

# M

## odelación hidrodinámica y de transporte de sedimentos en el río La Estrella, Limón

Isabel Guzmán Arias\*  
 iguzman@itcr.ac.cr  
 Fernando Watson Hernández  
 fwatson@itcr.ac.cr

La Vertiente Atlántica es una zona altamente vulnerable ante inundaciones, tanto por sus condiciones climáticas como por la topografía y cambios en el uso de la tierra de sus cuencas. La frecuencia y magnitud de los desbordamientos son una realidad que conlleva efectos sobre los cauces y las áreas más cercanas, como una permanente erosión de los márgenes; una continua deposición o almacenamiento de sedimentos; y una obstrucción del cauce. En consecuencia, se tiene la inestabilidad del cauce, que a falta de estudios y diseños adecuados de las estructuras de protección y control y la falta de mantenimiento de infraestructura conocida, aumenta la vulnerabilidad del lugar. La cuenca del río La Estrella, principalmente en el sector del Valle de la Estrella, es una de las zonas con más afectación por el impacto de las inundaciones. Esto se explica desde cuatro dimensiones: cobertura, morfología, inundaciones y biodiversidad marina.

Esta cuenca presentaba, antes del terremoto de 1991, una estabilidad relativa en la parte superior y media. Los deslizamientos provocados por el sismo generaron un desequilibrio debido a la pérdida de cobertura en las partes altas de la cuenca y la consecuente sedimentación natural. Morfológicamente, la cuenca presenta un estrangulamiento natural a la altura del poblado de Pandora, incrementando las inundaciones aguas arriba. En este mismo sector se ha observado cómo, luego de las inundaciones, el río inicia un proceso de auto-limpieza de sus riveras y fondo. Consecuentemente, el aumento de sedimentos que llega al mar ha

deteriorado los arrecifes de coral al obstruir los procesos fotosintéticos.

Una situación contraria ocurre aguas arriba del puente de Atalanta, donde el río no logra remover, una vez pasada la avenida (ola de inundación), los materiales que llegan de las partes altas durante las inundaciones. Esta situación va provocando una significativa disminución de la sección hidráulica, aumentando la vulnerabilidad de los asentamientos y actividades productivas que se encuentran a lo largo de las márgenes del río.

Por ello, es urgente entender la dinámica actual del río La Estrella con el fin de generar una herramienta confiable de prevención y diseño, capaz de contribuir en la toma de decisiones para la prevención de desastres que puedan potencializar el costo humano y productivo y, además, mejorar el cálculo de parámetros hidráulicos para el diseño de obras de protección y de infraestructura (diques, puentes, protección de márgenes, etc.).

### Hidrodinámica y transporte de sedimentos

En la Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) se ha evaluado la hidrodinámica y transporte de sedimentos en la parte baja del río La Estrella y se han establecido convenios de cooperación con instituciones públicas como la Corporación Bananera Nacional (CORBANA) y la Comisión Nacional de Atención de Riesgo y Prevención de Desastres (CNE), en coordinación con otras instituciones como el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), la Dirección de Agua del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) y la empresa privada. El objetivo del proyecto ha sido principalmente entender el comportamiento presente del río La Estrella por medio del modelado hidrodinámico y de transporte de sedimentos.

Actualmente, el grupo de investigadores continuará los estudios en los ríos Matina, Banano y Bananito, siguiendo la ruta de investigación establecida y colaborando con la atención de inundaciones en la Vertiente Atlántica por parte de la CNE.

### Metodología

#### Zona de estudio

La cuenca del río La Estrella tiene una extensión cercana a los 704 km<sup>2</sup>. Se localiza

entre las coordenadas geográficas 9°35' y 9°50' de latitud Norte y 82°50' y 83°20' de longitud Oeste. Hacia el Norte limita con la Fila Matama, donde sobresalen las estribaciones Sikorbeta, Bekotumbeta, Carbón y Tigre, y como principales tributarios se pueden citar el Suruy, Ley y el Niñey; al Sur limita con el Cerro Bobocara, Fila Suribeta y la Fila Carbón; los tributarios son el Abuy, Cerere, Seille, Duruy y el Bitey. El Valle La Estrella se ubica en la parte inferior de la cuenca con un área de aproximadamente 55 km<sup>2</sup>, superficie que representa un 7,8 % del total de la cuenca (Figura 1) (Segura y Casasola 2012).



Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca del río La Estrella, Cantón de Limón (Fuente: IGN 2011).

La modelación hidráulica abarcó un trayecto de aproximadamente 31 km (desde la desembocadura hasta el puente de Vesta) incluyendo los afluentes Abuy, Cerere, Suruy y Niñey (Figura 2).

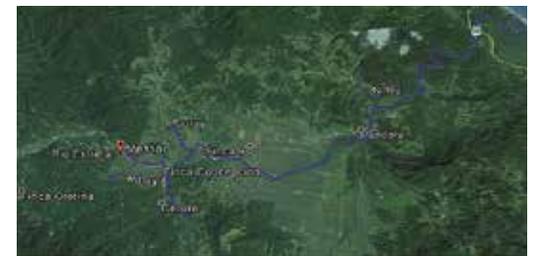


Figura 2. Ruta de modelación del río La Estrella y sus afluentes.

### Hidrología

Debido a que en la cuenca no se cuenta con estaciones meteorológicas para realizar la hidrología, se procedió a determinar los caudales máximos con los registros de caudales históricos medidos con un limnógrafo del ICE, a partir de 1991, ubicado en el puente de Pandora; los caudales que superaron la marca máxima del limnógrafo fueron calculados mediante un hidrograma sintético elaborado por ingenieros de la Standard Fruit

Company. Se utilizó como base hidrológica los caudales máximos instantáneos registrados en la Estación Hidrométrica del ICE. La estación cuenta con un registro de datos de 16 años, que contemplan las crecidas de 1991 y 1992. A estos datos se les aplicó el método estadístico de Gumbel y se obtuvieron valores para periodos de retorno de 1, 5, 10 y 17 años.

Con el fin de lograr una modelación adecuada del comportamiento del río La Estrella contemplando los caudales aportados por los afluentes, se hizo una correlación entre el área y el caudal. Esto permitió obtener caudales para los periodos de retorno antes indicados para cada una de las cuencas de los principales afluentes: río Abuy, río Cerere, río Suruy, río Ley, río Bitey, río Duruy y río Niñey.

### Modelación hidráulica

Para la modelación hidráulica del río La Estrella se utilizaron los datos de topografía facilitados por la Corporación Bananera Nacional (CORBANA), desde la desembocadura hasta el puente de Pandora y desde Finca 9 hasta el puente de Vesta. La empresa Standard Fruit Company suministró la topografía desde el puente de Pandora hasta Finca 9. Se complementó la información con las curvas de nivel a un metro del Atlas Digital 2008 y así se generó el mapa de elevación digital (DEM) de la cuenca.

**Modelación en una dimensión (1D):** La herramienta de modelación hidráulica fue el software HEC-RAS 4.1. (1D), bajo el régimen de flujo no variado, mixto y simulando eventos máximos de caudales instantáneos. La modelación hidráulica se realizó en forma continua desde el puente de Vesta hasta la desembocadura. La corriente principal del río La Estrella se subdividió en cuatro trayectos.

### Modelación en dos dimensiones (2D):

Como base del modelo hidrológico se acudió a información de diversas fuentes; los datos de lluvia se obtuvieron del proyecto Misión de Medición de Precipitaciones Tropicales conocida por sus siglas en inglés como TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), con valor de intensidad en periodos de tres horas. Mediante los polígonos de Thiessen se obtuvieron las áreas de influencia de cada uno de los puntos de información. Los hietogramas utilizados corresponden al evento de lluvia que provocó la mayor cre-

cida registrada en el limnógrafo ubicado en la localidad de Pandora y que corresponde al periodo del 30/11/2002 al 02/12/2002. El programa de modelado hidrológico utilizado es el HEC-HMS 4.2. Con este no se logra alcanzar el pico máximo de 3389,2 m<sup>3</sup>/s, pero sí se logra replicar el tiempo pico, dado que lo que se desea del modelo es obtener los hidrogramas de las nueve subcuencas para alimentar los modelos hidráulicos.

Se tomaron los hidrogramas de las nueve subcuencas y se dividieron entre el caudal pico modelado de la estación Pandora; estos fueron utilizados como hidrogramas base y guardando una relación con los caudales para diferentes periodos de retornos calculados por medio de series de datos históricos de esta misma ubicación, permitieron relacionarlos con el comportamiento de las subcuencas; por tal razón, se hizo el supuesto de que la distribución espacial y temporal de la lluvia es la misma para los diferentes eventos de crecidas extraordinarias. La obtención de los hidrogramas para cada uno de los periodos de retorno se hizo multiplicando los caudales base por el caudal correspondiente obtenido en la estación Pandora. La serie de datos utilizada comprende un total de 16 años; utilizando el método de Gumbel se hizo una extrapolación para obtener caudales para periodos de retorno de 1, 5, 10, 15, 25, 50, 75, 100 y 500.

La geometría se realizó separando las zonas por nivel de detalle, lo que significa la asignación de un tamaño de malla según la importancia de los sectores segmentados, contemplando ancho de estructuras, topografía y vulnerabilidad. La asignación de coeficientes de rugosidad se hizo de forma automática. Las coberturas se crearon en el software IBER, los coeficientes de los cauces se definieron por comparación de características con los valores obtenidos de U.S. Geological Survey.

### Transporte de sedimentos

Para la simulación de transporte de sedimentos del río La Estrella se utilizó el programa IBER 2.4.1, que permite realizar transporte en suspensión y de fondo para flujo no uniforme. El modelo de turbulencia que se utilizó es el de ecuaciones promediadas de Navier-Stokes (RANS); para la aproximación de las variables que exige el método RANS se configuró el programa IBER para utilizar el modelo k-ε, debido a que es el método más

utilizado por los programas comerciales de estudio de flujos (Pérez, 2013).

Los datos de concentración de sólidos en suspensión corresponden a la estación de Pandora. La serie inicia en 1998 y finaliza en 2009, sin tener en apariencia una distribución temporal definida. Con ellos se realizó una correlación entre caudal líquido (Ql) y concentración de sólidos en suspensión (TSS), con el fin de extrapolar y obtener estimados de TSS para los diferentes hidrogramas. Para el cálculo del D50 de los sólidos en suspensión, se determinó utilizar un diámetro representativo de 0,05 mm que representa el umbral entre arenas y limos.

## Resultados y análisis de resultados

### Modelación en una dimensión

El río La Estrella presenta en su parte alta pendientes fuertes y sección transversal tipo “V” característico de los ríos jóvenes, con energía suficiente para arrastrar sedimentos gruesos. Al ingresar al sector de la finca Valle La Estrella presenta un cambio brusco de pendiente, que pasa a ser relativamente baja; esta característica favorece la deposición de los sedimentos arrastrados desde las partes altas, lo cual disminuye significativamente la capacidad hidráulica en el sector de estudio, situación que aunada al efecto de remanso provocado por el embudo natural, ha incrementado el riesgo y la frecuencia de las inundaciones. Para un periodo de retorno de 17 años se manifiesta un nivel de agua promedio de 9 m.s.n.m. hasta aproximadamente 2000 m aguas arriba del puente de Atalanta. Se observa la formación de la curva de remanso aguas arriba del puente de Pandora que se extiende hasta unos 400 metros aguas arriba del puente de Atalanta; el origen del remanso se debe principalmente al embudo natural que se forma a partir del puente de Pandora. Este fenómeno provoca tirantes de hasta 13 metros aguas arriba.

A manera de ejemplo se muestra en la Figura 3, como resultado de la modelación, la mancha de inundación para un periodo de retorno de 17 años en el tramo llamado Trayecto 1.

Se logró identificar secciones que según la modelación hidráulica corresponden a las más críticas bajo el criterio de riesgo de desbordamiento. Cada una de estas secciones se muestra en su condición natural, es decir, sin la presencia de obras de protección o con las dimensiones actuales de ellas; también se presentan esas mismas secciones con el resultado de la colocación de alguna obra o el redimensionamiento de las existentes.

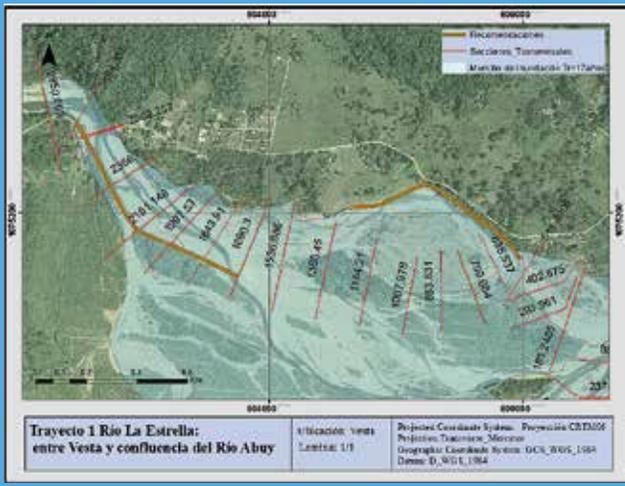


Figura 3. Planicie de inundación del tramo entre Vesta y el afluente Abuy.

**Modelación en dos dimensiones**

Los escenarios modelados con los programas Iber y Hec-Ras responden a crecidas calculadas para periodos de retorno de 1, 5, 10, 25 y 50 años, los cuales son útiles para el diseño de obras, que según sus características responderán a una probabilidad de caudal de excedencia específica. Además, la cantidad de información que se puede extraer de los modelos realizados tiene un gran rango de acción: ordenamiento territorial; diseño y construcción de obras de defensa; extracción de profundidades de inundación; áreas de vulnerabilidad; manejo agrícola; y sistemas de alerta temprana, entre otros. En el análisis comparativo de los resultados entre ambos modelos, se utilizaron los escenarios de crecidas para tiempos de retorno de 10 y 50 años. A manera de ejemplo, se muestra en la Figura 4 el resultado para un periodo de retorno de 10 años.

Al comparar el escenario de crecida para un  $T_r=10$  años, en el caso de mancha máxima de inundación se puede observar una similitud entre los modelos. La modelación con el programa Hec-Ras determina un espejo de agua de 1300,12 ha, en tanto el modelo Iber estima un espejo de agua total de 1547,50 ha, lo que representa una diferencia del 16%. Sobre los calados obtenidos con Iber, se tienen valores del rango de 0,1 a 12,47 m, con un promedio estándar de 2,27 m, en tanto la modelación utilizando el programa Hec-Ras, tiene un rango de 0,001 a 11,68 m, un promedio de 2,34 m y una desviación estándar de 2,08 m. El modelo Iber en promedio calculó tirantes en 0,30 m (11,36%) mayores que los obtenidos con Hec-Ras.

Análisis de trayectos vulnerables: La comparación del modelo mostró que los escenarios más críticos se generaron con el modelo Iber,

por lo que para el análisis de las recomendaciones generales sobre obras de defensa se utilizaron los parámetros calculados con ese programa. Los puntos que según las visitas de campo y los resultados de la modelación muestran problemas de vulnerabilidad se muestran en la Figura 5.

Las áreas delimitadas como polígonos de color púrpura se inundarán en caso de ocurrir el escenario planteado según el modelo bidimensional. Estas áreas representan 352 ha, siendo un área de amortiguamiento de gran importancia. Por ello, previamente a realizar obras de defensa, como diques, se debe realizar un análisis costo beneficio en donde se sopesa la importancia de mantener estas zonas de moderación.

**Transporte de materiales de arrastre y en suspensión**

Para simular escenarios de transporte de sedimentos con un régimen de flujo variado, se utilizó, a manera de ejemplo, el escenario de crecida para un  $T_r=25$  años; sin embargo, la modelación generada permite analizar muchos otros escenarios. El análisis estadístico de la granulometría determinó que el  $D_{50} = 0,047m$ , lo cual corresponde a las muestras tomadas en la parte alta del trayecto, desde Vesta hasta la unión del río La Estrella con el río Suruy. Con esta información se simuló el movimiento de material de la parte alta y se determinó hasta dónde la corriente puede arrastrar el sedimento de fondo para el hidrograma propuesto ( $T_r=25$  años).

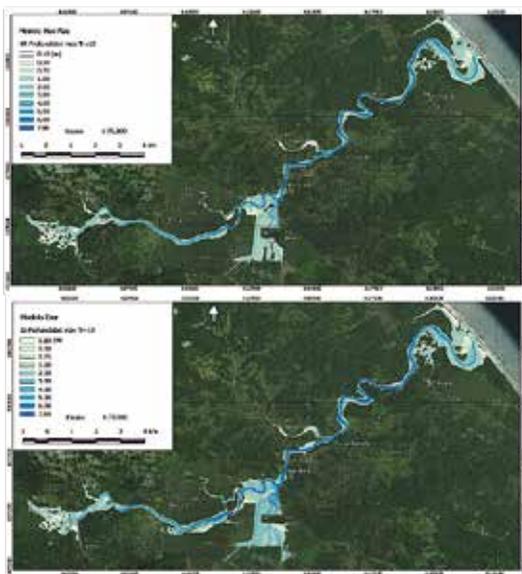


Figura 4. Profundidad máxima para un  $T_r=10$  años.

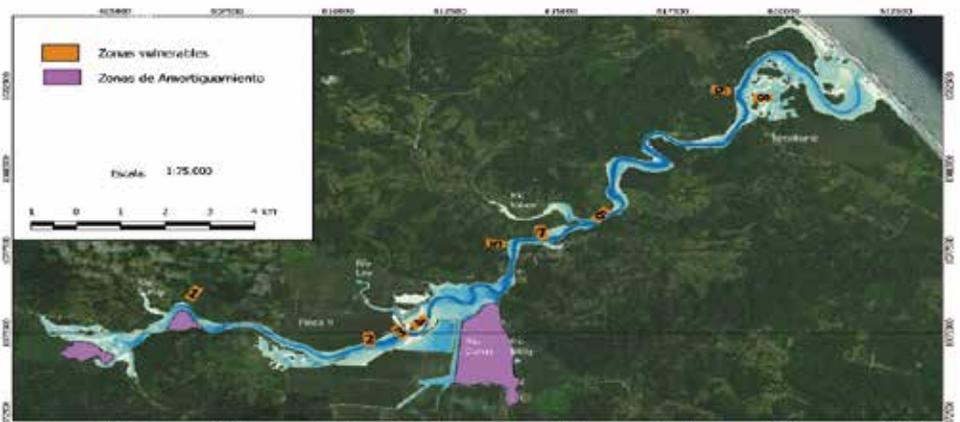


Figura 5. Zonas vulnerables a erosión o desbordamiento.

Para el transporte de material en suspensión el diámetro de partícula utilizado es de 0,00005 m, que representa el umbral entre limos y arcillas. Las concentraciones de sólidos en suspensión responden a las curvas de concentración en función del caudal. Respecto al caudal sólido de fondo ( $q_{sf}$ ), muestra una disminución de su capacidad de arrastre conforme disminuye la pendiente, ya que en Vesta muestra una gran capacidad de arrastre que progresivamente va disminuyendo entre Atalanta y Pandora. Al llegar a Niñey muestra un ligero incremento, lo cual podría deberse al cambio de la pendiente o al empuje que pueda producir el flujo de este mismo afluente.

Los procesos de sedimentación y de erosión son dinámicos, tal como lo muestra la Figura 6, donde se puede observar las zonas de erosión en rojo y las de acumulación de material en azul. Este escenario se da para los diámetros propuestos tanto de sólidos suspendidos como de fondo y se muestra el valor de erosión máxima, pero este valor es fluctuante a lo largo de la duración del evento.



Figura 6. Erosión máxima.

### Conclusiones y recomendaciones

De inundaciones en el río La Estrella se tienen antecedentes desde la década de 1960, contabilizándose según la CNE siete eventos entre 1960 y 1990 que afectaron las poblaciones del Valle de La Estrella. La problemática de inundaciones se incrementó a partir del terremoto de 1991, el cual generó una serie de transformaciones geomorfológicas de la cuenca que iniciaron una continua transformación del fondo del cauce, debido principalmente al arrastre y deposición de sedimentos que viajan desde las partes montañosas. Esta situación, aunada al cambio en el régimen de las lluvias, ha generado una mayor frecuencia y magnitud de eventos

extremos en la planicie de inundación de la cuenca y en consecuencia una mayor vulnerabilidad para la población, la actividad socioeconómica y la infraestructura civil e hidráulica.

La calibración del modelo se realizó bajo las condiciones de información de topografía suministrada por CORBANA y Standard Fruit Company, lo que requirió un proceso de ajuste mediante la generación de secciones transversales interpoladas en un tramo del río La Estrella. La validez de los resultados de la modelación se realizó de acuerdo con la información histórica registrada y mediante entrevistas de campo.

El río La Estrella mantiene un régimen muy dinámico de flujo, con cursos de agua serpenteadas (meandros) debido a las bajas pendientes presentes en la parte baja de la cuenca y con deposición de sedimentos en las partes convexas del meandro y erosión de bancos en las partes cóncavas. Esto sugiere un análisis de flujo en dos dimensiones con el fin de entender mejor la dinámica del flujo y su impacto en las obras recomendadas. Los modelos en dos dimensiones (HEC-RAS e IBER) utilizados para obtener escenarios en periodos de retorno de 10 y 50 años, permitieron identificar nueve puntos de riesgo de inundación, resultados que se complementaron con la modelación de transporte de sedimentos, donde se logró visualizar puntos de erosión y deposición de material y que eventualmente podrían estar ocasionando condiciones para intensificar los efectos de las crecidas.

Los resultados obtenidos constituyen una muestra de la amplia gama de escenarios que se pueden lograr con el modelo obtenido; entre otros, se pueden generar corridas de la modelación para diferentes caudales según periodos de retorno; se pueden visualizar velocidades de flujo, profundidades, puntos de desbordamiento, puntos de erosión, puntos de deposición de material sedimentado, combinación de diferentes variables, modelación de obras hidráulicas y caudales provenientes de proyecciones de cambio climático. El modelo será entregado bajo convenio a la CNE para su utilización en la prevención y atención de desastres.■

### Referencias bibliográficas

- Bruce, P.; Casasola, R. 2005. Diagnóstico de inundaciones Valle La Estrella. En Diagnóstico Inundaciones Valle La Estrella. Costa Rica. pp 60.
- Flumen (Instituto Flumen, Universidad de Catalunya) 2016. IBER, versión 2.4.3 Consultado: 19 abril 2016. Disponible en: <http://iberaula.es/web/index.php>
- NCCHE (National Center for Computational Hydroscience and Engineering). 2013. Sediment transport modeling. Consultado 20 abril 2013. Disponible en <http://www.nccche.olemiss.edu/research/basic/sediment>
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). 2013. Consultado 20 abril 2013. Disponible en [http://www.nauticalcharts.noaa.gov/csdl/learn\\_models.html](http://www.nauticalcharts.noaa.gov/csdl/learn_models.html)
- NWS (National Weather Service). 2007. Evaluation of different hydraulic models in support of national weather service operations: final report. Consultado 19 abril 2013. Disponible en [http://www.nws.noaa.gov/oh/rfddev/docs/Final\\_Report\\_EvaluationHydraulicModels.pdf](http://www.nws.noaa.gov/oh/rfddev/docs/Final_Report_EvaluationHydraulicModels.pdf)
- Segura, L.; Casasola, R. 2012. Modelación hidráulica aplicando Hec-Georas como una herramienta en la gestión del riesgo de inundaciones: caso río La Estrella, Limón, Costa Rica. XI Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Agraria La Molina Perú, del 7 al 9 de noviembre.
- Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) (2011), TRMM (TMPA) Rainfall Estimate L3 3 hour 0.25 degree x 0.25 degree V7, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed [Data Access Date] [https://disc.gsfc.nasa.gov/datacollection/TRMM\\_3B42\\_7.html](https://disc.gsfc.nasa.gov/datacollection/TRMM_3B42_7.html)
- USACE (US Army Corps of Engineers). 2010. HEC-RAS River Analysis System. User's Manual. Consultado 20 abril 2013. Disponible en [http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS\\_4.1\\_Users\\_Manual.pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Users_Manual.pdf)

\*Isabel Guzmán Arias es ingeniera agrícola con una maestría en Educación Técnica y un doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo con énfasis en Gestión de Recursos Naturales.

Fernando Watson Hernández es ingeniero agrícola, y está cursando una maestría en Hidrología.

Ambos son profesores del TEC en la Escuela de Ingeniería Agrícola.