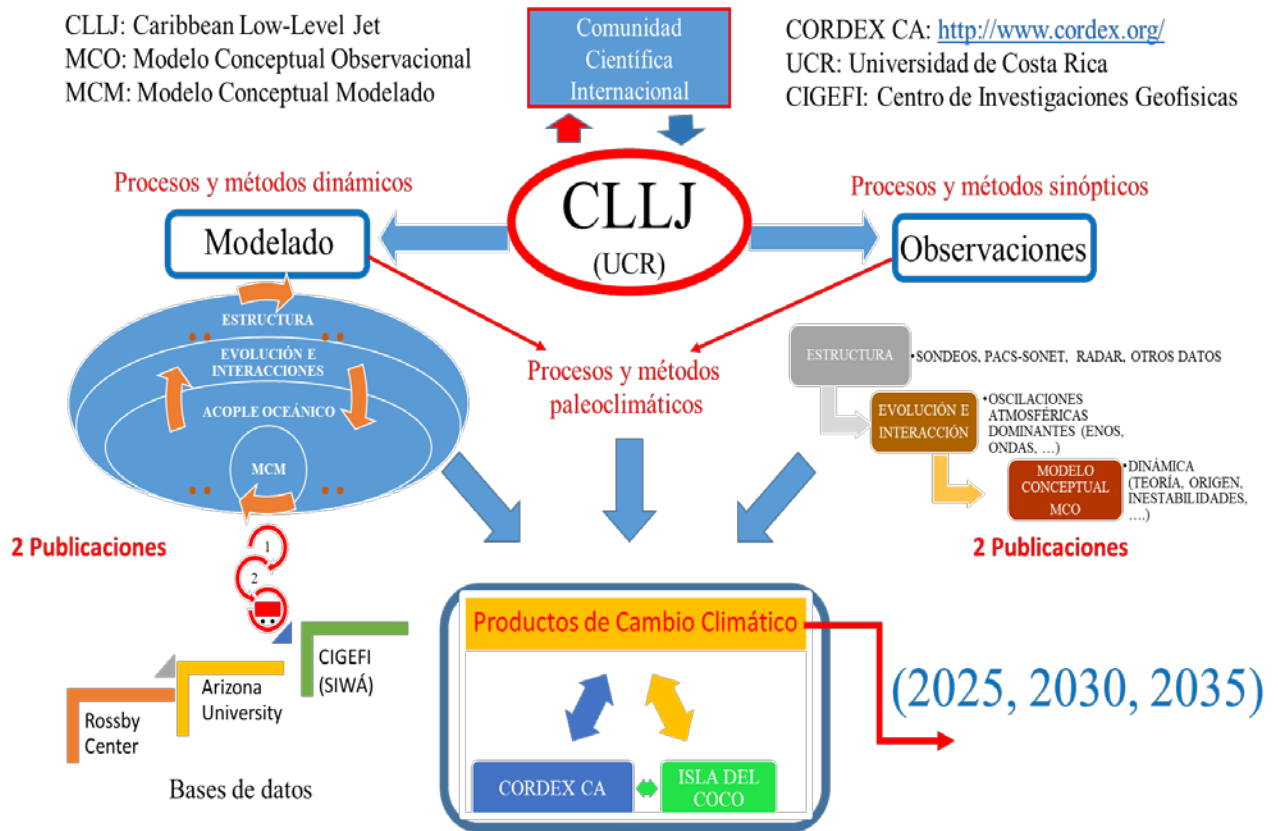
J. A. Amador

Resumen Ejecutivo

El tema central de la propuesta es el estudio de la Corriente en Chorro del Caribe (CLLJ por sus siglas en inglés). El CLLJ es uno de los mecanismos físicos más importantes para entender el clima, la variabilidad climática y el cambio climático en la región de los Mares Intra-Americanos desde su hallazgo en 1998. El descubrimiento de este fenómeno es atribuido por la comunidad científica internacional al Investigador Principal de esta iniciativa. El CLLJ está relacionado con mecanismos físicos regionales como las piscinas de agua cálida en el Pacífico tropical del este y el Caribe, el transporte de humedad a Centro, Norte y Sur América, la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ, por sus siglas en inglés), el veranillo de medio año y con la distribución regional de precipitación en toda la región, incluyendo la parte central-este de Norte América, entre otros. El grupo de investigadores asociado a esta propuesta ha realizado un aporte seminal al entendimiento de este fenómeno, al cual se han sumado importantes investigadores y centros de investigación a nivel global. A pesar del desarrollo conceptual, analítico, numérico y observacional realizado por estos investigadores, se está lejos de comprender muchas de sus características y el papel que juega el CLLJ en la estabilidad dinámica regional. Por esta razón, el objetivo principal de esta propuesta es generar un análisis completo e integral del CLLJ en varias escalas de movimiento para investigar su estructura media, su evolución e interacción con escalas de alta frecuencia como la interrelación tierra-atmósfera, la Oscilación de Madden-Julian, las escalas intraestacionales, las interanuales como el ENOS y el cambio climático. El fin último del proyecto es desarrollar un modelo conceptual del CLLJ y sus interacciones basado en observaciones *in situ*, datos de reanálisis y modelado numérico multifísica con el propósito de mejorar la respuesta social ante los fenómenos climáticos y eventos extremos. La propuesta tiene siete componentes con tareas y actividades específicas (cinco de ellas lideradas por científicos y científicas jóvenes), todas entrelazadas entre sí por ejes transversales de investigación y colaboración. Una de estas finalidades es entender el origen y estructura del CLLJ, los mecanismos que controlan su variabilidad espacial y temporal y sus interacciones con otros procesos físicos como el de la frecuencia de huracanes en el Caribe y Pacífico tropical del este, las sequías hidrometeorológicas, la ITCZ, las piscinas de agua cálida del Hemisferio Occidental, la variabilidad espacio-temporal de la distribución de las lluvias y los eventos extremos. Otro objetivo específico importante es la integración de los resultados de procedimientos novedosos (por ejemplo, el “hindcast” y el análisis de datos históricos *in situ* como los de SIWÁ (aire en

bribri, una base de datos meteorológicos en altura) para identificar la configuración óptima de algunos modelos numéricos dinámicos para la generación de escenarios de cambio climático a varios horizontes de tiempo futuros. Otra tarea específica es investigar el papel de la CLLJ en el transporte de propiedades (humedad, por ejemplo) en la activación de procesos turbulentos y de advección horizontal de propiedades en superficie (interacción mar-atmósfera) sobre el Mar Caribe y hacia América Central, en especial sobre Costa Rica (interacción tierra-atmósfera), su relevancia en los procesos convectivos y su interacción con sistemas locales como brisa de tierra-mar y valle-montaña. Otro propósito particular es cuantificar las propiedades del CLLJ sobre Costa Rica utilizando el radar del CIGEFI instalado en Guanacaste para comparar su estructura, evolución y alcance zonal y contrastar estas propiedades con las observadas sobre el Mar Caribe usando datos de SIWÁ y simulación numérica para integrar esta visión al modelo conceptual del CLLJ. Otro objetivo específico notable es el uso de la paleoclimatología (mediante un índice vinculado a la inversión de los alisios no estudiado hasta el momento en la región) utilizando datos históricos de perfiles de temperatura sobre la Cordillera de Talamanca, además de datos paleoglaciológicos para el estudio del clima pasado en esa región y su relación con el tipo de plantas a diferentes alturas. El estudio del CLLJ está basado en los principios y métodos del análisis sinóptico, de los modelos teóricos y numéricos (por ejemplo, modelación teórica y reducciones de escala dinámica), la estadística multiparamétrica, el análisis satelital y la percepción remota. Se planean varias publicaciones específicas para revistas indexadas, la postulación de un modelo conceptual cuatridimensional del CLLJ, la creación de bases de datos y la generación de escenarios climáticos dinámicos con resoluciones adecuadas para Costa Rica y la Isla del Coco para el 2025, 2030 y 2035. La formación profesional de varios estudiantes (en equidad de género) ligados a algunas de sus componentes será parte integral de la ejecución del proyecto y de su evaluación posterior. El grupo de investigación cuenta con recursos básicos de infraestructura para cursos, reuniones y talleres, con laboratorios computacionales, con instrumental meteorológico, con un radar y con el cluster “Tsaheva” (oscura en bribri) de alto rendimiento con alrededor de mil núcleos para procesamiento lineal y en paralelo de los modelos dinámicos e hidrológicos, entre otros elementos de investigación. El recurso humano es de muy alto nivel en dónde todos los investigadores tienen doctorados académicos de universidades de reconocido prestigio con amplia experiencia previa en investigación, en difusión y divulgación de resultados a nivel local e internacional (por ejemplo como para la creación de una aplicación de nivel social sobre clima y cambio climático regional).

Resumen Esquemático



Introducción

El tema central de esta propuesta es el estudio de la Corriente en Chorro del Caribe (CLLJ por sus siglas en inglés). El CLLJ (Amador 1998) es uno de los mecanismos físicos más importantes para entender el clima, la variabilidad climática y el cambio climático en la región de los Mares Intra-Americanos desde su hallazgo en 1998. El descubrimiento de este fenómeno es atribuido por la comunidad científica internacional al Investigador Principal (IP) de esta iniciativa.

Generalidades sobre el tema central y el Grupo de Investigadores Asociados

El Investigador Principal (IP) y el Grupo de Investigadores Asociados (GIA) proponen estudiar el CLLJ (Amador 1998; Amador y Magaña 1999; Amador *et al.* 2000; Amador *et al.* 2003; Amador *et al.* 2005, Amador *et al.* 2006; Amador 2008; Amador *et al.* 2010; Amador *et al.* 2016a, b, entre otras) mediante observaciones *in situ*, datos dinámicamente inicializados, modelado analítico y simulaciones numéricas multifísica para identificar las características de su estructura, su evolución multiescala y los potenciales impactos socio-económicos regionales de este importante mecanismo atmosférico ante diferentes escenarios climáticos. El estudio está basado en los principios y métodos del análisis sinóptico, de los modelos teóricos y numéricos (por ejemplo, modelación conceptual, reducciones de escala dinámica), la estadística multiparamétrica, el análisis satelital, la percepción remota y la paleoclimatología. El (GIA) está constituido por el PI y nueve Co-PIs, todos con doctorados académicos, que representan al Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI) y a la Escuela de Física de la Universidad de Costa Rica, con activos contactos científicos en universidades e instituciones de Asia, Europa y Norte y Sur América. Los científicos del proyecto trabajan a escala individual y colectivamente (ver Sección de Referencias) con teorías y/o tecnología de frontera en ramas como la climatología, la hidrología, los impactos socioeconómicos de los desastres naturales, la sinóptica, la física de los modelos numéricos, la paleoclimatología, la física de radares y satélites y las interacciones tierra-océano-atmósfera. La contribución más importante de esta propuesta es la integración de estas disciplinas científicas en el estudio de un fenómeno atmosférico de relevancia regional y global (el CLLJ), en la distribución de la lluvia, la hidrología del Istmo Centroamericano y la significancia socioeconómica que tiene como modulador de la generación de impactos hidrometeorológicos en la región. El GIA es el resultado de la formación académica colaborativa de la Universidad de Costa Rica y de Organismos Internacionales y Universidades de gran prestigio científico internacional.

Antecedentes del concepto del CLLJ

La investigación realizada por el Dr. Amador para obtener el grado de Ph. D. en Reading University, Reino Unido (Amador 1981), consistió en,

a) el estudio de la estructura tridimensional, la variabilidad temporal, el cálculo numérico del transporte de masa, momento angular y energía y de las circulaciones rotacionales y divergentes de los campos medios atmosféricos en los trópicos y

b) el análisis dinámico y estadístico, mediante la determinación de los balances de vorticidad y energía estática húmeda, de varios sistemas atmosféricos de evolución, usando en ambos casos, datos atmosféricos dinámicamente inicializados del GATE (**G**lobal **A**tmospheric **R**esearch **P**rogram **A**tlantic **T**ropical **E**xperiment) del periodo junio a setiembre de 1974 (ver por ejemplo, Sadler y Oda, 1978).

Uno de los resultados, un tanto sorprendente y no explicado totalmente en su trabajo doctoral, es el relativo al transporte meridional de propiedades (masa, momento y energía) en una de las regiones analizadas, la del oeste del Atlántico cerca del Mar Caribe. A pesar de las limitaciones observacionales de los datos del GATE utilizados en este trabajo doctoral y al hecho de que estos corresponden a la transición del verano boreal hacia una circulación invernal, el concepto clásico de la celda de Hadley, con flujo neto hacia el Ecuador en niveles bajos y movimiento meridional positivo en niveles altos de la atmósfera, no fue observado en la región cercana al Mar Caribe. En ese sector, el patrón dominante durante el periodo analizado mostró movimiento meridional positivo en niveles bajos (es decir, transporte de propiedades dinámicas y termodinámicas hacia el norte) con circulación de retorno hacia el Ecuador en niveles altos, en especial en el cinturón 10-20° N. Una celda de circulación “indirecta” en esta región del Caribe, aunque posible teóricamente, no había sido observada antes debido principalmente a la falta de datos atmosféricos integrados y dinámicamente balanceados, como los obtenidos para el GATE. Como se lee en las páginas 125-127 bajo la sección “7.2 New Results”, apartado (f) de la Tesis Doctoral (Amador 1981), el autor indicó que:

“the meridional wind field showed a Hadley type cell organization, except in the western Atlantic where a weak indirect cell appears to dominate. The existence of an indirect cell in that region is consistent with the idea of a jet exit over that area [Sadler and Oda 1978], a poleward flow and a poleward heat transfer in lower levels and equatorward flow above”.

También en la sección “7.3 Discussion”, página 130, el autor enfatiza que:

“Some of the features listed in 7.2 raise challenging questions, for instance the indirect cell found in the Western Atlantic. Further studies are needed to investigate its structure in more detail and the role played by such cells in low latitudes.”

Las citas anteriores postulaban la existencia de una corriente en chorro atmosférica que podría explicar, al menos parcialmente, el carácter indirecto (por contraste con la celda clásica de Hadley) de la circulación en el Mar Caribe y como consecuencia de esto, ser uno de los mecanismos físicos regionales responsables del transporte de propiedades como masa, humedad, momento y energía. Este concepto de la posible existencia de una corriente en chorro troposférica en la región del Caribe no fue reconocida entonces y esperó en la mente del IP de esta propuesta (expresado en la segunda cita arriba), tal vez de manera difusa y sin más fundamento científico que lo encontrado en su Tesis, por un periodo de alrededor de 15 años (desde 1981 hasta 1995, aproximadamente). La comunidad científica internacional, a juzgar por las publicaciones durante el periodo mencionado, nunca conoció o interpretó adecuadamente lo sugerido por Amador (1981), ni encontró de manera independiente, evidencia de este mecanismo de transporte y fuente de energía atmosférica.

Un nuevo impulso a la investigación en ciencias físicas se da a partir del desarrollo de los primeros modelos numéricos de la atmósfera en la década del 50, en especial en lo relativo a los modelos de circulación general (MCG), la mayor parte de estas representaciones matemáticas de la atmósfera, utilizaban diferentes tipos de sistemas de asimilación de datos, lo que dificultaba hasta cierto punto la comparación de simulaciones y experimentos pues no se poseía un único set de información para estudios de diagnóstico numérico. Con el objetivo de reducir o eliminar algunos de estos problemas, varios organismos científicos colaboraron para realizar un “re-análisis” que incluyera toda la información posible del dominio climático global con la característica de que se mantuviera el mismo esquema de asimilación de datos en el contexto de un sistema de modelado dinámico no cambiante durante todo el periodo de integración utilizado para obtener este set de datos (Kalnay et al. 1996). El re-análisis consistió inicialmente en un conjunto global de datos atmosféricos en superficie y a diferentes niveles en la vertical, tanto en la troposfera como en la estratosfera, dos veces al día y para múltiples variables físicas y

termodinámicas durante el periodo 1957-1996, los cuales eran producidos a una razón de un mes de re-análisis por cada día de ejecución en una supercomputadora Cray YMP/8.

Los primeros datos de este conjunto global de información atmosférica (Kalnay et al. 1996) fueron adquiridos por Jorge Amador por medio de una suscripción personal al *Bulletin of the American Meteorological Society* que los incluyó en un CD como parte de uno de sus números mensuales del boletín en 1996. Esta información fue utilizada por el IP para revisar la estructura de la atmósfera en la región del Golfo de México, Caribe, el Pacífico tropical del este y Centro América con el propósito de identificar características de la circulación que pudieran asociarse a la existencia de una corriente en chorro troposférica, en seguimiento a lo postulado en su trabajo doctoral. El análisis exhaustivo de estos primeros datos inicializados dinámicamente permitió, luego de un meticuloso examen de la estructura cuatri-dimensional de la atmósfera, la publicación de un trabajo en 1998 sobre una corriente muy fuerte de bajo nivel en los vientos alisios con un máximo de aproximadamente unos 12-13 m/s, alrededor de los 1000 m de altura sobre el nivel del mar (925 hPa), cerca de los 15° N y 75-85° W (Amador 1998, Figura 1). En este trabajo, se documentó que este máximo de la corriente en chorro se presenta durante el verano del hemisferio norte en el Caribe que atraviesa Centro América en el sentido este-oeste con una serie de características muy relevantes al clima, a las ondas en los “estes” y a la distribución de lluvia en la región. Además de la importancia científica, la existencia de esta corriente por su impacto en el tiempo y clima, tiene una implicación en los diferentes sectores económicos y sociales de la región. Parte de este fuerte flujo se desvía hacia el norte antes de entrar en Centro América y atraviesa la Península de Yucatán, el Golfo de México y se interna en las regiones planas de sur de Estados Unidos. Esta corriente se percibe normalmente como una intensificación de los vientos en gran parte de la región del sureste de México y Centro América durante los meses de junio a agosto. Después de una profunda revisión bibliográfica, el autor no encontró evidencia científica anterior a su publicación de 1998 de que esta fuerte corriente del este hubiera sido documentada y analizada dinámicamente como en el trabajo mencionado. Aunque algunas publicaciones anteriores, como las de la época de los 60's, se refieren a propiedades de transporte en la región del Caribe (por ejemplo, Hastenrath 1966), ninguna de ellas menciona la existencia de esta corriente.

Un aspecto a destacar, es que este trabajo de investigación fue publicado por razones económicas (debido a los altos costos de publicación internacionales en esa época) y de tiempo, en una revista científica nacional (*Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*,

<http://cglobal.imn.ac.cr/sites/default/files/documentos/revista/topicosmet19982/index.html>), con la única particularidad de que el idioma de publicación usado fue el inglés, con el objetivo de darle, en la medida de lo posible, una mayor divulgación entre la comunidad científica internacional.

Amador denominó a esta corriente “the Caribbean Low-Level Jet, CLLJ”, nombre que se ha seguido usando en la literatura científica al lado del de “Intra-Americas Low-Level Jet, IALLJ”, término de reciente introducción y utilizado por Amador en varias otras publicaciones (Amador et al. 2006, Amador 2008). Es relevante destacar también aquí, la contribución científica de la publicación de Amador (1998), al definir en ese trabajo una serie de propiedades y características dinámicas del CLLJ, algunas de ellas calculadas manualmente en ese entonces debido a la ausencia de una herramienta o “software” para realizarlo (Figura 1). Se demostró que el fluido en promedio cumplía la condición de que el gradiente de la vorticidad absoluta cambiaba de signo en la región del Caribe, es decir, era barotrópicamente inestable, lo que imponía las condiciones dinámicas necesarias pero no suficientes para el intercambio de energía cinética entre perturbaciones tropicales (ondas en los estes, por ejemplo) y el flujo medio. Este resultado permite proponer, al CLLJ, como una posible fuente de intensificación de las ondas, mediante la transferencia de energía cinética media del flujo a la perturbación, la cual podría llegar a convertirse en ciclón tropical en condiciones propicias. Algunas tesis doctorales en prestigiosas universidades de las Américas y Europa se inspiraron posteriormente en estos conceptos (por ejemplo, Muñoz et al. 2008).

La Figura 2 muestra una actualización de algunas propiedades del CLLJ del trabajo de Amador (2008) usando datos de Kalnay et al. (1996), publicación por la cual le fue otorgado el Premio Nacional de Ciencia Clodomiro Picado Twight en el 2008.

El CLLJ es un mecanismo de interacción muy importante con la superficie oceánica en el Mar Caribe; de esta relación se deriva entre otros aspectos el transporte de humedad y por ende de energía hacia otras regiones de los Mares Intra-Americanos. La Figura 3 muestra parte de la estructura de la corriente al nivel de 10 m sobre el Mar Caribe y regiones vecinas.

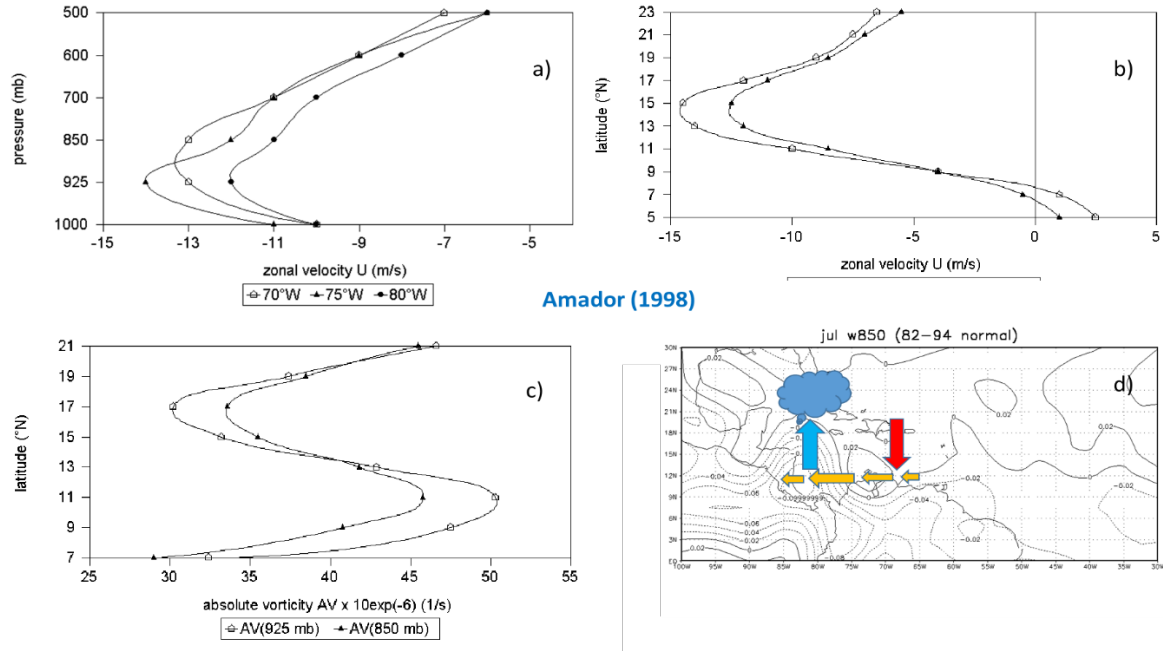


Figura 1. La Corriente en Chorro del Caribe (CLLJ por sus siglas en inglés), a) perfil vertical de la componente zonal U ($m s^{-1}$), b) perfil meridional de U ($m s^{-1}$), c) perfil meridional de la vorticidad absoluta ($10^{-6} s^{-1}$) y d) primer modelo conceptual del CLLJ, para el periodo 1982-1994 (Amador 1998).

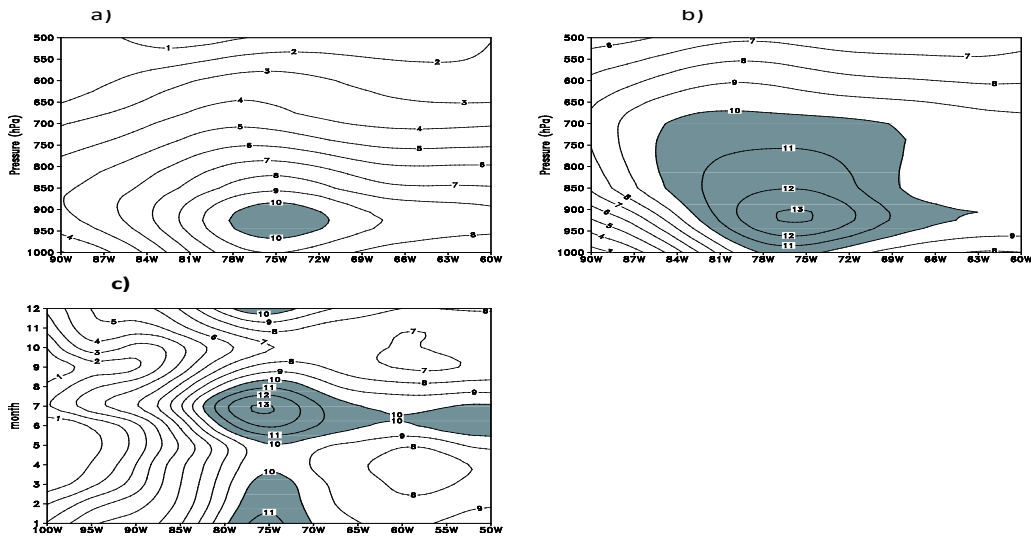


Figura 2. Perfil vertical del viento medio mensual ($m s^{-1}$) para a) febrero, b) julio y c) corte transversal (mes-longitud W) del flujo medio mensual (ms^{-1}). En todos los casos el viento fue promediado entre 12.5 y $17.5^{\circ}N$, usando datos de reanálisis (Kalnay et al, 1996) para el periodo 1958-1999 (Amador 2008).

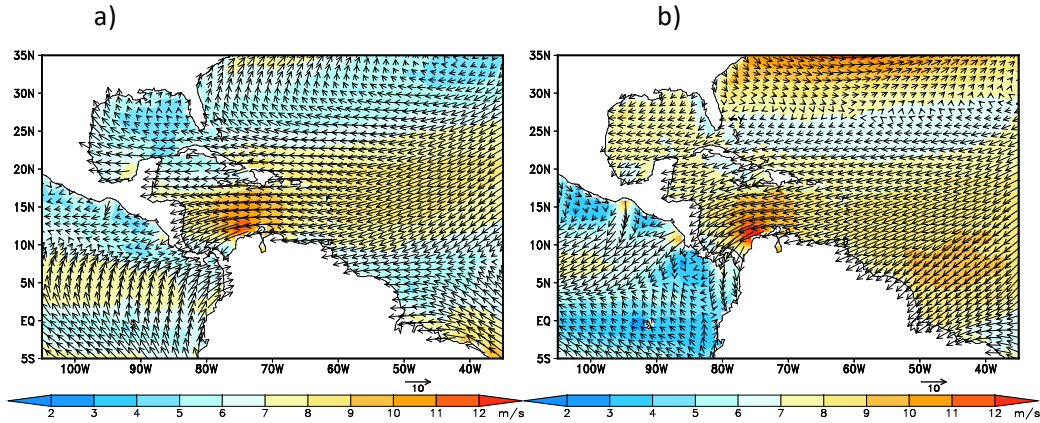


Figure 3. Vientos medios del QuikScat (m s^{-1}) a 10 m de altura sobre la superficie del mar para a) julio y b) febrero para el periodo 2000-2007 (Amador 2008).

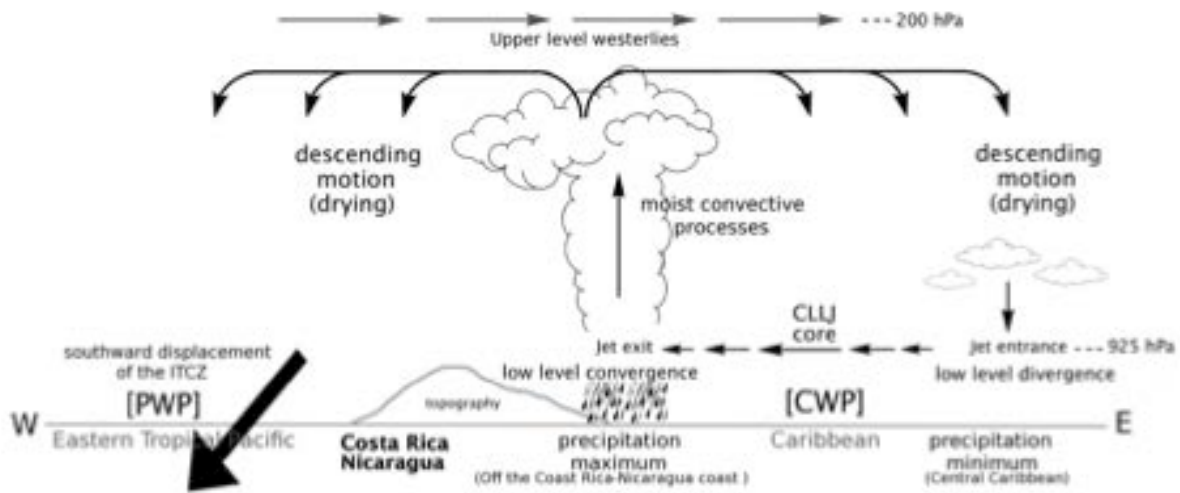


Figure 4. Modelo conceptual de las interacciones de la Corriente en Chorro del Caribe con los procesos dinámicos del esta región, el Pacífico tropical del este y la Zona de convergencia Intertropical (Hidalgo et al. 2015).

Una muestra de la interacción entre los investigadores del grupo proponente es el trabajo de Hidalgo et al. (2015), en que se postula un modelo conceptual (Figura 4), basado en las investigaciones realizadas en los últimos años sobre el CLLJ, en donde se integran las interacciones de los procesos físicos conocidos de la región Caribe con las del Pacífico tropical del este y la ITCZ.

Otros trabajos sobre el CLLJ, su evolución y participación del GIA en estos estudios se encuentran en el Apéndice 1 de esta propuesta.

Estructura de la investigación

Esta propuesta ha sido dividida en siete módulos o componentes, cada una de ellas con un claro objetivo específico liderada por un especialista en su campo (se estimula un balance de género entre los líderes, en concordancia con los lineamientos que sobre este eje promueve la Universidad de Costa Rica), cubriendo diferentes preguntas científicas del CLLJ, utilizando métodos distintos y formas diferentes de plantear los problemas, integrados todos en el estudio de esta corriente, su origen, estructura, interacciones y el desarrollo de un modelo conceptual. Cada una de las componentes de investigación se describe en detalle más adelante, indicando cuál es el (la) investigador(a) responsable de su ejecución en conjunto con otros investigador(a)s del GIA. En cada componente se indica claramente el objetivo específico que se persigue, los antecedentes del problema y la participación de miembros del GIA, los datos a utilizar, los métodos especiales, las metas y los productos potenciales de lo que sería su quehacer investigativo, las sinergias entre componentes (ver diagrama de sinergias más adelante), la formación de profesionales y los impactos sociales del trabajo. En caso de ser aprobada la propuesta, una manera de evaluar el progreso del proyecto sería por el número de metas conseguidas en cada una de las componentes. A pesar de eso, para una mejor comprensión integral de la propuesta, se describen brevemente a continuación los alcances de esta investigación para el periodo de vigencia propuesta de alrededor de cinco años (1 de marzo 2019 al 31 de diciembre 2023).

Objetivos específicos

El objetivo principal es generar estudios en varias escalas de movimiento del CLLJ para investigar su estructura media, su evolución e interacción con escalas de alta frecuencia como la interacción diurna tierra-atmósfera, la Oscilación de Madden-Julian, las escalas intraestacionales, las interanuales como el ENOS y el cambio climático, con el fin último de desarrollar un modelo conceptual del CLLJ y sus interacciones basado en observaciones *in situ*, datos de reanálisis y modelado numérico multifísica.

Otra finalidad de este proyecto es entender el origen y estructura del CLLJ, los mecanismos que controlan su variabilidad espacial y temporal y sus interacciones con otros procesos físicos

como es el caso de los huracanes en el Caribe y Pacífico tropical del este, las sequías hidrometeorológicas, la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ, por sus siglas en inglés), las piscinas de agua cálida del Hemisferio Occidental, la variabilidad espacio-temporal de la distribución de las lluvias y los eventos extremos.

Otro objetivo importante de este proyecto es la integración de los resultados de los estudios mencionados (por ejemplo, el hindcast y el análisis de datos históricos *in situ* como los de SIWÁ) con la paleoclimatología para establecer un modelo conceptual del CLLJ y su relación con períodos pasados de cambio climático regional y su potencial uso en el problema del cambio climático presente.

Un objetivo adicional es estudiar el papel del CLLJ en el transporte de propiedades (humedad, por ejemplo) en la activación de procesos turbulentos y de advección horizontal de propiedades en superficie (interacción mar-atmósfera) sobre el Mar Caribe y hacia América Central, en especial sobre Costa Rica (interacción tierra-atmósfera), para forzar procesos convectivos y su interacción con sistemas locales como brisa de tierra-mar y valle-montaña.

Otro importante propósito de esta propuesta es cuantificar las propiedades del CLLJ sobre Costa Rica utilizando el Radar del CIGEFI instalado en Guanacaste para contrastar su estructura, evolución y alcance zonal y comparar estas propiedades con las observadas sobre el Mar Caribe usando datos de SIWÁ y simulación numérica para integrar esta visión al modelo conceptual del CLLJ.

Métodos y técnicas generales

Para alcanzar los objetivos mencionados arriba es necesario usar varias técnicas y métodos muy bien establecidos científicamente a la fecha, como el análisis sinóptico y las reducciones de escala dinámica y estadística, además de otras herramientas más recientes y prometedoras como el “hindcast” y la multifísica, es decir, la perturbación de esquemas de parametrización de capa límite y convección, entre otras. Este sería el primer estudio comprensivo del CLLJ en la región de los Mares Intra-Americanos (Amador, 2008) y a nivel global. Un producto tangible de este proyecto será el completo desarrollo de algunas bases de datos, entre ellas el de la base de datos de radiosondeos regional SIWÁ (aire en bribri), iniciada en el CIGEFI hace alrededor de 10 años.

Componentes de la Propuesta
La Corriente en Chorro del Caribe:
Observaciones, modelado multifísica, interacciones multiescala
e impacto regional

Primera Componente

Teoría, observaciones y modelado numérico del CLLJ

R. Rivera, J. Amador, T. Maldonado y R. Castillo

(Rivera *et al.* 2018)

Antecedentes

La corriente en chorro del Caribe (CLLJ por sus siglas en inglés) juega un papel determinante como modulador de la actividad convectiva y ciclogénica sobre el Mar Caribe (Amador 1998, 1999, 2000, 2008, Amador *et al.* 2003, Amador *et al.* 2005, Amador *et al.* 2006, Amador *et al.* 2010, Amador *et al.* 2016a, b), ya que su principal efecto es controlar la cortante vertical del viento y es a la vez un mecanismo esencial para el transporte de humedad en esta región (Durán-Quesada *et al.* 2010). Estudios como los de Wang (2007) y Muñoz *et al.* (2008), entre otros, han relacionado la estructura vertical de esta corriente principalmente con un mecanismo de respuesta producido por el acople entre el bajo nivel atmosférico y la superficie del mar. Wang (2007) se basa en un modelo conceptual presentado primero por Magaña *et al.* (1999), en el cual el gradiente meridional de temperatura superficial del mar, es capaz de producir un diferencial de presión y propone que es éste último lo que causa la aceleración del CLLJ en el invierno y el verano boreal. Muñoz *et al.* (2008) sugieren que la cortante horizontal del viento es producida básicamente por el efecto embudo debido a la presencia de montañas al norte de Suramérica (Colombia) y en República Dominicana. Por otra parte, Maldonado *et al.* (2017a) revisaron recientemente las teorías propuestas hasta la fecha para explicar varias características del CLLJ utilizando modelos de circulación general. Maldonado *et al.* (2017a) proponen diferentes mecanismos dinámicos como controladores de su estructura. Por ejemplo las fuerzas de fricción en capa límite serían las responsables, por medio de flujos transisobáricos, de mantener el balance de fuerzas y por lo tanto generar la cortante vertical observada. Por otra parte, la cortante horizontal del chorro cumple las condiciones de inestabilidad barotrópica sobre el Mar Caribe (Amador 1998), lo que puede permitir interacción entre el CLLJ y perturbaciones tropicales.

Justificación

Los estudios anteriores presentan una visión parcial del CLLJ puesto que se ha carecido en general de observaciones *in situ* (excepto por el trabajo de Amador 2008) y los estudios se han

limitado a utilizar datos de reanálisis (Wang 2007; Muñoz *et al.* 2008; Herrera *et al.* 2015). Además, hasta el momento, las investigaciones sobre esta corriente se han restringido únicamente a la estructura dinámica, no incluyendo la componente termodinámica, elemento fundamental en los procesos convectivos. Por tanto, en este proyecto se propone estudiar los aspectos dinámicos y termodinámicos asociados con la estructura vertical y horizontal del CLLJ por medio de observaciones de radiosondeos (base de datos SIWÁ; aire en *cabécar*), reanálisis (lo cual se complementa con la Segunda Componente de esta propuesta de Mora *et al.* 2018) y con resultados de experimentos numéricos con modelos globales (por ejemplo, ERA-Interim, EC-EARTH) o modelos regionales (por ejemplo, RegCM, WRF). Estos últimos emplearían las configuraciones físicas que resulten de la Tercera Componente (Castillo *et al.* 2018) de esta propuesta. Los resultados obtenidos por esta componente tendrían proyección en la explicación de eventos climáticos estacionales como la entrada y salida de la estación lluviosa en América Central y el Caribe (por ejemplo, Maldonado *et al.* 2016), así como también del veranillo (Magaña *et al.* 1999), lo cual contribuiría con el desarrollo de las actividades propuestas en la Sexta Componente (Hidalgo y Alfaro 2018). Además, es indispensable identificar las potenciales fuentes de variabilidad interanual e intraestacional asociadas a estas características con el fin de establecer posibles esquemas predictivos de estos aspectos para la generación de escenarios futuros de clima.

Objetivo específico

Generar un modelo conceptual del CLLJ basado en observaciones, modelado numérico multifísica para algunas interacciones multiescala.

Datos y Métodos

Con base en el modelo conceptual ya elaborado por el grupo (Hidalgo *et al.* 2015) se propone validar y mejorar la interpretación física de las componentes de dicho modelo. Para ello se estudiará con mayor detalle la interacción entre la capa límite atmosférica, la superficie oceánica y terrestre (Cuarta Componente, Durán-Quesada *et al.* 2018), además de las características de esta corriente en niveles bajos a su paso por Costa Rica mediante el uso de datos de radar y satélite (Quinta Componente, Garbanzo *et al.* 2018). Se utilizarán procedimientos que usen datos de radiosondeos, productos de reanálisis y de modelos numéricos para estudiar la estructura vertical y horizontal, origen y debilitamiento del CLLJ durante el invierno y el verano boreal (los picos

máximos del CLLJ). La base de datos de radiosondeos SIWÁ es una compilación de información atmosférica de altura hecha por el CIGEFI y se compone de un total de más de 40 estaciones, algunas con periodos de cobertura de aproximadamente entre 40 a 70 años (1940-2016). Sería la primera vez que se utilice esta base de datos en estudios de este tipo.

Los resultados de las observaciones serán comparadas con datos del reanálisis ERA-Interim. Nótese que este reanálisis tiene una cobertura temporal menor (aproximadamente 30 años) y una resolución horizontal de unos 80 km. Además, se realizarán simulaciones con modelos numéricos regionales para corroborar las teorías que se deriven de esta propuesta. Para este punto están disponibles datos de modelos numéricos regionales usando representaciones de la convección de forma explícita con resoluciones del orden de 30 km, proporcionados a esta componente por investigadores de la Universidad de Arizona y otra base de resultados a la cual tiene acceso el CIGEFI de modelos numéricos globales del Rossby Center del Servicio Meteorológico e Hidrológico de Suecia.

Con respecto a la parte de modelado, se usarán métodos de multifísica para identificar las parametrizaciones de capa límite y cúmulus que mejor se ajusten a los datos de radiosondeos y reanálisis, de manera que estos productos permitan extender el modelo conceptual bidimensional del CLLJ a uno cuatridimensional. Los resultados de estas simulaciones se usarán para generar las proyecciones de cambio climático regional en escalas del orden de los 10 km, en especial para Costa Rica, a horizontes de tiempo al 2025, 2030 y 2035. Estas proyecciones permitirían investigar a escalas de resolución más finas los efectos de clima sobre la Isla del Coco, Patrimonio de la Humanidad, para los mismos periodos futuros anteriores.

Metas

- Cálculo de una climatología regional de la estructura vertical del CLLJ utilizando los radiosondeos de la base de datos SIWÁ.
- Estimación de cambios potenciales en los últimos 40-70 años de la estructura del CLLJ utilizando las observaciones de SIWÁ y su impacto en variables climáticas como precipitación en América Central.
- Establecimiento de una relación entre la parte dinámica y termodinámica de esta corriente por medio de observaciones (SIWÁ) y experimentos numéricos con modelos globales o regionales (RegCM, WRF).

- Transferencia de datos de SIWÄ a la Séptima Componente (Vega *et al.* 2018) para el cálculo del índice de intensidad de la capa de inversión (ICI).

Productos

- Índice para describir la intensidad y estructura del CLLJ a partir de observaciones *in situ* (SIWÁ).
- Identificación de los moduladores de gran escala asociados a la variabilidad del CLLJ.
- Modelo conceptual cuatridimensional que explique la estructura dinámica y termodinámica del CLLJ a partir de observaciones y modelos numéricos.
- Proyecciones de cambio climático al 2025, 2030, 2035 para Costa Rica e Isla del Coco.
- Tesis de Licenciatura o Maestría de al menos 3 estudiantes (Natali Mora Sandí carné A53709, Dayanna Arce Fernández carné B10509, Carlos Madrigal Araya carné B33905).
- Herramienta o aplicación de difusión social sobre el clima y cambio climático regional a partir de los resultados obtenidos.
- Al menos una publicación en revista indexada.

Cronograma

Actividades	2019			2020			2021			2022			2023		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Compilación y control de calidad de datos															
Análisis climatológico del CLLJ															
Estimación de la variación temporal del CLLJ y su impacto en la precipitación															
Modelo conceptual de la dinámica y termodinámica del CLLJ															
Experimentos numéricos del CLLJ															
Elaboración de publicación															

Períodos: 1: Enero – Abril, 2: Mayo – Agosto, 3: Septiembre – Diciembre

Segunda Componente

Estudio del comportamiento dinámico de algunos parámetros del CLLJ

G. Mora, J. A. Amador y E. Rivera

(Mora *et al.* 2018)

Antecedentes

Se ha estudiado la climatología mensual y estacional del CLLJ (Amador, 1998, Muñoz *et al.* 2008) tanto su componente de viento horizontal como su variación estacional con la altura (Mora, 2017). Así mismo, se han estudiado sus posibles causas (Amador *et al.* 2016a, b; Maldonado *et al.* 2017a) y su papel en el transporte de humedad hacia el continente (Andrade y Barton 2009; Durán-Quesada *et al.* 2010; Hidalgo *et al.* 2015). Adicionalmente Maldonado *et al.* (2016) construyeron un índice de anomalías de viento zonal en 925 mb correspondientes al invierno boreal para estudiar la relación del CLLJ con los principales modos de variabilidad climática y encontraron que la mayor correlación se da con los eventos de ENOS (El Niño-Oscilación del Sur), modulando las anomalías de presión superficial (SLPa, por sus siglas en inglés) a nivel del mar entre la costa este de Estados Unidos y la posición de la baja presión de las Aleutianas, cerca del Golfo de Alaska, e influyendo esto en las anomalías del CLLJ. Cuando ENOS y la PDO (siglas en inglés de la Oscilación Decenal del Pacífico) están en fase se intensifican las SLPa, y ésto modula la intensidad del chorro, lo cual produce cambios en la distribución espacial de precipitación.

Otras corrientes en chorro en el mundo se han estudiado a partir del análisis en varios niveles verticales de algunas variables atmosféricas básicas (Cook, 1999) y se han encontrado aspectos relevantes para la región en estudio e interacción con fenómenos de mesoescala. El estudio de la estructura cuatridimensional de una fuerte corriente en chorro como la del CLLJ es necesario para entender mejor su interacción con el tiempo y clima tanto a nivel mesoescalar como regional.

Justificación:

Con la incorporación de datos de reanálisis de ERA-Interim, se pretende observar mejor algunos patrones como la variación espacial y temporal inducida por el CLLJ en los campos de presión, viento, cortante vertical del viento, humedad, vorticidad potencial y temperatura

potencial. Lo anterior se podría comparar con datos de radiosondeos de SIWÄ para validar el desempeño de la interpolación de los datos de ERA-Interim. Debido a que esta corriente es relevante para nuestra región tropical y algunas regiones subtropicales, gracias a su contribución al transporte de la humedad desde el Mar Caribe (Amador *et al.* 2006; Vera *et al.* 2006; Amador, 2008; Durán-Quesada *et al.* 2010; Gimeno *et al.* 2016) y afecta la distribución de precipitación durante los meses de verano boreal (Magaña *et al.* 1999; Amador *et al.* 2006; Amador 2008) es necesario un análisis dinámico en esa área; para ello se deben considerar algunas variables tales como movimiento vertical, cortante vertical, divergencia y vorticidad en las regiones de entrada y salida, región norte y sur del chorro, así como la deformación producida en el fluido debido a procesos de cortante vertical del viento. Los alcances de esta componente están relacionados con el trabajo a realizar por la Primera Componente de la propuesta (Rivera *et al.* 2018). Se pretende entonces responder a las siguientes interrogantes: ¿Qué mecanismo produce el gradiente de vorticidad absoluta sobre el Mar Caribe? ¿Es la conservación de vorticidad potencial la responsable de la inclinación y levantamiento del núcleo de esta corriente al pasar del Caribe al Pacífico tropical del este, como fue observado en el trabajo de Amador (2008)?

Objetivo Específico

Estudiar el comportamiento dinámico del CLLJ en las regiones de entrada y salida, mediante la obtención y análisis de campos como los de vorticidad, divergencia (en especial la del flujo de humedad), cortante vertical y horizontal de viento en niveles bajos de la troposfera.

Datos y Métodos

Para este proyecto se usarán los datos de SIWÄ y los de reanálisis de ERA-Interim, en particular, con resolución espacial de 80 km. La resolución temporal es de cada 6 horas y el dominio de estudio comprende la región de CORDEX que comprende América Central. Los niveles verticales están disponibles cada 25 hPa desde 1000 hasta 750 hPa y cada 50 hPa desde 750 hasta 250 hPa. Las variables a obtener son: viento zonal y meridional, divergencia, vorticidad relativa, vorticidad potencial, altura geopotencial, humedad específica y velocidad vertical.

Se desea estudiar la variación espacial y temporal del CLLJ realizando cortes zonales y meridionales que permitan observar la estructura cuatridimensional en la región central y circundante del CLLJ, tanto en términos de viento horizontal, como de vorticidad absoluta y

potencial, divergencia (incluyendo la del flujo de humedad), altura geopotencial, humedad específica y velocidad vertical. Esta representación transversal podría fortalecer el conocimiento de los mecanismos de transporte de humedad hacia el continente y cómo afecta a la ITCZ cercana al continente americano, en consistencia con la investigación descrita en la Sexta Componente (Hidalgo y Alfaro 2018).

Se calcularán estadísticos mensuales de todas las variables anteriores en diferentes niveles verticales para algunos puntos específicos en la región de estudio, agrupando esta climatología en función de las fases de ENOS. Lo anterior tiene como objetivo identificar una posible inclinación estacional del centro del chorro, con la altura, latitud y las fases del ENOS.

Metas

- Generación de representaciones gráficas de cortes zonales y meridionales de las variables mencionadas para comprender mejor la estructura cuatridimensional del CLLJ.
- Identificación de los patrones de variabilidad de la estructura cuatridimensional del CLLJ en función del ENOS.

Productos

- Generar una climatología de las estructuras de los campos de vorticidad, divergencia (en especial la del flujo de humedad), cortante vertical y horizontal de viento en niveles bajos de la troposfera.
- Publicación de un artículo en el cual se presenten los resultados más importantes de esta componente.

Cronograma

Actividades	2019			2020			2021			2022			2023		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Obtención y preparación de datos para el dominio CA de CORDEX															
Preparación de cortes zonales y meridionales mensuales de viento zonal, meridional, divergencia, vorticidad relativa, vorticidad potencial, altura geopotencial,															

humedad específica y velocidad vertical																	
Análisis y discusiones grupales de resultados																	
Elaboración y envío de manuscrito para publicación y divulgación de resultados																	

Períodos: 1: Enero – Abril, 2: Mayo – Agosto, 3: Septiembre – Diciembre

Tercera Componente

Caracterización de la estructura del CLLJ a partir del modelado numérico por sistemas de predicción por conjuntos de multifísica

R. Castillo, J. A. Amador, T. Maldonado, E. Rivera y A. M. Durán-Quesada

(Castillo et al 2018)

Antecedentes

En la actualidad el uso de los Sistemas de Predicción por Conjuntos de Multifísica (Multi-Physics EPS, por sus siglas en inglés), ha experimentado un importante auge como herramienta para el análisis meteorológico debido a su potencial utilización en pronóstico a varios horizontes de tiempo. Algunos ejemplos de su aplicación en diferentes regiones del globo son los trabajos de Di Luca *et al.* (2014) para el Mar Mediterráneo, Evans *et al.* (2012) para el sureste Australiano, Klein *et al.* (2015) para el oeste Africano y Stegehuis *et al.* (2015) para Europa. Asimismo el Multi-Physics EPS se ha utilizado para realizar diagnóstico retrospectivo, más conocido como “hindcast”, el cual es de suma importancia para la evaluación de los modelos de pronóstico y muy importante para el análisis de eventos extremos (Kim *et al.* 2012). Un par de ejemplos de este tipo de análisis es el realizado por Katragkou *et al.* (2015) para el clima regional sobre la región CORDEX de Europa y el de Yuan *et al.* (2012) para la precipitación estacional de invierno de China para un periodo de análisis de 1982 - 2008.

Justificación

En la región de América Central y el Caribe, los estudios que se han realizado utilizando esta técnica dinámico-probabilística han sido escasos. Por tal motivo, esta componente del proyecto tiene como meta implementar los métodos dinámicos y estadísticos para su aplicación a estudios regionales, en especial los de eventos extremos en América Central, los cuales han sido asociados al CLLJ (Wang y Lee 2007). En el contexto del modelado numérico de la estructura del CLLJ a través del Multi-Physics EPS es pertinente plantearse algunas preguntas científicas como: ¿Mejora el Multi-Physics EPS el análisis meteorológico de la región de América Central y el Caribe? ¿Cuáles son las configuraciones óptimas de multifísica que representan mejor el CLLJ? ¿Cuáles son las mejores configuraciones de multifísica para simular de manera razonable la potencial influencia del CLLJ en eventos extremos regionales como es el caso de los ciclones

tropicales? Estas consideraciones fortalecen los trabajos de investigación propuestos en la Primera (Rivera *et al.* 2018), Segunda (Mora *et al.* 2018), Sexta (Hidalgo y Alfaro 2018) y Séptima (Vega *et al.* 2018) Componentes.

Objetivo Específico

Generar experimentos de modelado de precipitación y campos de viento de bajo nivel troposférico, que permitan evaluar el Multi-Physics EPS para la caracterización de la estructura del CLLJ en la región CORDEX de América Central.

Datos y Métodos

En esta componente de investigación se usarán, para inicializar los modelos, condiciones de frontera basadas en los datos de ERA-Interim, los cuales tienen una resolución espacial de $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ (latitud, longitud) y una cobertura temporal desde 1979 hasta la actualidad (Dee *et al.* 2011). Como modelo de área limitada se propone utilizar el “Weather Research and Forecasting” (WRF, Skamarock *et al.* 2005), el cual es desarrollado principalmente por el “National Center for Atmospheric Research” (NCAR, por sus siglas en inglés). Para comparación de resultados en algunas escalas de movimiento, como la climática a corto y mediano plazo, se propone además realizar experimentación con el “Regional Climate Model system” (RegCM, Giorgi *et al.* 1993a, b), creado por el “International Centre for Theoretical Physics” (ICTP, por sus siglas en inglés). El personal a cargo de esta componente tiene amplia experiencia en el manejo del WRF y del RegCM y en la aplicación de las bases de datos de los modelos mencionados.

Metas

- Colaboración con al menos un trabajo final de graduación.
- Incorporación de al menos dos trabajos finales del curso FS0624 Laboratorio Avanzado II de las carreras de Bachillerato en Física y Bachillerato en Meteorología.
- Transferencia de la configuración idónea de los modelos numéricos regionales para el estudio del CLLJ y su estructura cuatridimensional a la Primera (Rivera *et al.* 2018), Segunda (Mora *et al.* 2018), Sexta (Hidalgo y Alfaro 2018) y Séptima (Vega *et al.* 2018) Componentes.

Productos

- Elaboración de una guía esquemática para el uso del Sistema de Predicción por Conjuntos que brinde los mejores resultados en la caracterización del CLLJ en la región de América Central y el Caribe.
- Publicar en revista indexada al menos un trabajo con los resultados obtenidos.

Cronograma

Actividades	2019			2020			2021			2022			2023		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Preparación y ejecución de Experimentos CORDEX		■	■	■	■	■	■	■	■						
Preparación y ejecución de scripts EPS				■	■	■	■								
Preparación de scripts Post-Processing Análisis y control de calidad de datos					■	■	■	■							
Caracterización de configuraciones de multifísica y validación con datos observados y modelados					■	■	■	■	■	■	■				
Preparación de artículos											■	■	■	■	■

Períodos: 1: Enero – Abril, 2: Mayo – Agosto, 3: Septiembre – Diciembre

Cuarta Componente

Procesos dominantes en el acople entre la superficie y la atmósfera en las regiones tropicales.

**A. M. Durán-Quesada, M. Garbanzo y J. A. Amador
(Durán-Quesada *et al.* 2018)**

Antecedentes

El estudio de la distribución de precipitación en la región se ha caracterizado por un sesgo hacia procesos de gran escala así como el uso de productos de reanálisis, que en muchos casos no poseen la información o calidad para representar características locales debido a su baja resolución espacial. Se ha destacado la importancia del CLLJ para la modulación regional de lluvia en términos de su vinculación con el transporte de humedad (Durán-Quesada *et al.* 2017), el Mid-Summer Drought (MSD, Magaña *et al.* 1999) y su relación con la ITCZ (Hidalgo *et al.* 2015). Sin embargo, a pesar de que desde el inicio de los estudios del CLLJ se hizo hincapié en el carácter barotrópico del campo básico (Amador 1998), esta característica ha sido poco explotada en el estudio de la estructura y cómo esta corriente interactúa con la superficie continental. Hidalgo *et al.* (2015) destacan la relación entre la intensidad del CLLJ y la posición del centro de masa de la ITCZ, sin embargo, no define un mecanismo completo que pueda describir cómo la estructura del CLLJ interactúa con la ITCZ.

Una hipótesis a evaluar mediante la investigación propuesta en esta componente es que esta interacción se da mediante un proceso de transferencia de energía, en el que la interacción entre el CLLJ y la superficie terrestre genera una inestabilidad que tiene la capacidad de crecer a través de un mecanismo transportador como una perturbación tropical. De esta manera, la perturbación que se genera sobre el territorio del sur de América Central, viaja hacia el sector Pacífico en donde contribuye a aumentar el potencial convectivo, modulando la actividad de la ITCZ. La capacidad de interacción entre la ITCZ, el viento zonal y las ondas del Este ha sido ampliamente documentada para la región (por ejemplo, Farfán y Zehnder 1997; Zehnder *et al.* 2000). Dichos estudios han propuesto la formación de corrientes barotrópicamente inestables que generan vorticidad al interactuar con la topografía y se propagan en la dirección oeste. En este proceso, de acuerdo con los resultados de los estudios mencionados, la propagación de la perturbación hacia el oeste se asocia con el desplazamiento hacia el norte de la ITCZ. Nuevamente,

esta interacción es explicada desde la perspectiva de los procesos de gran escala, por lo que se hace necesario comprender la forma en que la interacción entre el CLLJ y la superficie puede generar una perturbación y de qué forma ésta es modulada por las características de la superficie.

Justificación

El estudio de procesos de precipitación en las regiones tropicales se ha visto limitado tradicionalmente por la pobre continuidad de registros observacionales en el tiempo, así como por la calidad y trazabilidad de los datos. Por otro lado, estudios relacionados con los mecanismos generadores de lluvia en la región, se han enfocado en procesos de gran escala. De manera, que la importancia de procesos locales y la interacción de las estructuras de mayor escala como la del CLLJ con la superficie no han sido estudiadas de forma específica. Considerando que América Central ha sido señalada como un importante punto caliente de cambio climático y en conocimiento de las variaciones que ha experimentado la superficie de la región en las últimas décadas, se hace relevante incorporar estudios concretos sobre los procesos de interacción del CLLJ con la superficie y su efecto en el desarrollo de procesos asociados con precipitación en la región. De esta manera, se podrá contar con elementos que faciliten la mejora de modelos numéricos (en concordancia con la investigación propuesta en la Tercera Componente, Castillo *et al.* 2018) y permitan una comprensión integral del ciclo hidrológico de la región en las diferentes escalas espaciales y temporales.

Preguntas científicas:

¿Es posible cuantificar la conversión de energía barotrópica vinculada a la interacción CLLJ-superficie mediante las variaciones de los flujos superficiales (tema transversal con la Quinta Componente, Garbanzo *et al.* 2018)?

¿Cuáles son los procesos físicos dominantes en la escala local?

¿Cuál es el potencial convectivo en esta interacción y cuáles son sus implicaciones sobre la distribución de precipitación?

¿Cómo responde el proceso de retroalimentación a los cambios en la rugosidad (vegetación) de la superficie?

¿Cuáles modos dinámicos del CLLJ se pueden relacionar con la propagación de la perturbación

hacia el oeste y el desplazamiento hacia el norte de la ITCZ? Este es un tema transversal con la Sexta Componente de Hidalgo y Alfaro (2018).

Objetivo específico

Estudiar el papel del CLLJ en la modulación de la distribución de intensidad de precipitación en la región norte de Costa Rica debida a procesos de conversión de energía barotrópica asociada a la interacción de la estructura del CLLJ con la superficie continental de América Central.

Datos y Métodos

Se busca proveer un marco teórico actualizado al problema del acople entre la superficie terrestre y la atmósfera en las escalas diurna, intraestacional e interanual. La idea propuesta es comprender cómo la interacción del CLLJ con esta superficie modula la distribución de lluvia en estas tres escalas de tiempo. Con una mejor comprensión del papel de la interacción entre la superficie terrestre y la atmósfera y su interpretación en términos de transferencia de energía, se propone diseñar un sencillo experimento numérico usando un modelo regional (en colaboración con la Primera Componente, Rivera *et al.* 2018) para evaluar la sensibilidad de la distribución de lluvia del modelo a cambios controlados de la cobertura vegetal. Los datos provienen de la base SIWÄ y del radar instalado en Guanacaste (ver abajo detalle en Metas).

Metas

- Análisis integral de registros observacionales meteorológicos e hidrológicos existentes tanto en superficie como en niveles troposféricos (datos de SIWÄ y de radar a analizar por la Quinta Componente, Garbanzo *et al.* 2018) para determinar, con evidencia observacional, los procesos de intercambio de energía y materia entre la superficie terrestre y la atmósfera.
- Estudio sobre la relación entre el ingreso del flujo de humedad transportada por el CLLJ y la activación de procesos en superficie terrestre con la capacidad de forzar desarrollo convectivo en la escala local (tema transversal con la Segunda Componente, Mora *et al.* 2018).
- Evaluar la respuesta de la interacción entre el flujo de humedad (tema transversal con la Segunda Componente) y la superficie terrestre y su efecto en la distribución de precipitación

bajo escenarios representativos de conversión de cobertura vegetal mediante modelado numérico.

Se propone generar sinergia con otras componentes del proyecto, por ejemplo, el análisis del acople entre la superficie y la atmósfera permitirá producir información relevante para ser utilizada por la Primera Componente (Rivera *et al.* 2018) en la formulación de parametrizaciones de capa límite. Se planea aportar resultados de utilidad para la validación de los productos numéricos generados por la Tercera Componente (Castillo *et al.* 2018). Finalmente se espera contribuir de forma significativa al estudio de la importancia de la superficie para la comprensión de la interacción entre el CLLJ con otros procesos regionales asociados a la distribución de lluvia, en apoyo a la Sexta Componente (Hidalgo y Alfaro 2018).

En cuanto se refiere a los procesos de formación de estudiantes, en colaboración con el grupo líder de la propuesta (Amador *et al.* 2018), se desarrollarán talleres para integrar estudiantes tanto de pregrado como de posgrado en las actividades de monitoreo en campo previa capacitación en los aspectos teóricos de procesos de interrelación atmósfera-superficie terrestre y el manejo de instrumentos y sistemas de monitoreo. Se proyecta que esta componente contribuya con la ejecución de una tesis de licenciatura de corte observacional y una tesis de maestría relacionada con el análisis teórico de procesos en capa límite en conjunto con la Primera Componente (Rivera *et al.* 2018) para evaluar el papel de la vegetación para la dinámica de la precipitación en la escala local.

Productos

- Creación de una base de datos con sistema de visualización de flujos de humedad.
- Modelo teórico-conceptual de la evolución de la capa límite atmosférica durante la activación de la temporada lluviosa.
- Simulaciones de la interacción del flujo de humedad y el inicio de la temporada de lluvias en función de cambios en el uso de suelo y la cobertura vegetal.
- Una publicación en revista indexada.
- Colaboración en trabajo final de graduación y tesis de posgrado (Carlos Aguilar Cabrera carné A80109).

Cronograma

Actividades	2019			2020			2021			2022			2023		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Organizar las bases de datos para análisis de registros meteorológicos y flujos de humedad		■	■	■	■	■									
Extracción de la información de flujos de humedad asociados con los eventos de precipitación			■	■	■										
Análisis de la estructura de la capa límite durante el inicio de los periodos de lluvia					■	■	■	■	■						
Clasificación de usos de suelo y cobertura a escala nacional						■	■	■	■	■					
Cuantificar los flujos superficiales y la distribución de la energía en la capa límite para los periodos de interés						■	■	■	■	■	■				
Caracterizar la vegetación y los flujos superficiales								■	■	■	■	■	■		
Desarrollo de modelo conceptual para describir la interacción entre la vegetación y la distribución de precipitación en varias escalas											■	■	■	■	
Desarrollar experimentos para evaluar la sensibilidad de la interacción del flujo de humedad modulado por el CLLJ al cambio en las características de la superficie.												■	■	■	■

Períodos: 1: Enero – Abril, 2: Mayo – Agosto, 3: Septiembre – Diciembre

Quinta Componente

Determinación de la estructura vertical del CLLJ en el Pacífico Tropical del Este mediante observaciones de percepción remota e *in situ* sobre Guanacaste

M. Garbanzo, J. A. Amador, E. Rivera y T. Maldonado

(Garbanzo *et al.* 2018)

Antecedentes

Un radar en Costa Rica que cubre satisfactoriamente la troposfera baja es el ubicado en Santa Cruz de Guanacaste y descrito por Hocking *et al.* (2014). Éste es un radar digital, capaz de generar imágenes de alta resolución utilizando pulsos de un kilómetro de longitud. Esto se debe a que se incorporan técnicas digitales de deconvolución con el pulso transmitido, permitiendo aumentar la resolución de los 500 m definidos por la longitud del pulso hasta cerca de 50 m. Radares de este tipo son regularmente llamados tipo MST (por sus siglas en inglés) dependiendo de la región atmosférica más lejana que el equipo pueda medir, ya sea la mesosfera, estratosfera o troposfera. Una revisión de este tipo de radares se encuentra en Hocking (2011).

El radar tipo MST ubicado en Guanacaste ya ha sido utilizado para la investigación científica de la atmósfera. Sus datos fueron incorporados en un estudio teórico-experimental de métodos de análisis de señales de radar (Garbanzo-Salas y Hocking 2015). Los resultados mostraron cómo la teoría de Fourier puede establecer una referencia con respecto a métodos adaptativos de análisis, mostrando dónde existen debilidades y fortalezas. También se mostró como al utilizar métodos adaptativos en estimación de contenido espectral el grosor de la señal siempre se subestima, causando que los valores de turbulencia calculados por el método de grosor espectral sean menores que los calculados por el método de transformada de Fourier. Cuando se comparan los métodos para resolución espacial se observó que el proceso de deconvolución se degrada rápidamente cuando el filtro del método adaptativo disminuye de tamaño. Otro estudio que utilizó la información generada por este radar es la tesis doctoral de Garbanzo-Salas (2015). En ese trabajo se utilizó información atmosférica para estudiar la variabilidad estacional de las capas de turbulencia atmosférica, así como la altura máxima de la capa límite planetaria y su velocidad de ascenso.

Este radar es parte del proyecto VI-805-B1-108 de la Universidad de Costa Rica. El instrumento se utiliza principalmente para medición de turbulencia en la baja troposfera con fines

de investigación y también es posible generar información de vientos así como ecos de regiones con presencia de turbulencia en escalas relacionadas a los 46.6 MHz del radar. Actualmente estos datos se pueden obtener desde 1 km hasta 5 km con una resolución aproximada de 100 m, características que permitirán identificar la estructura temporal del CLLJ sobre esta parte del Istmo. El CLLJ nunca ha sido estudiado en esta región con este instrumento de radiofrecuencia.

Justificación

Una de las principales manifestaciones del CLLJ puede observarse en el ciclo anual de la componente zonal del viento con máximos en el verano e invierno boreal sobre el oeste del Mar Caribe (Amador *et al.* 2003; Amador 2008). Poco se sabe, sin embargo, sobre otros detalles de su estructura vertical y horizontal, la variabilidad estacional de la posición vertical de sus máximos, sus intensidades y la extensión longitudinal de este fenómeno durante el año en esta región tropical. Durante el verano boreal, datos de reanálisis muestran que el CLLJ se separa en dos ramas, una que gira hacia el norte pasando a través del Golfo de México y otra que sobrepasa el Istmo Centroamericano (Amador 2008). A pesar de que en esta región del Pacífico tropical del este (PTE) no hay datos abundantes, información derivada de PACS-SONET en Liberia y Managua en la década de los años 90 sugiere que el CLLJ atraviesa América Central y se interna en el PTE (Amador 2008).

Para lograr una mejor comprensión del CLLJ se requieren mediciones precisas que permitan validar modelos atmosféricos, así como resolver detalles de pequeña escala. Las mediciones remotas e *in situ* proveerán datos para el estudio del CLLJ y ayudarán a aclarar las dudas acerca de la posible variación del CLLJ en su paso del Caribe al PTE (en concordancia con la investigación propuesta en la Primera y Cuarta Componentes). La variabilidad temporal también podrá ser estudiada en detalle utilizando estas mediciones y aportarán conocimiento acerca de la estabilidad de las corrientes así como su evolución temporal. Se prevé que con este radar se puedan obtener ecos derivados de sus características como distribución vertical de viento, viento máximo, zonas de turbulencia, además de observar su distribución y variabilidad temporal con una resolución temporal cercana al minuto. Lo anterior puede contribuir con algunas otras de las investigaciones de esta propuesta (Rivera *et al.* 2018, Mora *et al.* 2018, Vega *et al.* 2018).

Objetivo específico

Obtener mediciones de radar relacionadas con el CLLJ sobre la región de Santa Cruz de Guanacaste para identificar la presencia del CLLJ y caracterizar su estructura vertical comparada con la observada en el Mar Caribe con base en su distribución espacial y variabilidad temporal.

Datos y Métodos

Se medirá el CLLJ de tres maneras. La primera forma es utilizando un radar tipo MST. La segunda es utilizando radiosondeos que serán lanzados desde el sitio del radar de la UCR. Finalmente, la tercera medición será con el satélite GOES 16 que generará datos cada 15 minutos desde una órbita geoestacionaria desde 75° W. El radar permitirá un continuo monitoreo de la baja atmósfera cada minuto. Los radiosondeos serán espaciados 12 horas y forman parte de una campaña llamada OTREC (apoyada por National Science Foundation de Estados Unidos de América) que se realizará durante mediados del año 2019. La duración de OTREC permitirá monitoreo detallado en altura durante algunas semanas. Los datos del radar se obtendrán durante los últimos tres años del proyecto. Estas mediciones se complementan ya que los radiosondeos servirán de validación para los datos de radar además de calibración de intensidad y variables de fase del mismo.

El radar generará perfiles de turbulencia y viento en las regiones de la baja troposfera. Se utilizarán los perfiles de ecos para identificar zonas de gran disipación de energía turbulenta. Por otro lado la información de viento servirá para identificar las regiones de la extensión vertical asociadas a la presencia del máximo de viento del CLLJ. Ambos tipos de perfiles servirán a su vez para generar series de tiempo en algunas escalas para la caracterización del fenómeno y comprender mejor su variabilidad y evolución temporal.

Los datos de radiosondeos producen información detallada durante el ascenso del equipo de medición. Los datos generados incluyen viento, que es útil para el estudio del CLLJ, pero también humedad, presión y temperatura, que proveerán información de estabilidad atmosférica al estudio. Estos datos de estabilidad no son directamente mensurables por radar o satélite. Los sondeos generarán una alta resolución vertical con espaciamientos menores a los 10 m que permitirá estudiar estructuras menores a la resolución del radar. Se generarán mapas de variables atmosféricas por la duración de las campañas de medición para identificar los núcleos de máxima intensidad así como la variabilidad vertical y temporal del fenómeno de interés.

El satélite GOES16 dispone actualmente de 16 canales distribuidos en el espectro visible e infrarrojo (menor a 15 μm). Algunos de los canales tienen resolución de 1 km y otros como el canal rojo tiene una certidumbre de hasta 500 m. Existen también tres canales con información relacionada al vapor de agua que pueden ser utilizados para monitorear zonas activas de transporte de humedad asociadas al CLLJ y a ríos atmosféricos. Un producto derivado de este satélite es la dirección y magnitud de viento basado en los movimientos atmosféricos y es diseminado cada 15 minutos. Esta información puede resultar útil para caracterizar la presencia del CLLJ, comparar estos datos con los de radar para el estudio de sus distribuciones espaciales y variabilidad temporal. El tiempo de vida del satélite supera la fecha de finalización del proyecto ya que su vida útil termina en el año 2026. En caso de algún fallo en el satélite, NOAA tiene planeado lanzar al espacio el siguiente (GOES-T) en el año 2020.

Metas

- Caracterización de la presencia del CLLJ en la baja troposfera en la región Guanacasteca utilizando los productos generados por el radar.
- Identificación de zonas de alta disipación turbulenta de energía asociada al CLLJ y a los máximos de viento observados.
- Combinación de productos de los tres sistemas de observación mencionados para identificar satisfactoriamente la presencia y estudiar la variabilidad temporal del CLLJ.
- Publicación de resultados del estudio del CLLJ utilizando datos de radar y satélite.

Productos

Entre los productos derivados del radar están (i) mapas de viento para la región de interés en función del tiempo, (ii) mapas de ubicación de región de alto grosor espectral relacionado con turbulencia en función del tiempo y (iii) gráficos de variabilidad de la intensidad del viento para periodos extendidos. De los radiosondeos se derivarán índices de estabilidad, así como gráficos de condiciones atmosféricas y evolución temporal. En conjunto con los datos de radar los radiosondeos serán utilizados para generar gráficos de dispersión de magnitud y dirección de viento. Los productos a utilizar del satélite GOES16 son gráficos regionales de cobertura nubosa, gráficos de contenido de humedad en tres diferentes niveles, datos de viento así como información de tormentas derivadas del sensor GLM. Los tres instrumentos mencionados serán combinados

para obtener productos únicos para la investigación del CLLJ, por ejemplo se obtendrá un producto de viento de 3 componentes instrumentales, obtenidas de manera independiente para estudiar el CLLJ y validar las mediciones utilizadas. Estos productos serán analizados en conjunto con los investigadores de la Primera y Cuarta Componente.

Cronograma

Actividades	2019			2020			2021			2022			2023		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Calibración de antenas y configuración de radar para operación		■	■	■											
Inicio de descarga continua de productos satelitales				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Operación continua, monitoreo de operación, mantenimiento preventivo y diagnóstico de datos/productos				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Procesamiento de datos y generación de productos					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Análisis de resultados							■	■	■	■	■	■	■		
Publicación de resultados											■	■	■	■	■

Períodos: 1: Enero – Abril, 2: Mayo – Agosto, 3: Septiembre – Diciembre

Sexta Componente

Evaluación de las conexiones entre el CLLJ y algunas características de la precipitación en América Central.

H. Hidalgo y E. Alfaro

(Hidalgo y Alfaro 2018)

Antecedentes

En el artículo de Hidalgo *et al.* (2015) se planteó un mecanismo para explicar la relación entre el CLLJ y la precipitación en la costa Pacífica de América Central. El mecanismo es incompleto, ya que en Hidalgo *et al.* (2015) se encontró una relación entre la posición latitudinal de la ITCZ (Quirós-Badilla e Hidalgo León 2016) y la intensidad del CLLJ que no se pudo explicar dentro del esquema propuesto. Adicionalmente, la entrada y salida de la estación lluviosa en América Central fue estudiada previamente por Alfaro *et al.* (1998), Alfaro y Cid (1999), Enfield y Alfaro (1999), Maldonado *et al.* (2013) y Maldonado *et al.* (2017b) y el veranillo (Magaña *et al.* 1999) por Alfaro (2014), Maldonado *et al.* (2016) y Alfaro e Hidalgo (2017). Los estudios mencionados anteriormente, han demostrado que estos aspectos son modulados por la variabilidad climática asociada a el ENOS y por el Atlántico Tropical Norte, sin embargo, aparte del trabajo de Magaña *et al.* (1999) sobre el CLLJ y las piscinas de agua cálida del PTE, no hay un estudio que investigue la relación de los aspectos antes descritos con el CLLJ. Investigar estas relaciones es un punto novedoso en la propuesta.

Justificación

En esta propuesta se investigará la relación entre la posición latitudinal de la ITCZ y la intensidad del CLLJ, con la intención de entender los mecanismos moduladores de precipitación en América Central y así proveer los fundamentos físicos para mejores pronósticos. Tal y como se mencionó en Hidalgo *et al.* (2015), el papel de la piscinas de aguas cálidas del Hemisferio Occidental (WHWP, por sus siglas en inglés) en esos mecanismos también es desconocido en este momento y será objeto de estudio en esta propuesta, lo cual es otro aspecto novedoso. Se pretende estudiar los procesos físicos asociados a la entrada y salida de la estación lluviosa en América Central y el Caribe, así como también del veranillo por medio de análisis de datos de diferentes fuentes existentes en el CIGEFI (reanálisis, datos de superficie y de la base SIWÄ, datos satelitales

y otros productos) e identificar las posibles fuentes de variabilidad interanual asociadas a los mismos con el fin de establecer posibles esquemas predictivos de estos aspectos.

Objetivo

Evaluar las conexiones entre la magnitud del CLLJ y la posición de la ITCZ, la WHWP, en la variabilidad de la entrada y salida de la estación lluviosa en América Central y el Caribe, así como también del veranillo.

Datos y Métodos

Se identificarán años secos y húmedos en la vertiente Pacífica de América Central, una región que se conoce está influenciada por el CLLJ (Magaña *et al.* 1999, Maldonado *et al.* 2016, Hidalgo *et al.* 2017). Estos años servirán para hacer compuestos de circulación atmosférica, temperatura superficial del mar, precipitación en la ITCZ, entrada y salida de la estación lluviosa e índices del veranillo. Se pretende adaptar la metodología usada previamente por Alfaro *et al.* (1998), Alfaro y Cid (1999), Enfield y Alfaro (1999), Maldonado *et al.* (2013) y Maldonado *et al.* (2017b) para estudiar la entrada y la salida de la estación lluviosa y la propuesta por Alfaro (2014), Maldonado *et al.* (2016) y Alfaro e Hidalgo (2017) para el caso del veranillo. Se hará uso del equipo computacional existente en el CIGEFI para la ejecución de esta componente.

En primera instancia, se explorarán esquemas predictivos como los empleados recientemente por Alfaro *et al.* (2017), basados en el Análisis de Correlación Canónica. Este objetivo trata de identificar los factores que influyen la variabilidad y el inicio y cese de la estación lluviosa en América Central y el Caribe en escalas estacionales a multidecenales, así como identificar el cambio potencial en la estacionalidad de la lluvia en relación con el cambio climático, por medio del análisis de proyecciones en eventos extremos obtenidos de corridas diarias de Modelos de Circulación General seleccionados de acuerdo a Hidalgo y Alfaro (2015).

Primero se establecerán las variaciones en las fechas de inicio y cese de la estación lluviosa a escalas regionales para el período 1980-2017 usando la base de datos de PERSIANN (Ashouri *et al.* 2015). Esta base de datos todavía no ha sido usada regionalmente y está disponible en el CIGEFI. En donde se disponga de datos de estaciones meteorológicas se harán comparaciones entre ambas fuentes de datos, por medio de los registros que se encuentren en la base de datos NUMEROSA del CIGEFI. Esto facilitará el análisis de las relaciones entre la entrada y salida

temprana/tardía de la estación lluviosa con la prevalencia de eventos extremos en la región. Asimismo, varios estudios han mostrado que la lluvia en el Caribe está asociada con un desplazamiento hacia el norte de la ITCZ en el PTE (Gu *et al.* 2006; Angeles *et al.* 2010), un desplazamiento hacia el norte de la Alta del Atlántico Norte, un debilitamiento de los vientos alisios y del CLLJ y de la piscina de Aguas Cálidas de Hemisferio Occidental (Wang *et al.* 2007; Moron *et al.* 2016) en escalas estacionales. La idea es incorporar estos aspectos para mejorar el modelo conceptual planteado por Hidalgo *et al.* (2015) en colaboración con lo propuesto por la Primera Componente (Rivera *et al.* 2018).

A escalas interanuales la lluvia está ligada a ENOS, el índice Tropical del Atlántico Norte (TNA), la Oscilación del Atlántico Norte y un posible gradiente entre el Pacífico ecuatorial del Este y el TNA (Enfield and Alfaro, 1999; Chen and Taylor, 2002; Taylor *et al.* 2013; Gouirand *et al.* 2012; Gouirand *et al.* 2014). Por eso, las relaciones entre el CLLJ, la ITCZ y el gradiente Pacífico-Caribe serán estudiados para establecer su influencia en el inicio y cese de las lluvias en América Central y el Caribe. Nótese que el estudio de aspectos intraestacionales del ciclo anual de la precipitación, como la entrada y salida de la estación lluviosa y del veranillo, así como su variabilidad en escalas interanuales y decenales, está relacionado con lo descrito en la Primera (Rivera *et al.* 2018), Segunda (Mora *et al.* 2018) y Cuarta (Durán-Quesada *et al.* 2018) Componente de esta propuesta, por lo que habrá colaboración y discusión de resultados entre éstas. El estudio de estos aspectos, permitirá la identificación de estudios de caso, que podrán ser simulados por medio de un modelo regional, con el fin de estudiar los aspectos dinámicos asociados, para ello se coordinarán actividades con las de Rivera *et al.* (2018) y Castillo *et al.* (2018), en cuanto al uso del equipo computacional de alto rendimiento (clúster) del CIGEFI y en la discusión y análisis de los resultados obtenidos. El análisis, por medio de modelos dinámicos de este tipo de aspectos, todavía no se ha realizado en la región.

Metas

- Publicar al menos un artículo en una revista científica indexada.
- Involucrar al menos un estudiante de grado o posgrado en esta componente para elaborar su trabajo final de graduación.
- Divulgar los resultados en al menos una nota de prensa nacional.

- Generar, transferir y divulgar los esquemas predictivos resultantes a los distintos Foros Regionales de Predicción Climática de América Central y del Caribe, organizados por el Comité Regional de Recursos Hidráulicos del Sistema de Integración Centroamericano.

Productos

- Número de artículos científicos publicados.
- Número de estudiantes involucrados.
- Número de notas de prensa publicadas.
- Se contempla la divulgación de los resultados obtenidos en eventos científicos nacionales y en al menos una nota de prensa. La divulgación ha sido una práctica usual en el CIGEFI, usando medios locales e internacionales. Relacionadas con la temática podríamos citar a modo de ejemplo Alfaro y Enfield (1999) e Hidalgo y Alfaro (2016).

- **Cronograma**

Actividades	2019			2020			2021			2022			2023		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Recolección de información		■	■	■	■	■									
Análisis de información				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Discusión de resultados						■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Preparación y envío de manuscrito										■	■	■	■	■	■
Trabajos de campo y divulgación de resultados			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Reunión con actores locales para difusión de resultados													■	■	■

Períodos: 1: Enero – Abril, 2: Mayo – Agosto, 3: Septiembre – Diciembre

Sétima Componente

Características paleoclimáticas regionales de la Corriente en Chorro del Caribe

C. P. Vega, J. A. Amador, T. Maldonado y E. Rivera

(Vega *et al.* 2018)

Antecedentes

Como parte del estudio integral del CLLJ es necesario investigar las condiciones climáticas pasadas en la región para comprender la evolución temporal de dicho fenómeno a escalas de tiempo desde cientos a miles de años. La inclusión del estudio del CLLJ y sus efectos desde un punto de vista paleoclimático permitirá agregar información valiosa, tanto en el área experimental de este proyecto, como en el área de modelado (Rivera *et al.* 2018; Castillo *et al.* 2018). En los inicios de la paleoclimatología (i.e. segunda mitad del siglo XX), la importancia de los trópicos para explicar cambios climáticos pasados fue ignorada, esto impulsado principalmente por los resultados de CLIMAP (Climate Long range Investigation, Mapping, and Prediction project), proyecto paleoclimático pionero para evaluar cambios climáticos durante el último período glacial. Cane (1998) sugirió que dicha omisión se debió a que CLIMAP halló que las temperaturas superficiales de las aguas tropicales sufrieron poco cambio en comparación a las temperaturas de regiones subtropicales y polares durante los últimos 100 000 años, lo cual desvió la atención hacia las latitudes polares. Sin embargo, existe ya suficiente evidencia que indica la importancia de los trópicos como región moduladora de cambios climáticos (Beck *et al.* 1992; Farrera *et al.* 1999; Porter 2001; Pierrehumbert 2000; Chiang 2009; Stott *et al.* 2002; Ivanochko *et al.* 2005; Leduc *et al.* 2007). En este contexto, y dado que el CLLJ es un modulador importante del clima en una región considerada como punto caliente del cambio climático en los trópicos (Giorgi 2006), es relevante estudiar la evolución temporal del mismo a escalas históricas y paleoclimáticas. En este proyecto, se propone estudiar la evolución histórica y paleoclimática de los vientos alisios sobre la región de la Cordillera de Talamanca, para lo cual se usarán radiosondeos (SIWÁ), perfiles de temperatura históricos (Amador 2002) y reconstrucciones paleoglaciológicas (Orvis and Horn, 2000), los cuales permitirán comprender la intensidad de la inversión de los alisios sobre la región y su influencia en el clima del país.

Justificación: una mirada paleoclimática

La inversión de los alisios está asociada a la capa límite marina, en un régimen de vientos alisios, en donde la temperatura del aire crece con la altitud en vez de disminuir. Se ha relacionado esta capa con el movimiento de subsidencia (calentamiento adiabático) producido por las ramas descendentes de las circulaciones meridionales y zonales de gran escala. La intensidad de la capa de inversión (ICI) es la razón entre la diferencia de temperatura del límite superior menos el inferior entre el espesor de la capa límite. Los valores de la ICI no son constantes, pueden variar diaria o estacionalmente o estar sujeta a ciertos patrones de tiempo atmosférico (Cao et al, 2007). Bajo la influencia de una capa de inversión, la estructura de la atmósfera corresponde a la de una capa superior seca y caliente, con una capa húmeda y más fría por debajo. En general, cuando los alisios encuentran una montaña elevada a su paso la estructura anterior puede modificar las condiciones a sotavento y barlovento de las montañas (Giambelluca y Nullet, 1991) o tener implicaciones en la disminución de la densidad de vegetación de ladera montañosa (Krushelnycky et al, 2016). La estimación de la altitud de la línea de equilibrio (ELA por sus siglas en inglés), es decir, la elevación a la cual la ganancia de masa de un glaciar iguala la pérdida de masa por derretimiento, se puede utilizar para obtener el perfil de temperatura vs elevación en diferentes zonas en donde existen o han existido glaciares.

En el caso de los glaciares presentes en la Cordillera de Talamanca durante el último máximo glacial, dichas ELAs fueron estimadas a principios del año 2000 (Orvis and Horn 2000) cuando los inventarios de glaciares tropicales eran aún escasos y con pocas analogías modernas a los glaciares existentes en Costa Rica, lo cual limitó la estimación de las ELAs y la reconstrucción de los perfiles de temperatura. Hoy en día dichos inventarios de glaciares son más extensos lo que permitiría una re-calculación y re-interpretación más precisa de las ELAs para la Cordillera de Talamanca y por ende, una estimación más certera de los perfiles de temperatura vs. altitud para la región teniendo en cuenta la posible interacción entre dichos glaciares y la inversión térmica de los alisios en un contexto paleoclimático.

Objetivo específico

Compilar y analizar datos de radiosondeos climáticos históricos (SIWÁ) por al menos 40 años e información paleoclimática relevantes para el estudio del CLLJ, el ICI, sus efectos

climáticos en la región y obtener perfiles actuales, históricos y paleoclimáticos de temperatura y viento para la Cordillera de Talamanca.

Datos y Métodos

Se propone en este proyecto, estudiar la ICI considerando la información de radiosondeos, datos históricos de perfiles de temperatura sobre la Cordillera de Talamanca, además de datos paleoglaciológicos disponibles para la región, con el fin de extrapolar las estimaciones paleoclimáticas de temperatura existentes para dicha región (Orvis and Horn, 2000) a elevaciones más bajas e interpretarlas en un contexto paleoclimático regional, utilizando los diversos archivos disponibles en Costa Rica (por ejemplo, anillos de los árboles, núcleos de sedimentos, espeleotemas). Dicho análisis no ha sido realizado debido a la carencia de un estudio que se enfoque en la interacción que existe entre las cumbres de la Cordillera de Talamanca (por ejemplo con y sin la presencia de glaciares) y la inversión de los alisios.

Metas

- Utilización de los perfiles de temperatura que provee SIWÁ para evaluar las condiciones termodinámicas de la atmósfera en la zona de la Cordillera de Talamanca y la influencia de la inversión de los alisios en estas condiciones durante el pasado.
- Identificación de los efectos del CLLJ en el ICI.

Productos

- Como aporte a la parte experimental del proyecto se generará el ICI a partir de datos de la base SIWÁ, además la generación de perfiles de temperatura para la región de la Cordillera de Talamanca.
- Como contribución al problema de modelación del proyecto, se colaborará con los perfiles de temperatura obtenidos como datos de entrada para modelaciones paleoclimáticas de la región, con énfasis en el CLLJ.

Sinergias potenciales

Los resultados de esta componente del proyecto están estrechamente relacionados con la Tercera y Cuarta Componentes (Castillo *et al.* 2018 y Durán-Quesada *et al.* 2018). La obtención

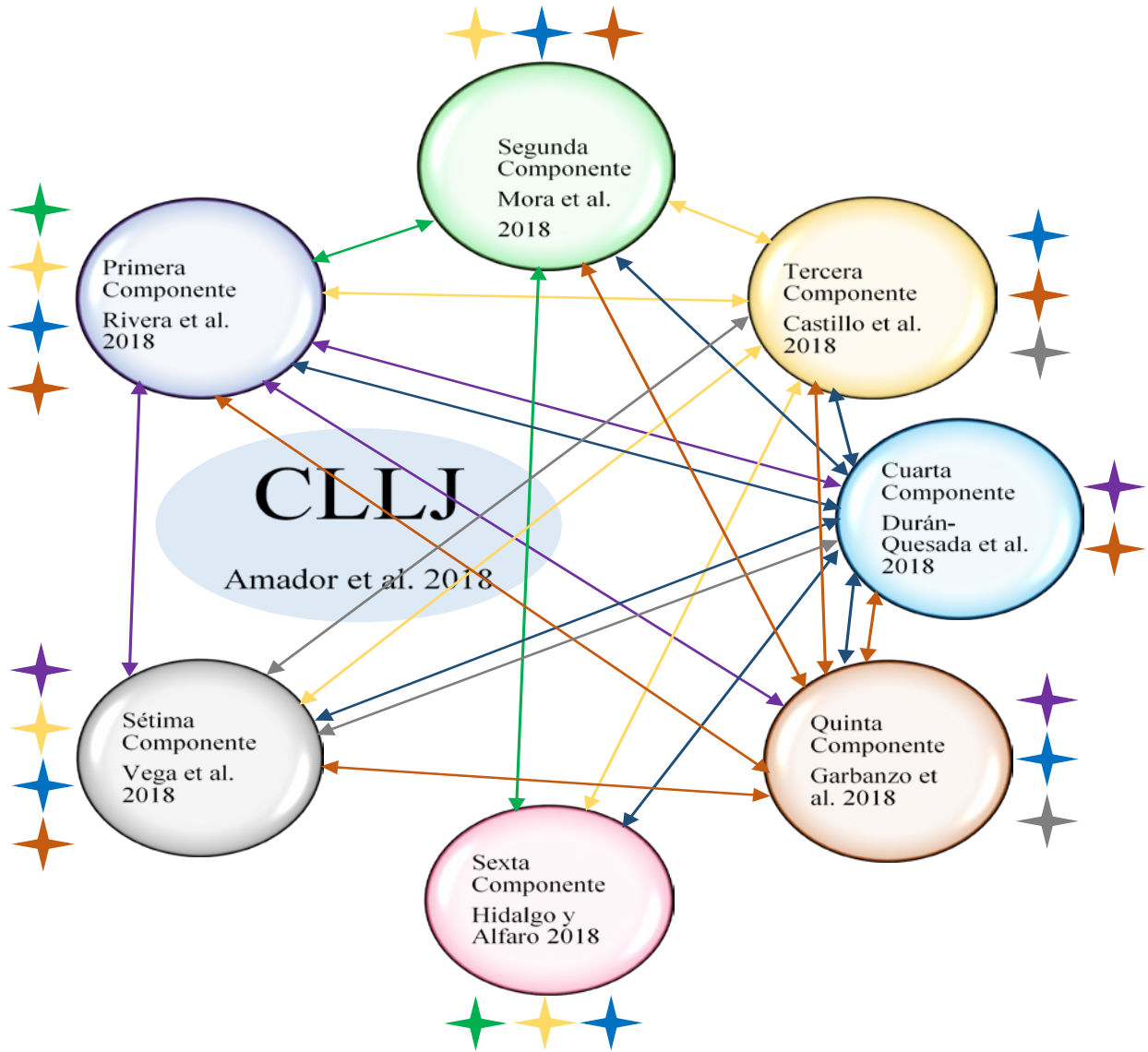
de los perfiles de temperatura y la evaluación de las componentes termodinámicas de la atmósfera en la región de la Cordillera de Talamanca servirán como blanco para comprobar los resultados de la Tercera Componente en esta región (Castillo *et al.* 2018). Por otra parte, los resultados de Durán-Quesada *et al.* (2018) en torno al acople superficie-atmósfera serán de vital importancia para comprender la interacción entre la superficie montañosa (con y sin cubierta de hielo) y la atmósfera y su influencia en la estimación de los perfiles de temperatura paleoclimáticos e históricos en esta región.

Cronograma

Actividades	2019			2020			2021			2022			2023		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Recopilación de datos de radiosondeos, climáticos históricos y paleoclimáticos disponibles		■	■	■	■	■									
Obtención de perfiles actuales, históricos y paleoclimáticos de temperatura y viento para la zona de la Cordillera de Talamanca			■	■	■	■	■	■	■	■					
Evaluación de las condiciones termodinámicas de la atmósfera en la zona de estudio, cálculo del ICI, generación de perfiles de temperatura				■	■	■	■	■	■	■					
Evaluación de la inversión de los alisios bajo condiciones de frontera paleoclimáticas						■	■	■	■	■					
Manuscrito científico I: Revisión de paleoclima de Costa Rica			■	■	■	■									
Manuscrito científico II: condiciones históricas y paleoclimáticas en la región de la Cordillera de Talamanca											■	■	■	■	■

Períodos: 1: Enero – Abril, 2: Mayo – Agosto, 3: Septiembre – Diciembre

Esquema de las sinergias entre las componentes de la propuesta.



Explicación del esquema.

Las siete componentes de la propuesta son representadas por círculos con colores distintivos. Las flechas entre componentes indican la colaboración y la coordinación de actividades científicas en ambas direcciones. Junto a los círculos hay cruces de colores que simbolizan, según su color de referencia, el insumo esperado para cada componente de la propuesta.

Presupuesto Total

Concepto	Partida	2019	2020	2021	2022	2023	Monto
Informaciones	1-03-01-00				2300000	2300000	4600000
Servicios de desarrollo sistemas informáticos	1-04-05-00				400000		400000
Viáticos dentro del país	1-05-02-00	371500	743000	743000	743000	371500	2972000
Actividades de capacitación	1-07-01-00		160000		160000	160000	480000
Herramientas e instrumentos	2-04-01-00	500000					500000
Repuestos y accesorios	2-04-02-00	550000	550000				1100000
Útiles y materiales de oficina	2-99-01-01	125000	125000	125000	125000	125000	625000
Útiles y materiales de computación	2-99-01-05	450000			250000		700000
Mobiliario y equipo de computación	5-01-05-01	6025000					6025000
Horas estudiante	6-02-02-01	432731	865462	865462	865462	432731	3461850
Horas asistente	6-02-02-02	865462	1730925	1730925	1730925	865462	6923700
Al sector privado	6-02-99-02	62500	125000	125000	125000	62500	500000
Imprevistos (ver justificación abajo)							1414377
Total							29701927

Justificación

Informaciones: 1-03-01-00

Costo estimado de cuatro publicaciones en revistas indexadas internacionales a USA\$2000 cada una aproximadamente.

Servicios de desarrollo de sistemas informáticos: 1-04-05-00

Precio estimado para el desarrollo de una aplicación (App) con resultados de las componentes asociadas a temas de clima, variabilidad y cambio climático del CLLJ.

Viáticos dentro del país: 1-05-02-00

Giras a Guanacaste (radar), Zona Norte y Pacífico Central. Participación en reuniones científicas. Los viáticos se utilizarán principalmente para gastos de alimentación y hospedaje por parte de los investigadores. Se estiman dos giras por año para dos personas por tres días cada una a Guanacaste durante los cinco años. Además se contempla una gira por año para dos personas por tres días al Pacífico central y a la zona norte durante los años 2020, 2021 y 2022.

Actividades de capacitación: 1-07-01-00

Tres talleres de discusión y avance de resultados, al segundo, cuarto y quinto año, donde se dará capacitación a estudiantes con la participación de los investigadores.

Herramientas e instrumentos: 2-04-01-00

Las antenas del radar necesitan ser recalibradas para este proyecto, por tanto se requiere utilizar un medidor de impedancia vectorial (ver cotizaciones). Este equipo mide la impedancia de la antena así como la fase óptima para su operación a una frecuencia específica. Este equipo puede ser reutilizado para proyectos futuros en el radar. Los valores generados de VSWR servirán para calibrar de mejor manera las constantes de amplificación en los programas de procesamiento. Se incluye precio de cableado menor para la fase de operación.

Repuestos y accesorios: 2-04-02-00

Compra de repuestos y accesorios varios para instrumental y equipo menor de monitoreo. Ver cotización adjunta.

Útiles y materiales de oficina: 2-99-01-01

Compra de materiales y suministros de oficina que se requieren para el desarrollo de las actividades administrativas y de investigación del proyecto.

Útiles y materiales de computación: 2-99-01-05

Los datos del radar deben ser almacenados en un disco externo en el sitio del radar y transportados hasta el recinto central para procesamiento. Se requieren dos unidades externas para almacenar en una los datos crudos del radar y en la otra los productos. Una tercera unidad de almacenamiento de alta velocidad de lectura/escritura se necesita para las etapas intermedias de procesamiento y análisis. Ver cotizaciones para compra de discos duros y memoria USB.

Mobiliario y equipo de computación: 5-01-05-01

Adquisición de equipo de almacenamiento de datos NAS de 128 TB. Se estima que cada uno de los resultados de los experimentos puede ser del orden de 5 TB. Nótese que en el costo total se ha incluido el gasto de envío e importación del bien. Se adjuntan dos cotizaciones con precio nominal del equipo y un estimado de USA\$3000 para envío e importación.

Horas estudiante: 6-02-02-01

Se estiman 15 horas estudiante por 10.5 meses por aproximadamente cinco años. Pago de asistencias y colaboración en la recolección y preparación de los datos por parte de los estudiantes del proyecto. Los nombramientos serían de julio 2019 a junio 2023, en los períodos que establece la Universidad.

Horas asistente: 6-02-02-02

Se estiman 15 horas asistente por 10.5 meses por aproximadamente cinco años. Fundamental para apoyo a estudiantes que realicen trabajos de graduación en el marco del proyecto. Colaboración para la recolección y sistematización de información, trabajos asistenciales para la elaboración de publicaciones. Los nombramientos serían de julio 2019 a junio 2023, en los períodos que establece la Universidad.

Al sector privado: 6-02-99-02

Pago de almuerzos a estudiantes y asistentes durante trabajo de campo.

Contrapartida del CIGEFI

Datos del Servicio Meteorológico e Hidrológico de Suecia (costo operacional aproximado \$100.000), datos Universidad de Arizona (costo operacional aproximado \$100000), datos ERA-Interim (costo operacional aproximado \$100.000), datos SIWÁ (costo operacional aproximado \$150.000), laboratorios de computación básica (\$10.000), cluster Tsaheva de alto rendimiento para computación en paralelo (\$250.000), cluster Sibú-Ará para procesamiento intermedio (\$30.000), radar del CIGEFI (\$ 110.000), varios (internet, telefonía, electricidad, administración local CIGEFI (\$10.000)), infraestructura (\$150.000). Por simplicidad, esta contrapartida se ofrece en dólares de los Estados Unidos de América (USA en inglés) a la fecha de entrega de la propuesta con un tipo de cambio de 1 dólar de USA equivalente a 573 colones costarricenses aproximadamente.

Nota importante

El IP y el GIA están conscientes de que al dinero solicitado deben agregarse otras gestiones para financiar varias actividades de este proyecto. Para ello se usarán otros medios de financiamiento interno (como por ejemplo, la ayuda económica que distintos programas de grado y posgrado ofrecen a los estudiantes para terminar sus trabajos de graduación) y externo (actualmente en preparación y/o desarrollo en el CIGEFI). Se ha incluido un pequeño porcentaje equivalente al 5 % del presupuesto en Imprevistos para contemplar variaciones en el valor local de dólar de USA, la no disponibilidad de equipo menor solicitado que implique un gasto adicional al adquirir otro modelo semejante, costos mayores en la instalación de los repuestos en equipo ya instalado, aumento leve en el costo de horas asistente y estudiante, etc.

Referencias de las componentes de la propuesta

- Amador, J. A., T. J. Maldonado, E. R. Rivera, E. J. Alfaro, R. Castillo, A. M. Durán, M. Garbanzo, H. G. Hidalgo, G. Mora y C. P. Vega, 2018, En: La Corriente en Chorro del Caribe, Observaciones, modelado multifísica, interacciones multiescala e impacto regional, Propuesta de Investigación, Vicerrectoría de Investigación 2019 – 2023.
- Rivera, R., Amador, J., Maldonado, T., Castillo, R.: 2018, Teoría, observaciones y modelado del CLLJ. En: La Corriente en Chorro del Caribe: Observaciones, modelado multifísica, interacciones multiescala e impacto regional, Propuesta de Investigación, Vicerrectoría de Investigación 2019 – 2023.
- Mora, G., Amador, J., Rivera, E.: 2018, Estudio del comportamiento dinámico de algunos parámetros del CLLJ. En: La Corriente en Chorro del Caribe: Observaciones, modelado multifísica, interacciones multiescala e impacto regional, Propuesta de Investigación, Vicerrectoría de Investigación 2019 – 2023.
- Castillo, R., Amador, J., Maldonado, T., Rivera, E., Durán, A. M.: 2018, Caracterización de la estructura del CLLJ a partir del modelado numérico por sistemas de predicción por conjuntos de multifísica. En: La Corriente en Chorro del Caribe: Observaciones, modelado multifísica, interacciones multiescala e impacto regional, Propuesta de Investigación, Vicerrectoría de Investigación 2019 – 2023.
- Durán-Quesada, A. M., Garbanzo, M., Amador, J.: 2018, Procesos dominantes en el acople entre la superficie y la atmósfera en las regiones tropicales. En: La Corriente en Chorro del Caribe: Observaciones, modelado multifísica, interacciones multiescala e impacto regional, Propuesta de Investigación, Vicerrectoría de Investigación 2019 - 2023.
- Garbanzo, M., Amador, J., Rivera, E., Maldonado, T.: 2018, Determinación de la estructura vertical del CLLJ en el Pacífico Tropical del Este mediante observaciones de percepción remota e *in situ* sobre Guanacaste. En: La Corriente en Chorro del Caribe: Observaciones, modelado multifísica, interacciones multiescala e impacto regional, Propuesta de Investigación, Vicerrectoría de Investigación 2019 – 2023.
- Hidalgo, H., Alfaro, E.: 2018, Evaluación de las conexiones entre el CLLJ y algunas características de la precipitación en América Central. En: La Corriente en Chorro del Caribe: Observaciones, modelado multifísica, interacciones multiescala e impacto regional, Propuesta de Investigación, Vicerrectoría de Investigación 2019 – 2023.

C. P. Vega, J. A. Amador, T. Maldonado y E. Rivera, 2018, Características paleoclimáticas regionales de la Corriente en Chorro del Caribe. En: La Corriente en Chorro del Caribe: Observaciones, modelado multifísica, interacciones multiescala e impacto regional, Propuesta de Investigación, Vicerrectoría de Investigación 2019 – 2023.

Referencias

- Alfaro, E., 2014: Caracterización del “veranillo” en dos cuencas de la vertiente del Pacífico de Costa Rica, América Central. *Revista de Biología Tropical*, 62 (Supl. 4): 1-15.
- Alfaro, E., and D. Enfield, 1999: The rainy season in Central America: An initial success in prediction. *IAINewsletters*, 20, 20-22.
- Alfaro, E., y L. Cid, 1999: Análisis de las anomalías en el inicio y el término de la estación lluviosa en Centroamérica y su relación con los océanos Pacífico y Atlántico Tropical. *Top. Meteor. Oceanog.*, 6(1), 1-13.
- Alfaro, E., L. Cid y D. Enfield, 1998: Relaciones entre el inicio y el término de la estación lluviosa en Centroamérica y los Océanos Pacífico y Atlántico Tropical. *Investigaciones Marinas*, 26, 59-69.
- Alfaro, E., and H. Hidalgo, 2017: Propuesta metodológica para la predicción climática estacional del veranillo en la cuenca del río Tempisque, Costa Rica, América Central. *Top. Meteor. Oceanog.*, 16(1), 62-74.
- Alfaro, E., X. Chourio, A. G. Muñoz, and S. J. Mason, 2017: Improved seasonal prediction skill of rainfall for the Primera season in Central America. *Int. J. Climatol.*, doi: 10.1002/joc.5366.
- Amador J. A., 1981: Mean fields and synoptic scale systems during Phase III of GATE. Doctor of Philosophy Thesis, Department of Meteorology, The University of Reading, United Kingdom. 239 pp. [Disponible en el Sistema de Información, SIBDI, Universidad de Costa Rica].
- Amador, J. A., 1998: A climatic feature of the tropical Americas: The trade wind easterly jet. *Top. Meteorol. Oceanogr.*, 5(2), 1-13, 91-102.
- Amador, J. A., and V. Magaña, 1999. Dynamics of the Low-level jet over the Caribbean Sea. Preprints 23rd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, American Meteorological Society, 10-15 January, 99, 2, 868-869.

- Amador, J. A., V. O. Magaña and J. B. Pérez, 2000. The low level jet and convective activity in the Caribbean. Preprints 24th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, American Meteorological Society, 29 May-2 June, 114-115.
- Amador, J.A., 2002: Some aspects of climate in Costa Rica using historical data from XIX century. *Top. Meteor. Oceanog.*, 9(2), 64-74.
- Amador, J. A., J. R. Chacón, and S. Laporte, 2003. Climate and climate variability in the Arenal Basin of Costa Rica. In *Climate, Water and Trans-boundary Challenges in the Americas*. Ed. Henry Díaz and Barbara Morehouse. Kluwer Academic Publishers. Holland, pp. 317-349.
- Amador, J.A. and K.C. Mo. 2005. The Intra-Americas Sea Low-Level Jet. Poster Session 4: Hydrologic Variability and Monsoons. Song Yang, Chair. Poster 4.9 at the 30th Annual Climate Diagnostics & Prediction Workshop Climate Prediction Center, National Weather Service, The Pennsylvania State University October 24–28.
- Amador, J.A., E.R. Rivera, A.M. Ulate and C. Zhang. 2005. The Intra-Americas Sea Low-Level Jet: An Analysis of Atmospheric Sounding Observations. Presented at Session 10: Monsoons and Warm Season Predictions. Jenni Evans, Chair. The 30th Annual Climate Diagnostics & Prediction Workshop Climate Prediction Center, National Weather Service, the Pennsylvania State University, October 24–28.
- Amador, J. A., 2008: The intra-Americas sea low-level jet overview and future research. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 1146(1), 153–188, doi: 10.1196/annals.1446.012.
- Amador, J. A., E. J. Alfaro, E. R. Rivera, and B. Calderón, 2010: Climatic features and their relationship with tropical cyclones over the intra-Americas seas. *Hurricanes and Climate Change*, 2, Springer, 149–173.
- Amador, J. A., E. R. Rivera, A. M. Durán-Quesada, G. Mora, F. Sáenz, B. Calderón and N. Mora, 2016a. The easternmost tropical Pacific. Part I: A climate review. *International Journal of Tropical Biology and Conservation (Revista de Biología Tropical, ISSN-0034-7744)*, 64, S1-S22.
- Amador, J. A., A. M. Durán-Quesada, E. R. Rivera, G. Mora, F. Sáenz, B. Calderón and N. Mora, 2016b. The easternmost tropical Pacific. Part II: Seasonal and intraseasonal modes of atmospheric variability. *International Journal of Tropical Biology and Conservation (Revista de Biología Tropical, ISSN-0034-7744)*, 64, S3-S57.

- Andrade, C. and E. D. Barton, 2009: The implications of the Caribbean atmospheric low-level jet in the surface mesoscale circulation. Conference paper for Congreso Geofísico Mexicano, Puerto Vallarta, Noviembre, 2009.
- Angeles M. E., J. E. Gonzalez, N. D. Ramirez-Beltran, C. A. Tepley, and D. E. Comarazamy, 2010: Origins of the Caribbean rainfall bimodal behavior, *Journal of Geophysical Research*, 115, D11106, doi: 10.1029/2009JD012990.
- Ashouri H., K. Hsu, S. Sorooshian, D. K. Braithwaite, K. R. Knapp, L. D. Cecil, B. R. Nelson, and O. P. Prat, 2015: PERSIANN-CDR: Daily Precipitation Climate Data Record from Multi-Satellite Observations for Hydrological and Climate Studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, doi: [10.1175/BAMS-D-13-00068.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00068.1).
- Beck, J. W., R. L. Edwards, E. Ito, F. W. Taylor, J. Recy, F. Rougerie, P. Joannot, and C. Henin, 1992: Sea-surface temperature from coral skeletal strontium/calcium ratios. *Science*, 257, 644-647.
- Cane, M. A., 1998: A role for the Tropical Pacific. *Science*, 282(5386), 59-61, doi: 10.1126/science.282.5386.59.
- Cao, G., T. W. Giambelluca, D. E. Stevens, and T. A. Schroeder, 2007: Inversion Variability in the Hawaiian Trade Wind Regime, *Journal of Climate*, 20, 1145-1160.
- Chen A., and M. A. Taylor, 2002: Investigating the link between the early season Caribbean rainfall and the Nino +1 year. *Int J Clim*, 28, 87-106.
- Chiang, J. C. H., 2009: The Tropics in Paleoclimate, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 37, 263-297.
- CLIMAP, 1976: The Surface of Ice-Age Earth. *Science*, 191(4232), 1131-1137.
- Cook, K. H., 1999: Generation of the African Easterly Jet and its role in determining West African precipitation. *J. Climate*, 12, 1165-1184.
- Dee, D. P., S. M. Uppala, A. J. Simmons, Paul Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae et al., 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 137, 553-597.
- Di Luca, A., E. Flaounas, P. Drobinski, and C. L. Brossier, 2014: The atmospheric component of the Mediterranean Sea water budget in a WRF multi-physics ensemble and observations. *Climate dynamics*, 43(9-10), 2349-2375.

- Durán-Quesada, A. M., L. Gimeno, J. A. Amador, and R. Nieto, 2010: Moisture sources for Central America: Identification of moisture sources using a Lagrangian analysis technique. *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/2009JD012455.
- Durán-Quesada, A. M., L. Gimeno, and J. A. Amador, 2017: Role of moisture transport for Central American precipitation. *Earth System Dynamics*, 8(1), p.147.
- Enfield, D. and E. Alfaro, 1999: The dependence of Caribbean rainfall on the interaction of the tropical Atlantic and Pacific Oceans. *J. Climate*, 12, 2093-2103.
- Evans, J. P., M. Ekström, and F. Ji, 2012: Evaluating the performance of a WRF physics ensemble over South-East Australia. *Climate Dynamics*, 39(6), 1241-1258.
- Farfán, L. M., and J. A. Zehnder, 1997: Orographic Influence on the Synoptic-Scale Circulations Associated with the Genesis of Hurricane Guillermo (1991). *Mon. Wea. Rev.*, 125, 2683–2698, doi: 10.1175/1520-0493(1997)125<2683:OIOTSS>2.0.CO;2.
- Farrera, I., and Coauthors, 1999: Tropical climates at the Last Glacial Maximum: a new synthesis of terrestrial palaeoclimate data. I. Vegetation, lake-levels and geochemistry. *Climate Dynamics*, 15, 823-856.
- Garbanzo-Salas, M., 2015: "High resolution tropospheric studies with an MST type radar". Electronic Thesis and Dissertation Repository. Paper 3312. <http://ir.lib.uwo.ca/etd/3312>
- Garbanzo-Salas, M., and W. K. Hocking, 2015: Spectral analysis comparisons of Fourier-theory-based methods and minimum variance (Capon) methods. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 132, 92–100, doi: 10.1016/j.jastp.2015.07.003.
- Giambelluca, T. W., and D. Nullet, 1991: Influence of the trade-wind inversion on the climate of a leeward mountain slope in Hawaii, *Clim. Res.*, 1, 207-216.
- Giorgi, F., 2006. Climate change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L08707, doi: 10.1029/2006GL025734.
- Giorgi, F., M. R. Marinucci, and G. T. Bates, 1993a: Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary-layer and radiative transfer processes. *Monthly Weather Review*, 121(10), 2794-2813.
- Giorgi, F., M. R. Marinucci, G. T. Bates, and G. De Canio, 1993b: Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Monthly Weather Review*, 121(10), 2814-2832.

- Gouirand I, M. Jury, and B. Sing, 2012: An analysis of low and high frequency in summer climate variability around the Caribbean Antilles, *Journal of climate*, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00269.1.
- Gouirand, I., V. Moron, Z. Z. Hu, and B. Jha, 2014: Influence of the warm pool and cold tongue El Niños on the following Caribbean rainy season rainfall. *Climate Dynamics*, 42(3-4), 919-929, doi: 10.1007/s00382-013-1753-5.
- Gu, G., and R. F Adler, 2006: Interannual rainfall variability in the tropical Atlantic region. *J Geophys Res.*, 111, D02106, doi: 10.1029/2005JD005944.
- Hastenrath, S. L. 1966. The flux of atmospheric water vapor over the Caribbean Sea and the Gulf of Mexico. *J. App. Met.*, 5, 778-788.
- Herrera E., V. Magaña, E. Caetano, 2015: Air-Sea interactions and dynamical processes associated with the midsummer drought. *Int. J. Climatol.* 35: 1569–1578, doi:10.1002/joc.4077.
- Hidalgo, H. and E. Alfaro, 2015: Skill of CMIP5 climate models in reproducing 20th century basic climate features in Central America. *Int. J. Climatol.*, 35, 3397–3421, doi: 10.1002/joc.4216.
- Hidalgo, H. y E. Alfaro, 2016: La sequía en Guanacaste: ¿qué tan grande es?, *Periodista Diego Arguedas Ortiz. Suplemento de Cambio Climático Ojo al Clima. Semanario Universidad*, 10 de junio de 2016. (<http://ojoalclima.com/la-sequia-guanacaste-tan-grande/>, última visita 14/06/2016)
- Hidalgo H., A. M. Durán-Quesada, J. A. Amador, and E. Alfaro, 2015: The caribbean low-level jet, the inter-tropical convergence zone and precipitation patterns in the intra-americas sea: a proposed dynamical mechanism. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 97(1), pp.41-59, doi: 10.1111/geoa.12085.
- Hidalgo, H., A. M. Durán-Quesada, J. A. Amador, and E. Alfaro, 2016: The Caribbean low-level jet, the Inter-Tropical Convergence Zone and precipitation patterns in the Intra-Americas Sea: A proposed dynamical mechanism. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 97, 41-59, doi: 10.1111/geoa.12085.
- Hocking, W. K., 2011: A review of Mesosphere–Stratosphere–Troposphere (MST) radar developments and studies, circa 1997–2008. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73(9), 848–882, doi: 10.1016/j.jastp.2010.12.009.
- Hocking, W. K., A. Hocking, D. G. Hocking, and M. Garbanzo-Salas, 2014: Windprofiler optimization using digital deconvolution procedures. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 118, 45–54, doi:10.1016/j.jastp.2013.08.025.

- Ivanochko, T. S., R. S. Ganeshram, G. J. A. Brummer, G. Ganssen, S. J. Jung, S. G. Moreton, and D. Kroon, 2005: Variations in tropical convection as an amplifier of global climate change at the millennial scale. *Earth and Planetary Science Letters*, 235(1-2), 302-314, doi: 10.1016/j.epsl.2005.04.002.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, et al., 1996: The NCEP/NCAR Reanalysis 40-year Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 77: 437–471.
- Katragkou, E., M. García-Díez, R. Vautard, S. Sobolowski, P. Zanis, G. Alexandri, and K. Goergen, 2015: Regional climate hindcast simulations within EURO-CORDEX: evaluation of a WRF multi-physics ensemble. *Geoscientific model development*, 8(3), 603.
- Kim, H. M., P. J. Webster, and J.A Curry, 2012: Evaluation of short-term climate change prediction in multi-model CMIP5 decadal hindcasts. *Geophysical Research Letters*, 39(10).
- Klein, C., D. Heinzeller, J. Bliefernicht, and H. Kunstmann, 2015: Variability of West African monsoon patterns generated by a WRF multi-physics ensemble. *Climate Dynamics*, 45(9-10), 2733-2755.
- Krushelnicky, P. D., F. Starr, K. Starr, R. J. Longman, A. G. Frazier, L. L. Loope, and T. W. Giambelluca, 2016: Change in trade wind inversion frequency implicated in the decline of an alpine plant, *Clim. Change Response*, 3 (1).
- Leduc, G., L. Vidal, K. Tachikawa, F. Rostek, C. Sonzogni, L. Beaufort, and E. Bard, 2007: Moisture transport across Central America as a positive feedback on abrupt climatic changes. *Nature*, 445, 908-911, doi: 10.1038/nature05578.
- Magaña, V., J. A. Amador, and S. Medina, 1999: The midsummer drought over Mexico and Central America. *J. Clim.*, 12(6), 1577–1588, doi: 10.1175/1520-0442(1999)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2.
- Maldonado, T., E. Alfaro, B. Fallas-López, and L. Alvarado, 2013: Seasonal prediction of extreme precipitation events and frequency of rainy days over Costa Rica, Central America, using Canonical Correlation Analysis. *Advances in Geosciences*, 33, 41-52.
- Maldonado, T., A. Rutgersson, E. Alfaro, J. A. Amador, and B. Claremar, 2016: Interannual variability of the midsummer drought in Central America and the connection with sea surface temperatures, *Adv. Geosci.*, 42, 35-50, doi: 10.5194/adgeo-42-35-2016.

- Maldonado, T., A. Rutgersson, J. A. Amador, E. Alfaro, and B. Claremar, 2016: Variability of the Caribbean low-level jet during boreal winter: large-scale forcings. *Int. J. Climatol.*, 36, 1964-1969.
- Maldonado, T., A. Rutgersson, R. Caballero, F. S. R. Pausata, E. Alfaro, and J. A. Amador, 2017a: The role of the meridional sea surface temperature gradient in controlling the Caribbean low-level jet. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, 5903–5916, doi: 10.1002/2016JD026025.
- Maldonado, T., E. Alfaro, A. Rutgersson, and J. A. Amador, 2017b: The early rainy season in Central America: the role of the tropical North Atlantic SSTs. *Int. J. Climatol.*, 37, 3731–3742, doi: 10.1002/joc.4958.
- Mora, G, 2017: Climatology of the low-level winds over the Intra-Americas Sea using satellite and reanalysis data. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 16, 15-30.
- Moron, V., I. Gouirand, and M. Taylor, 2016: Weather types across the Caribbean basin and their relationship with rainfall and sea surface temperature. *Climate Dynamics*, 47(1-2), 601-621, doi: 10.1007/s00382-015-2858-9.
- Muñoz, E., A. J. Busalacchi, S. Nigam, and A. Ruiz-Barradas, 2008: Winter and summer structure of the Caribbean low-level jet. *J. Clim.*, 21(6), 1260–1276, doi: 10.1175/2007JCLI1855.1.
- Orvis, K. H., and S. P. Horn, 2000: Quaternary Glaciers and Climate on Cerro Chirripó, Costa Rica. *Quaternary Research*, 54, 24-37, doi: 10.1006/qres.2000.2142.
- Pierrehumbert, R. T., 2000: Climate change and the tropical Pacific: The sleeping dragon wakes. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 97, 1355–1358.
- Porter, S. C., 2001: Snowline depression in the tropics during the Last Glaciation. *Quaternary Science Reviews*, 20, 1067-1091.
- Quirós, E., and H. Hidalgo, 2016: Variabilidad y conexiones climáticas de la zona de convergencia intertropical del Pacífico este, *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 15, 21-36.
- Sadler, J. C. and Oda, L. K., 1978: The synoptic (A) scale circulations during the third phase of GATE, 20 August – 23 September 1974. University of Hawaii, Dept. Of Meteorology, Honolulu, Hawaii.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers, 2005: A description of the advanced research WRF version 2 (No. NCAR/TN-468+ STR). National Center for Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale Meteorology Div.

- Stegehuis, A. I., R. Vautard, P. Ciais, A. J. Teuling, D. G. Miralles, and M. Wild, 2015: An observation-constrained multi-physics WRF ensemble for simulating European mega heat waves. *Geoscientific Model Development*, 8(7), 2285.
- Stott, L., C. Poulsen, S. Lund, and R. Thunell, 2002: Super ENSO and Global Climate Oscillations at Millennial Time Scales. *Science*, 297, 222-226.
- Wang, C., 2007: Variability of the Caribbean low-level jet and its relations to climate. *Clim. Dyn.*, 29(4), 411–422, doi: 10.1007/s00382-007-0243-z.
- Wang, C., and S. K. Lee, 2007: Atlantic warm pool, Caribbean low-level jet, and their potential impact on Atlantic hurricanes. *Geophysical research letters*, 34(2).
- Yuan, X., X. Z. Liang and E. F. Wood, 2012: WRF ensemble downscaling seasonal forecasts of China winter precipitation during 1982–2008. *Climate dynamics*, 39(7-8), 2041-2058.
- Zehnder, J. A., G. Velazquez, and L. M. Farfán, 2000: The modulation of deep convection over the Gulf of Tehuantepec by easterly waves. *Atmósfera*, 13, 185–195.

Apéndice 1. Otros trabajos sobre el CLLJ

Al estudio de Amador (1998), siguieron los de Amador and Magaña (1999) y Amador et al. (2000), trabajos desarrollados en conjunto con investigadores mexicanos de la Universidad Nacional Autónoma de México y presentados en importantes reuniones anuales del American Meteorological Society (AMS) y publicados en los prestigiosos “Proceedings of the AMS”. Estos trabajos vinieron a extender el conocimiento sobre la importancia dinámica del CLLJ en relación con la formación de huracanes en el Caribe, sin embargo, a pesar de las presentaciones públicas y publicaciones, la comunidad científica, no logró identificar tampoco en ese momento el importante papel desempeñado por este fenómeno atmosférico como parte del proceso de interacción entre los trópicos y extra-trópicos. Sin temor a equivocaciones, podría decirse que este concepto fue ignorado por varios años antes de comenzar a ser utilizado en la explicación de algunas de las propiedades climáticas regionales.

En 1999, se utilizó este concepto de la corriente en chorro en el trabajo de Magaña, Amador y Medina (1999) para proponer una hipótesis de trabajo que explicara el denominado “veranillo” o “mid-summer drought” en la región del Pacífico de toda Centro América, el cual se presenta como una reducción en la precipitación que altera en buena medida la agricultura y otros sectores económicos de la región, como la generación de energía eléctrica. Este trabajo se publicó en el *Journal of Climate*, una revista científica de gran prestigio que ha tenido por años muy altos factores de impacto y que está en el 1% superior de todas las publicaciones científicas en las ciencias físicas. El trabajo original de Amador (1998) a pesar de estar publicado en una revista con un modesto número de lectores ha sido citado, de acuerdo a “google académico” un total de 143 veces por investigadores de Europa, Asia y las Américas.

A partir de estos artículos, Amador ha publicado como único autor o en coautoría alrededor de 50 trabajos relativos al CLLJ (ver CV del IP), algunos de ellos en revistas y libros de muy alto impacto científico como el *Bulletin of the American Meteorological Society*, el *Journal of Climate*, *Geophysical Research Abstracts*, *Progress in Oceanography*, *Annals of the New York Academy of Sciences*, *Journal of Geophysical Research*, *International Journal of Climatology*, *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, *Annual Review of Environment and Resources*, *Advances in Geosciences* y en series internacionales de libros como *Global Change Research (Kluwer)*, *Hurricanes and Climate Change (Springer)* y en publicaciones del Inter-Governmental Panel on *Climate Change (IPCC-AR4)*.

Como resultado de sus publicaciones, el IP ha ofrecido charlas y presentaciones sobre el CLLJ en Talleres Internacionales Científicos en la UNAM, en el Centro de Investigación y Enseñanza Superior de Ensenada (CICESE, México), en el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, la Universidad de Panamá, Universidad de San Carlos de Guatemala, Universidad Autónoma de Honduras, Universidad de El Salvador, Universidad Autónoma de Nicaragua, Universidad de Buenos Aires, Universidad de Vigo en España, International Center for Theoretical Physics, Trieste, Italia, International Research Institute, Columbia University, University of Arizona, University of Miami, Penn State University, en Scripps Institution of Oceanography-University of California San Diego, Universidad de Uppsala, Suecia y en foros del prestigio del American Meteorological Society, la European Geosciences Union, Unión Geofísica Mexicana, Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH), entre otras. Algunas de estas presentaciones se dieron cuando el IP fungió como miembro de distinguidos paneles científicos internacionales de experimentos como el NAME (http://www.atmo.arizona.edu/~kursinsk/papers/higginsetal2006_name-2.pdf) o el VAMOS (http://www.clivar.org/sites/default/files/documents/ICPO_166_VPM10_report_Final.pdf) e investigador de proyectos internacionales como los del Inter American Climate Change Research Institute (IAI, <http://www.iai.int/>).

Han pasado alrededor de 19 años desde la publicación de Amador (1998) sobre el CLLJ y ha sido un proceso lento y difícil, como es usual en estas disciplinas, el que se reconozca que esta publicación es pionera en el tema tratado y que CLLJ era un nuevo concepto y mecanismo atmosférico en la región, sin embargo, han comenzado a aparecer en los últimos años y cada vez más frecuentes, las citas científicas sobre esos trabajos en revistas de alto impacto y en reconocidos grupos de investigación a nivel internacional.

A partir de algunas publicaciones lideradas por el IP en la prestigiosa revista *Progress in Oceanography* en el 2006 (“Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review”) en un proyecto con investigadores mexicanos y en el *Annals of the New York Academy of Sciences* (ANYAS) para el Volumen “Trends in Climate Research” del trabajo *The Intra-Americas Low-Level Jet: Overview and Future Research*, en Octubre del 2008, se reconoce la contribución del Dr. Amador al conocimiento de la física atmosférica sobre el CLLJ y con ello al entendimiento de aspectos del cambio climático global, que hoy tiene un impacto determinante en la dinámica económica y social.

En estas investigaciones, se presenta una actualización del estado del conocimiento acerca del CLLJ y se extienden los conceptos desarrollados en trabajos anteriores al ciclo anual y a las relaciones, intensidad del CLLJ, las fases del ENOS (El Niño-Oscilación del Sur), los campos de convergencia y divergencia en niveles bajos y la precipitación en el Caribe de Centroamérica y suroeste de México y la parte central de esta masa de agua (ver como ejemplo Figs. 2 y 3). En el segundo artículo mencionado se utilizan datos obtenidos de observaciones in situ del CLLJ durante el Experimento de las Albercas de Agua Cálida en el Caribe en el 2001, para comparar la estructura vertical y termodinámica de la corriente usando observaciones y simulaciones numéricas realizadas con el modelo atmosférico MM5v3.7 inicializadas con datos de reanálisis (Kalnay et al. 1996). Estos resultados se obtuvieron mediante trabajo de campo realizado en el buque científico Justo A. Sierra de la UNAM, en colaboración con investigadores de México, Estados Unidos y Europa. Hasta donde se puede inferir de la literatura disponible, es la primera vez que aspectos de la estructura del CLLJ son simulados usando modelos numéricos atmosféricos y comparados con observaciones hechas in situ (Amador 2008).

Un elemento relevante es la relación que esta corriente tiene con otros fenómenos y mecanismos dinámicos regionales y globales como El Niño-Oscilación del Sur, el potencial desarrollo de huracanes, el transporte de humedad hacia latitudes más altas, el veranillo y la relación con la corriente en chorro de las grandes praderas en el este de los Estados Unidos, en especial con la formación de tornados (ver títulos de las publicaciones en la lista de referencias al final de este documento, por ejemplo, Muñoz and Enfield 2011). El CLLJ también contribuye como mecanismo de transporte de humedad hacia el monzón de Sur América (Amador 2008).

En relación con el CLLJ, las siguientes publicaciones, entre muchas otras, citan a Amador (1998), como el primer estudio científico en el tema, Cortez and Matsumoto (2001), Alfaro (2002), (2002), Murgia-Espinosa (2004), Ramírez (2005), Mo et al. (2005), Ashby et al. (2005), Ballesteros (2006), Bernal et al. (2006), Wang (2007), Wang and Lee (2007), Whyte et al. (2007), Alfaro (2007), Alfaro et al. (2007), Mestas-Núñez et al. (2007), Wang et al. (2007), Lizano (2007), Rauscher et al. (2008), Camargo et al. (2008), De Szoeké and Xie (2008), Muñoz et al. (2008), Hodell et al. (2008), Smith et al. (2009), Ruiz-Ochoa and Bernal-Franco (2009), Jury et al. (2009), Jury (2009), Jury and Sanchez (2009), Selkirk et al. (2010), Poveda et al. (2010), Cook and Vizi (2010), Méndez and Magaña (2010), Serra et al. 2010, Westerberg et al. (2010), Muñoz and Enfield (2011), Martin and Schumacher (2011), Diro et al. 2012, Martynov et al. 2013, Nakaegawa

et al. 2014, Yu et al. 2016, Gimeno et al. 2016 y Jury 2017. Es muy importante mencionar que Smith et al (2009), Martinov et al. (2013) y recientemente Appendini et al. (2015) e Imbach et al. (2018) atribuyen la definición del CLLJ a Amador (1998).

El IP ha sido invitado a participar “como experto en el tema” por el Editor del Journal of Climate, Dr. Eric Maloney para revisar el manuscrito de Martin and Schumacher (2011). La primera de las autoras era estudiante doctoral en Texas A&M University y en su publicación se citan ocho de las publicaciones de Amador sobre el CLLJ. El Editor Ejecutivo de Climate Dynamics, Dr. Zhaohua Wu, contactó recientemente al suscrito para que evalúe un manuscrito para potencial publicación en esta revista de un trabajo de investigadores de la Universidad de Princeton, de University Corporation for Atmospheric Research y el CNRS/CERFACS CECI UMR de Toulouse, France, sobre modelos atmosféricos y el CLLJ en la región de los Mares Intra-Americanos. En este manuscrito se citan seis de las publicaciones del IP, entre ellas las relativas al CLLJ.

Otros trabajos, disponibles en Google Scholar citan los resultados de otras investigaciones sobre el CLLJ tales como: Amador and Magaña (1999), Magaña et al. (1999), Amador et al. (2000), Amador et al. (2003), Higgins et al. (2003), Amador and Mo (2005), Amador et al. (2005), Higgins et al. (2006), Amador et al. (2006), o Amador (2008). Se hace notar que algunas de estas revistas tienen la asociación científica base en América (México y Estados Unidos) y otras en Europa.

Referencias al Apéndice

- Alfaro, E. J., 2007: Uso del análisis de correlación canónica para la predicción de la precipitación pluvial en Centroamérica. *Ing. y Comp.*, 9(2), 33-48. (<http://revistaingenieria.univalle.edu.co/>).
- Alfaro, E. J., Hernández D., and Bezanilla A., 2007: Uso de un modelo de aguas someras para analizar la influencia del Atlántico Tropical Norte y del Pacífico Ecuatorial del Este sobre la circulación atmosférica en los mares Intra-Americanos. *Rev. Clim.*, 7, 15-26. (<http://webs.ono.com/reclim/>)
- Alfaro, E. J., 2002: Some characteristics of the precipitation annual cycle in Central America and their relationships with its surrounding tropical oceans. *Top. Meteor. Oceanogr.*, 9(2), 88–103.

- Amador, J. A., and Magaña, V., 1999. Dynamics of the Low-level jet over the Caribbean Sea. Preprints 23rd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, American Meteorological Society, 10-15 January, 99, Vol. 2, 868-869.
- Amador, J. A., Magaña, V. O., and Pérez, J. B., 2000: The low level jet and convective activity in the Caribbean. Preprints 24th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, American Meteorological Society, 29 May-2 June, 114-115.
- Amador, J. A., Chacón, J. R., and Laporte, S., 2003: Climate and climate variability in the Arenal Basin of Costa Rica. In *Climate, Water and Trans-boundary Challenges in the Americas*. Ed. Henry Díaz and Barbara Morehouse. Kluwer Academic Publishers. Holland, pp. 317-349.
- Amador, J. A. and Mo, K. C., 2005: The Intra-Americas Sea Low-Level Jet. Poster Session 4: Hydrologic Variability and Monsoons. Song Yang, Chair. Poster 4.9 at the 30th Annual Climate Diagnostics & Prediction Workshop Climate Prediction Center, National Weather Service, The Pennsylvania State University October 24-28.
- Amador, J. A., Rivera, E. R., Ulate, A. M., and Zhang, C., 2005: The Intra-Americas Sea Low-Level Jet: An Analysis of Atmospheric Sounding Observations. Presented at Session 10: Monsoons and Warm Season Predictions. Jenni Evans, Chair. The 30th Annual Climate Diagnostics & Prediction Workshop Climate Prediction Center, National Weather Service, the Pennsylvania State University October 24-28.
- Amador, J. A., Alfaro, E. J., Lizano, O. G., and Magaña, V. O., 2006: Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69, 101-142.
- Appendini, C. M., Urbano-Latorre, C. P., Figueroa, B., Dagua-Paz, C. J., Torres-Freyermuth, A., Salles, P., 2015: Wave energy potential assessment in the Caribbean Low Level Jet using wave hindcast information. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.038>)
- Ashby, S. A., Taylor M. A., and Chen A. A., 2005: Statistical models for predicting rainfall in the Caribbean, *Theor. Appl. Climatol.*, DOI 10.1007/s00704-004-0118-8
- Ballesteros, D., 2006: Centros de Actividad Biológica en Informe Técnico Ambientes Marino Costeros de Costa Rica. Comisión Interdisciplinaria Marino Costera de la Zona Económica Exclusiva de Costa Rica. Ed. V. Nielsen Muñoz y M. Quesada Alpízar, 221. (In Spanish, http://www.mespinozamen.com/uploads/4/5/7/6/4576162/infome_tecnico_ambientes_marinos_cr-czee_2006.pdf#page=70).

- Bernal, G., Poveda G., Roldán P., and Andrade C., 2006: Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la costa Caribe colombiana. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 30 (115): 195-208. (In Spanish, <http://www.acefyn.org.co/PublicAcad/Periodicas/indice%2830%29.htm>).
- Camargo, S. J., Robertson A. W., Barnston A. G., and Ghil M., 2008: Clustering of eastern North Pacific tropical cyclone tracks: ENSO and MJO effects. *Geochemistry, Geophysics and Geosystems*, 9, Q06V05, doi: 10.1029/2007GC001861.
- Cortez, M. y Matsumoto J., 2001: Cambios intra-estacionales en la circulación regional sobre México, *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 6(46), 30-44
- Cook, K. H., and Vizzy, E. K., 2010. Hydrodynamics of the Caribbean Low-Level Jet and Its Relationship to Precipitation. *J. Climate*, 23, 1477–1494.
- De Szoeko, S. P. and Xie S-P., 2008: The tropical eastern Pacific seasonal cycle: Assessment of errors and mechanisms in IPCC AR4 coupled ocean-atmosphere general circulation models. *J. Climate*, 21, 2573–2590.
- Diro, G.T., Rauscher, S. A., Giorgi, F., Tompkins, A., 2012: Sensitivity of seasonal climate and diurnal precipitation over Central America to land and sea surface schemes in RegCM4. *Clim Res* 52:31-48. (<https://doi.org/10.3354/cr01049>)
- Gimeno, L., Dominguez, F., Nieto, R., Trigo, R., Drumond, A., Reason, C. J. C., Taschetto, A. S., Ramos, A. M., Kumar, R., Marengo, J., 2016: Major Mechanisms of Atmospheric Moisture Transport and Their Role in Extreme Precipitation Events, *Annual Review of Environment and Resources*, 41, 1, 117
- Higgins, W., Amador, J. A., Barros, A., Berbery, E. H., et al., 2006: The North American Monsoon Experiment (NAME) 2004 Field Campaign. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(1), 79-94.
- Imbach P., Chou S. C., Lyra A., Rodrigues D., Rodriguez D., Latinovic D., et al., 2018: Future climate change scenarios in Central America at high spatial resolution. *PLoS ONE* 13(4): e0193570. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193570>.
- Hodell, D. A., Anselmetti F. S., Ariztegui D., Brenner M., Curtis J. H., Gilli A., Grzesik D. A., Guilderson T. J., Müller A. D., Bush M. B., Correa-Metrio A., Escobar J., and Kutterolf S., 2008: An 85-ka record of climate change in lowland Central America. *Quat. Sci. Rev.*, 27, 1152-1165.

- Jury, M. R., 2009: An Intercomparison of Observational, Reanalysis, Satellite, and Coupled Model Data on Mean Rainfall in the Caribbean. *J. Hydrometeor.*, 10, 413–430.
- Jury, M. R. 2017: Spatial gradients in climatic trends across the southeastern Antilles 1980–2014. *Int. J. Climatol.* doi:10.1002/joc.5156
- Jury M. R., and Sanchez D. M., 2009: Composite Meteorological Forcing of Puerto Rican Springtime Flood Events. *Wea. Forecasting*, 24, 262–271.
- Jury M. R., Chiao, S. and Harmsen, E. W., 2009: Mesoscale Structure of Trade Wind Convection over Puerto Rico: Composite Observations and Numerical Simulation. *Boundary-Layer Meteorology*, 132 (2), 289-313, DOI: 10.1007/s10546-009-9393-3.
- Lizano, O. G., 2007: Climatología del viento y oleaje frente a las costas de Costa Rica, *Ciencia y Tecnología*, Revista de la Universidad de Costa Rica, ISSN 0378-052X, 25 (1-2), 43-56. (In Spanish, <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3062515>)
- Martin E. R., Schumacher, C., 2011: The Caribbean low-level jet and its relationship with precipitation in IPCC AR4 models. *J. Clim.* 24(22): 5935–5950, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00134.1.
- Martynov, A., Laprise, R., Sushama, L., Winger, K., Separovic, L., and Dugas, B., 2013: Reanalysis-driven climate simulation over CORpDEX North America domain using the Canadian Regional Climate Model, version 5: model performance evaluation. *Clim Dyn* (2013) 41:2973–3005. [DOI 10.1007/s00382-013-1778-9].
- Mendez, M., and Magaña, V., 2010. Regional Aspects of Prolonged Meteorological Droughts over Mexico and Central America, *J. Climate*, 23, 1175-1187.
- Mestas-Núñez, A. M., Enfield D. B. and Zhang C., 2007: Water vapor fluxes over Intra-Americas Sea: seasonal and interannual variability and association with rainfall. *J. Climate* 20: 1910-1922.
- Mo, K. C., Chelliah M., Carrera M. L., Higgins, R. W. and Ebisuzaki W., 2005: Atmospheric Moisture Transport over the United States and Mexico as Evaluated in the NCEP Regional Reanalysis. *J. Hydrometeor.* 6:710-728.
- Muñoz, E., Busalacchi A. J., Nigam, S. and Ruiz-Barradas A., 2008: Winter and Summer Structure of the Caribbean Low-Level Jet. *J. Climate* 21, 1260-1276.

- Muñoz, E., and Enfield D., 2011: The boreal spring variability of the Intra-Americas low-level jet and its relation with precipitation and tornadoes in the eastern United States, *Clim. Dyn.*, 36, 247–259. [DOI 10.1007/s00382-009-0688-3].
- Murguía-Espinosa A., 2004: *Investigação da Interface Oceano-Atmosfera na Região da Piscina de Água Quente do Pacífico Leste*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 99 p. (In Portuguese, (http://www.iag.usp.br/UserFiles/File/pos_graduacao/teses/aca/m_america_m_espinosa.p))
- Nakaegawa, T., Kitoh, A., Murakami, H., et al., 2014: *Theor Appl Climatol.*,116: 155. (<https://doi.org/10.1007/s00704-013-0934-9>).
- Poveda, G., Alvarez, D. M., and Rueda, O. A., 2010: Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: a review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Clim. Dyn.*, [DOI 10.1007/s00382-010-0931].
- Ramírez, P., 2005: *Climate, climate variability and climate change in Central America, Tropical Forest and Climate Change Adaptation (TroFCCA) project*. Consultancy Report, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica, 48 pp. (Available at http://www.cifor.cgiar.org/trofcca/america/docs/climate_change_and_climate_variability_in_central_america.pdf).
- Rauscher, S. A., Giorgi F., Diffenbaugh, N. S., and Seth, A., 2008: Extension and intensification of the Meso-American mid-summer drought in the twenty-first century, *Clim. Dynam.*, 31, 551–571, [Doi: 10.1007/s00382-007-0359-1].
- Ruiz-Ochoa, M. A., and Bernal-Franco, G., 2009: Variabilidad Estacional e interanual del viento en los datos de reanálisis NCEP/NCAR en la cuenca Colombia, mar Caribe. *Avances en Recursos Hidráulicos* ISSN (Versión impresa):0121-5701. (In Spanish, <http://redalyc.uaemex.mx/pf/1d45145012818005.pdf0/>).
- Selkirk, H. B., Vömel, H., Valverde-Canossa, J. M., Pfister, L., Diaz, J. A., Fernández, W., Amador, J. A., Stolz, W. and Peng, G. S., 2010: Detailed structure of the tropical upper troposphere and lower stratosphere as revealed by balloon sonde observations of water vapor, ozone, temperature, and winds during the NASA TCSP and TC4 campaigns, *J. Geophys. Res.*, 115, D00J19, [Doi: 10.1029/2009JD013209].

- Serra, Y., Kiladis, G., and Hodges, K. I., 2010. Tracking and Mean Structure of Easterly Waves over the Intra-Americas Sea, *J. Climate*, 23, 4823-4840.
- Smith, D., Hilburn, K., and Wenz, F. J., 2009: Characterization of a regional wind using SSM/I and QuikScat data, 16th Conference on Satellite Meteorology and oceanography, The 89th American Meteorological Annual Meeting, Phoenix,
- Wang, C., 2007: Variability of the Caribbean Low-Level Jet and its relations to climate, *Clim. Dyn.* 29:411–422, [DOI 10.1007/s00382-007-0243-z].
- Wang, C., and Lee, S., 2007: Atlantic warm pool, Caribbean low-level jet, and their potential impact on Atlantic hurricanes, *Geophysical Research Letters*, 34, L02703, [doi: 10.1029/2006GL028579].
- Wang, C., Lee, S-ki, and Enfield, D. B., 2007: Impact of the Atlantic Warm Pool on the Summer Climate of the Western Hemisphere. *J. Climate*, 20, 5021–5040.
- Westerberg, I., Walther, A., Guerrero, J-L., Coello, Z., Halldin, S., Xu, C-Y., Chen, D., and Lundin, L-C., 2010. Precipitation data in a mountainous catchment in Honduras: quality assessment and spatiotemporal characteristics. *Theor. Appl. Climatol.* 101, 381–396. [DOI 10.1007/s00704-009-0222-x].
- White, F. S., Taylor, M. A. Stephenson, T. S. and Campbell, J. D. 2013: Features of the Caribbean Low-Level Jet, *Int. J. Climatol.* [DOI: 10.1002/joc.1510].
- Yu, L., Zhong, S., Winkler, J. A., Doubler, D. L., Bian, X., and Walters, C. K., 2016: The inter-annual variability of southerly low-level jets in North America, *Int. J. Climatol.* doi: 10.1002/joc.4708.