



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE CIENCIAS

EVALUACIÓN DE LOS PRODUCTOS CHIRPS Y ERA5  
A PARTIR DE QUIAHUA, UNA RED DE MONITOREO  
CIUDADANO DE PRECIPITACIÓN EN CUENCAS DE  
MONTAÑA DEL CENTRO DE VERACRUZ

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

DIANA PÉREZ ALEJANDRO

TUTORA:

DRA. LYSSETTE ELENA MUÑOZ VILLERS

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, 2022





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**Datos de la alumna**

Pérez  
Alejandro  
Diana  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Ciencias de la Tierra  
314126003

**Datos de la tutora**

Dra.  
Muñoz  
Villers  
Lyssette Elena

**Datos de sinodal 1**

Mtro.  
Jaimes  
Martínez  
Orlando

**Datos de sinodal 2**

Dra.  
Domínguez  
Sarmiento  
Christian

**Datos de sinodal 3**

Dr.  
Zúñiga  
Tovar  
Angel Emmanuel

**Datos de sinodal 4**

Dr.  
León  
Cruz  
José Francisco

**Datos del trabajo escrito**

Evaluación de los productos CHIRPS y ERA5 a partir de Quiahua, una red de monitoreo ciudadano de precipitación en cuencas de montaña del centro de Veracruz  
72 pp.  
2022

*"Puedes abrir con un suspiro la puerta que haya cerrado el huracán"*  
*–Vicente Huidobro*

# Agradecimientos

## 0.1. Institucionales

A mi directora de tesis la Dra. Lyssette Elena Muñoz Villers, por orientarme en esta última fase de mi licenciatura y mostrarme la belleza que yace en la hidrología.

Al Dr. Angel Emmanuel Zúñiga Tovar, profesor de la asignatura Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica quien con su disposición y experiencia me asesoró durante durante todo el proceso de la presente tesis.

A mis sinodales: M. en C. Orlando Jaimes Martínez, Dra. Christian Domínguez Sarmiento, Dr. Angel Emmanuel Zúñiga Tovar y Dr. José Francisco León Cruz, por tomarse el tiempo de leer mi trabajo y hacer posible entregar la mejor versión del mismo.

Asimismo, quiero agradecer a los y las integrantes del proyecto Quiahua. Collaborative research: The role of citizen science in watershed hydrology research: relationships between volunteer motivations, data quantity and quality, and decision-making, financiado por la NSF, EUA. Citizen Science and Crowdsourcing Public Participation in Engineering Research (No. 1644860), 2017-2019. A los coordinadores del mismo: la Dra. Lyssette Muñoz Villers (ICAyCC, UNAM), al Dr. Alex Mayer (Universidad de Texas, EUA), al Lic. Carlos Lezama (Universidad Veracruzana) y a la M. en C. Miriam Ramos (Global Water Watch Mexico). A los y las voluntarias que realizaron las mediciones comprendidas en el periodo del presente estudio: María Felicitas Cortina Morales, José Valente Ceballos C., Martín Sangabriel Sangabriel, Maria Antonia Monfil Durán, Rogelio Macías, Raquel Cervantes Alday, Laura González Oliveros, María Luisa León Mateos, Balam Kim Ávila Ochoa, Pakal Moyrón Castillo, Cecilia Castillo, Teúl Moyrón, Britta Shafer, Wendy Vidal, Eduardo Aranda Delgado, Cecilia Ivonne Oviedo Contreras, Oscar Prieto Uscanga y Sebastián Ricalde González. A la Lic. Melissa López-Portillo Purata y al Lic. Luis Jesús Olvera Lazcano por trabajar la base de datos de Quiahua y permitir que trabajos como el presente pudiesen ser posibles.

Al Apoyo Especial del Fondo del ICAyCC para Titulación, por permitirme recibir un apoyo económico durante el proceso de titulación.

Finalmente, agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, en particular a la Facultad de Ciencias, por haberme permitido realizar mis estudios en Ciencias de la

Tierra.

## 0.2. Personales

A veces el universo musicaliza los momentos con las palabras exactas; mientras realizaba el último paso de esta tesis escuchaba una canción de Benito di Paula que dice:

*“Sueño que soy verso,  
soy tierra,  
soy Sol,  
sentimiento abierto.  
¡Ah, como yo amé!,  
¡Ah, yo caminé!”*

Comprendí que cada una de esas palabras describen mi manera de transitar esto que llamamos vida –al menos hasta el momento presente–. Cuántas veces he soñado que soy agua y me deslizo por doquier, cuántas veces he tenido que ser tierra para permanecer y arraigarme a mis propias ilusiones. Cuántas veces he decidido amar para hacer mi caminar más ligero.

Terminar esta fase se siente como terminar una ruta de senderos, extensa y agotadora. ¡Terminé! Terminé con ilusiones y desilusiones, amores y desamores. Terminé siendo alguien muy diferente. . . al final de cuentas mientras caminé crecí y aprendí, pero por sobre todas las cosas, amé.

Es por ello que, quiero abrir un espacio muy especial en este trabajo para hablar de todas aquellas personas que me han sostenido y amado durante esta etapa de mi vida pues sin ellas la vida no sería una bella poesía:

Quiero empezar con mi familia y en particular quiero comenzar con una persona muy especial que ya no está conmigo, mi abuelita, mi mujer-inspiración, a ti, te dedico cada uno

de mis logros y aunque estés lejos sé que los celebras muy cerquita de mi corazón. También quiero agradecerle a mis papás: Jorge y Rosario que me han amado incondicionalmente y me han apoyado a cada paso, gracias por ser mi sostén y por darme los ánimos que a veces me faltan, sin ustedes nada de esto sería posible. A mi hermano Manuel que es mi cómplice y mi mejor amigo, gracias por hacer mi vida más divertida. A mi tía Chofi, mi segunda mamá, gracias por endulzar mi corazón de una forma tan única y por enseñarme lo que es la nobleza. A mi tía Bertha por apoyarme y echarme porras en cada pasito que doy y a mi tío Miguel por apoyarme y enseñarme que el mundo es mucho más grande de lo que pensamos. A mi tía Aida, gracias por las risas y los días de playa. A Cooky, mi compañerita por más de 14 años, quien me dio todo su amor, cariño y me enseñó a mirar la vida con ternura.

Me gustaría proseguir con la familia que elegí hace muchos años. Quiero dar un agradecimiento muy especial a mis amigas amadas de la infancia: Karla y Nicole, gracias por enseñarme lo que es una amistad y por inyectarle a mi vida tanta emoción y amor desde que somos bebés; sin importar qué tanto cambie la vida, sé que siempre estaremos juntas. A Camila y Frida, mis compañeras de lucha y mi hermanas, gracias Cami por enseñarme lo que es la resiliencia y demostrarme que la poesía está en el mirar distinto. Gracias Frida por enseñarme que el amor no tiene límites y que la magia está en todas partes. A Sergio por ser un gran amigo, gracias por las risas, las pláticas y el cariño. A Carlos de Pedro, mi maestro de teatro y de la vida, gracias por enseñarme a ver el mundo con otros ojos y por enseñarme a confiar en mi propia voz.

Quiero agradecer también a las personas que conocí en la universidad y se volvieron una casita para mí. Quiero empezar por Raúl, la persona que me inspiró a estudiar esta carrera, gracias por ser el mejor tutor, por ser mi amigo y mi inspiración, me llena de emoción poder llamarte colega. A mi hermosa Renee, sin tu amor y dulzura esta etapa no habría sido tan especial, gracias por el arte, las pláticas y ser la mejor amiga que me pude dar esta carrera. A mi amado Luis Lazcano, gracias por la historias compartidas, por enseñarme tanto del amor y la amistad y por amarme de una manera tan dulce, única y especial. A mi profesor favorito y amigo Jorge Avella, gracias por hacer que las matemáticas fueran

divertidas y por compartir tantos conciertos a mi lado. A Esteban por ser mi compañero de baile y un gran amigo. A Louis, por siempre estar dispuesto a compartir una bella plática y un vino blanco. Al Dr. Fermín Viniegra, un gran físico, profesor y amigo, gracias por ser inspiración, la ciencia sin personas como usted, simplemente no tendría sentido.

Finalmente, quiero agradecer a las personas que forman parte de esta última etapa. A Luis Poblett, uno de los músicos más talentosos que conozco y uno de los mejores amigos que uno pudiera pedir, gracias por la música, las risas y las patadas. A Néstor, gracias por escucharme y entenderme de una forma tan especial, fue un regalo de la vida volver a coincidir. A Daniel, mi maestro de Capoeira y mi amigo, gracias por el cariño, la música y los juegos.

Podría escribir una tesis completa de las personas que amo, pero eso sería otra historia. Por ahora, cierro este capítulo de mi vida recordando y agradeciendo que como amé, caminé...



# Resumen

Las regiones montañosas, al ser fuente de agua de ríos alrededor del mundo, son sistemas que guardan una relación privilegiada con el agua a nivel epicontinental. Por ello, ante la crisis hídrica actual, existe una creciente necesidad de desarrollar herramientas que permitan monitorear las variables hidrometeorológicas, en particular la precipitación, que destaca por ser la principal componente del ciclo hidrológico.

Aunque es una variable relativamente sencilla de medir a través de pluviómetros, las montañas se distinguen por ser zonas de bajo monitoreo al demandar una mayor instrumentación para representar adecuadamente el gradiente microclimático que caracteriza dichos sistemas. De esta forma, las estimaciones indirectas de precipitación mediante herramientas satelitales y modelos numéricos se posicionan como una excelente alternativa para realizar estudios de carácter hidrometeorológico.

Debido a ello, en las últimas décadas se han desarrollado diversos productos que proveen información de precipitación a nivel global y cuasiglobal con alta resolución espaciotemporal, los cuales de manera general pueden dividirse en dos grupos principales: (1) productos satelitales como CHIRPS, CMORPH, PERSIANN y TRMM y (2) productos de reanálisis, siendo algunos ejemplos ERA5, MERRA y CFSR.

A pesar de ser accesibles al público general y fácilmente aplicables, diversos autores han reportado que el desempeño de los mismos varía en función del contexto —ubicación, topografía, etc.—, condiciones propias del instrumento, efectos del ambiente y los principios utilizados por los algoritmos. Es por ello que cada vez se reconoce más la importancia

que yace en los estudios que evalúan productos de estimación de precipitación, previo a su aplicación. En este contexto, la Ciencia Ciudadana emerge como una alternativa viable —tanto operacional como económicamente— para cuantificar la precipitación en zonas de montaña, lo cual posibilita la evaluación de distintos productos y en consecuencia la correcta aplicación de los mismos.

Dicho lo anterior, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño del producto satelital CHIRPS y el de reanálisis ERA5 a partir de Quiahua, una red de monitoreo ciudadano en dos cuencas de montaña del centro de Veracruz, México (Los Gavilanes y Pixquiac), de cuyo suministro dependen en gran medida las ciudades de Xalapa y Coatepec.

Las evaluaciones de ambos productos se realizaron utilizando datos de lluvia de aproximadamente tres años (9 de junio de 2017 a 30 de mayo de 2020) e índices de estadística pareada (coeficiente de correlación de Spearman ( $\rho$ ), NSE, ME y PBIAS) y categórica (POD, FAR y CSI), los cuales permitieron describir la capacidad que tienen ambos productos en estimar la precipitación a escala diaria y mensual, así como su desempeño en la detección de distintos tamaños de lluvia (Normal, Lluvioso, Muy Lluvioso y Evento Extremo) durante la estación de lluvias y la relativamente seca.

En primera instancia, los resultados exhibieron el potencial que tiene la Ciencia Ciudadana en el campo de la hidrología, en particular para estudios de evaluación —como el presente—. Respecto a los productos de precipitación, ambos tendieron a la subestimación de lluvia en el área de estudio. No obstante, ERA5 demostró ser un mejor hidroestimador que CHIRPS, mostrando buenos resultados a nivel mensual y una buena capacidad de detección para el 75 % de las lluvias (“Normales”), tanto en la estación de lluvias como en la relativamente seca. CHIRPS en cambio, mostró ser un producto con muchas limitaciones en el área de estudio, al obtener resultados insuficientes para todas las pruebas. De esta forma, el presente estudio evidencia la necesidad de contar con productos especializados en la estimación de precipitación en regiones con topografía accidentada, así como de más proyectos que permitan aumentar la cobertura de monitoreo *in situ*.

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>II</b>
§0.1 Institucionales . . . . .	II
§0.2 Personales . . . . .	III
<b>Resumen</b>	<b>VI</b>
<b>Acrónimos y abreviaciones</b>	<b>XII</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
§1.1 Antecedentes . . . . .	1
§1.2 Planteamiento del problema . . . . .	3
§1.3 Motivación . . . . .	4
§1.4 Objetivos . . . . .	5
<b>2 Marco teórico</b>	<b>6</b>
§2.1 Las montañas y su importancia hidrológica . . . . .	6
§2.2 Precipitación . . . . .	7
§2.3 Estimación de precipitación . . . . .	8
§2.3.1 Pluviómetros . . . . .	8
§2.3.2 Percepción remota . . . . .	9
2.3.2.1 VIS/IR . . . . .	10
2.3.2.2 Microondas con sensores pasivos . . . . .	13
2.3.2.3 Radares Meteorológicos . . . . .	14
§2.3.3 Productos basados en datos satelitales . . . . .	15
§2.3.4 Productos de reanálisis . . . . .	16

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	IX
§2.4 Ciencia Ciudadana . . . . .	17
§2.4.1 Aplicaciones en hidrología . . . . .	18
<b>3 Metodología</b>	<b>19</b>
§3.1 Área de estudio . . . . .	19
§3.2 Información de precipitación . . . . .	21
§3.2.1 Red de ciencia ciudadana Quiahua . . . . .	21
§3.2.2 CHIRPS . . . . .	23
§3.2.3 ERA5 . . . . .	26
§3.3 Procesamiento de datos . . . . .	27
§3.3.1 Interpolación para zonas de montañas: CHIRPS . . . . .	27
§3.3.2 ERA5 . . . . .	29
§3.3.3 CHIRPS . . . . .	30
§3.4 Métodos de evaluación . . . . .	31
§3.4.1 Estadística pareada . . . . .	31
3.4.1.1 Coeficiente de correlación de Spearman . . . . .	32
3.4.1.2 Índices de Criterio de Eficiencia . . . . .	34
§3.4.2 Estadística categórica . . . . .	35
<b>4 Resultados</b>	<b>39</b>
§4.1 Precipitación en las cuencas Los Gavilanes y Pixquiac . . . . .	39
§4.2 Eficiencia de la estimación de lluvia mediante estadística pareada. . . . .	42
§4.2.1 Correlación de Spearman . . . . .	42
§4.2.2 Error medio y sesgo porcentual . . . . .	44
§4.2.3 Eficiencia de Nash-Sutcliffe . . . . .	47
§4.3 Eficiencia de estimación en función del tamaño de lluvia . . . . .	48
<b>5 Discusión</b>	<b>52</b>
§5.1 Precipitación en las cuencas de estudio . . . . .	52
§5.2 Desempeño de CHIRPS y ERA5 en la estimación de lluvia diaria y mensual	53
§5.3 CHIRPS y ERA5: capacidad de detección de distintas categorías de lluvia .	56

<b>6 Conclusiones</b>	<b>61</b>
Referencias . . . . .	63

# Índice de figuras

2.1 Técnicas VIS/IR . . . . .	12
3.1 Área de estudio . . . . .	20
3.2 Etapas en la elaboración de CHIRPS . . . . .	25
3.3 Interpolación para zonas de montañas . . . . .	29
3.4 Resolución espacial de CHIRPS vs ERA5 . . . . .	30
4.1 Precipitación diaria a partir de los datos de Quiahua y los datos proporcionados por la CONAGUA en las cuencas de los ríos Los Gavilanes y Pixquiac durante el año hidrológico: junio de 2017 a abril de 2018. . . . .	40
4.2 Precipitación diaria a partir de los datos de Quiahua y los datos proporcionados por la CONAGUA en las cuencas de los ríos Los Gavilanes y Pixquiac durante el año hidrológico: mayo de 2018 a abril de 2019. . . . .	41
4.3 Precipitación diaria a partir de los datos de Quiahua y los datos proporcionados por la CONAGUA en las cuencas de los ríos Los Gavilanes y Pixquiac durante el año hidrológico: mayo de 2019 a mayo de 2020. . . . .	42
4.4 Gráficos de dispersión de los valores de precipitación (en mm) reportados por los productos CHIRPS' (estaciones), CHIRPS'' (CHIRPS promedio) y ERA5 vs las mediciones de los pluviómetros manuales de la red de monitoreo ciudadano Quiahua a nivel diario. . . . .	43
4.5 Gráficos de dispersión de los valores de precipitación (en mm) reportados por los productos CHIRPS' (estaciones), CHIRPS'' (CHIRPS promedio) y ERA5 vs las mediciones de los pluviómetros manuales de la red de monitoreo ciudadano Quiahua a nivel mensual. . . . .	44

4.6	Error medio de la estimación diaria de lluvia de los productos CHIRPS' (estaciones), CHIRPS'' (CHIRPS) y ERA5 (en mm). . . . .	46
4.7	Error medio de la estimación mensual de lluvia de los productos CHIRPS' (estaciones), CHIRPS'' (CHIRPS) y ERA5 (en mm). . . . .	46
4.8	Sesgo porcentual en la estimación diaria y mensual de los productos CHIRPS' (estaciones), CHIRPS'' (CHIRPS) y ERA5. . . . .	46
4.9	Eficiencia de Nash-Sutcliffe para los productos satelitales CHIRPS' (estaciones), CHIRPS'' (CHIRPS) y ERA5 . . . . .	48

# Acrónimos y abreviaciones

- CC: Ciencia Ciudadana
- CONAGUA: Comisión Nacional del Agua
- CSI: Índice de éxito crítico
- FAR: Proporción de falsa alarma
- F.F: Frente frío
- H: Huracán
- ME: Error medio
- NSE: Eficiencia de Nash-Sutcliffe
- O.T: Onda tropical
- PBIAS: Sesgo porcentual
- PMW: pasivo microondas
- POD: Probabilidad de detección
- PR: Percepción Remota
- RADAR: Sistema de Radio Detección y Telemetría
- T.T.: Tormenta tropical
- VIS/IR: Visible/infrarrojo

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes

“Una amenaza a la que se enfrentará la población mundial en el futuro próximo es el acceso al agua dulce en cantidad suficiente y calidad adecuada. Como resultado, las montañas que tienen una relación privilegiada con el agua como fuente de los ríos más grandes, estarán bajo una presión creciente” (Wiegandt, 2008). Aunado a esto, la vulnerabilidad de estas regiones frente al cambio climático (Kholer et al., 2014; Egan & Price, 2014), así como los retos logísticos y económicos que implica su monitoreo, posiciona a las montañas en el ámbito científico y político como un espacio de vital importancia.

Dicho lo anterior, los esfuerzos internacionales han centrado su interés en desarrollar herramientas que permitan monitorear las variables hidrometeorológicas principales en los sistemas montañosos a escalas espacio-temporales adecuadas para su caracterización, protección y gestión. Puesto que uno de los componentes más importantes es la precipitación, su cuantificación y el estudio de su distribución es fundamental (Q. Tang et al., 2009).

Dentro de las herramientas más destacadas son los productos satélites (CHIRPS, CMORPH, PERSIANN, TRMM, etc.) y de reanálisis (ERA5, CFSR, MERRA, etc.), los cuales proveen información abundante con un alta resolución espacio-temporal para una amplia gama de regiones donde los monitoreos convencionales de precipitación son escasos



o nulos (Su et al., 2008). No obstante, dichas estimaciones tienen diversas limitaciones, pues su precisión se ve alterada por condiciones propias del instrumento (errores sistemáticos, envejecimiento del dispositivo, etc.), efectos del ambiente (incertidumbre por la reflectancia y emisividad térmica, errores topográficos, etc.) y los principios utilizados en los algoritmos (Yu et al., 2020).

Los productos que estiman la precipitación, actualmente combinan información de sensores térmicos infrarrojos y sensores pasivos de microondas —TIR/PMW— con mediciones *in situ*, modelos numéricos de campos de lluvia, etc. Pese a ello, estudios como el de Yu et al. (2020) han demostrado que su fiabilidad varía según la región. Es por ello, que la validación de los mismos en diferentes escenarios topográficos y climáticos es imprescindible para su correcta aplicación. En este contexto, los proyectos de Ciencia Ciudadana (CC) se posicionan como estrategias rentables tanto operacional como económicamente para generar bases de datos de precipitación que consten de mayor precisión (Njue et al., 2019) y permitan validar y acotar la aplicabilidad de las diferentes herramientas de estimación remota.

Según la revisión realizada por Njue et al. (2019), en las últimas décadas los estudios hidrológicos basados en CC han ido en aumento y se han enfocado la mayor parte de ellos (63 %) al monitoreo de calidad de agua, desarrollándose con mayor ímpetu en regiones de latitudes medias como Estados Unidos (45 %) y Europa (20 %). En cuanto al monitoreo ciudadano de la precipitación, los proyectos más destacados a nivel internacional son: (a) la Comunidad Colaborativa de Lluvia, Granizo y Nieve —CoCoRaHS por sus siglas en inglés— que resalta por su alta cobertura espacial (Estados Unidos y Canadá), eficiencia y tiempo de operación (desde 1998) y (b) la Red Comunitaria de Lluvia de Reino Unido —UCRaiN por sus siglas en inglés— basada en CoCoRaHS (Njue et al., 2019).

## 1.2. Planteamiento del problema

Las montañas destacan por ser sistemas que presentan gran heterogeneidad espacio-temporal en sus patrones hidrológicos, meteorológicos y climáticos (Viviroli & Weingartner, 2008), los cuales comúnmente están poco representados en las redes de monitoreo debido a que la cobertura suele ser insuficiente tanto en su densidad, representatividad espacial y tiempo de operación (Viviroli & Weingartner, 2004; McVicar et al., 2007b, 2010).

Debido a que la información in situ muchas veces no goza de la calidad suficiente para representar adecuadamente la precipitación en zonas de montañas, cada vez es más común la aplicación de herramientas que estiman precipitación vía remota —mediante sensores TIR/PMW—. No obstante, se ha reportado que dichas herramientas enfrentan distintos retos y limitaciones en zonas de montaña (Dinku et al., 2007; Yu et al., 2020). Para el caso de los sensores TIR, el reto principal está vinculado con el umbral de temperatura de tope de nube utilizado por los algoritmos, el cual es demasiado frío para las nubes orográficas. En cuanto a los sensores PMW las dificultades radican en que la información de lluvia se basa en la dispersión del hielo, el cual no está siempre presente en las lluvias orográficas. Además, las superficies frías y cubiertas por hielo pueden ser confundidas con lluvia, siendo ésta otra fuente de error (Dinku et al., 2007).

La poca o incorrecta representación de la precipitación, sumada a las tensiones políticas, decantan en estrategias deficientes para el uso adecuado de la tierra y gestión de los recursos hídricos (Wechsler & Kroll, 2006; Viviroli et al., 2004). Para enmendar dichos inconvenientes, autores como Ramírez et al. (2017), mencionan que deben realizarse estudios hidrometeorológicos locales, así como evaluar las interacciones de estos sistemas en contextos hidrometeorológicos más amplios. A la vez, se ha destacado la imperante necesidad de realizar una validación rigurosa de los productos satelitales y de reanálisis de alta resolución que estiman lluvia en terreno complejo, con la finalidad de mejorar la aplicabilidad de los mismos (Rivera et al., 2019), no obstante los estudios a escalas espaciales locales, aún son escasos.

### 1.3. Motivación

Desde una perspectiva hidrometeorológica, las regiones tropicales son de suma importancia, al ser zonas que se caracterizan por presentar la mayor cantidad de lluvias a nivel global, debido a la predominancia de fenómenos tropicales como: la zona de convergencia intertropical (ZCIT), las ondas del este, los ciclones tropicales y las ondas tropicales atrapadas en los trópicos. A su vez, destacan por su riqueza biológica, fungiendo como importantes bancos genéticos. Pese a ello, geopolíticamente hablando, los países que conforman las regiones tropicales están calificados en su mayoría como países en vías de desarrollo, en donde impera una amplia gamma de problemas sociales, económicos y ambientales.

Sumado a lo anterior, el problema hídrico actual, se acentúa en contextos de precarización, donde la gestión de los recursos hídricos es mayoritariamente ineficiente, tanto por el bajo nivel de gobernabilidad, como por la falta de datos que permiten caracterizar y entender en consecuencia los distintos escenarios climáticos y topográficos de éstas latitudes.

De esta forma, la realización de estudios que faciliten la caracterización en regiones tropicales es imprescindible, en especial aquellos que aborden zonas de terreno complejo, como las montañas, que pese a su importancia continúan siendo espacios de bajo monitoreo, entendimiento y regulación.

Así, la motivación principal del presente trabajo de investigación fue hacer uso de los datos de Quiahua, el primer proyecto de monitoreo ciudadano de lluvia en México, el cual registra la precipitación en dos cuencas tropicales de montaña ubicadas en la zona centro del estado de Veracruz —escala local— desde junio de 2017 hasta la fecha ([Shinbrot et al., 2020](#)). Esto con el objetivo de evaluar de qué manera se pueden aplicar las herramientas de estimación de precipitación vía remota en el área de estudio, con el fin de generar más y mejores estrategias para la gestión integral del agua en estos ecosistemas.

Al ser un trabajo pionero en la evaluación de productos de estimación vía remota a partir de redes de monitoreo ciudadano, se pretende destacar en primer lugar el potencial que tiene la Ciencia Ciudadana como fuente de conocimiento en el campo de la hidrología —principalmente a nivel local—. A su vez, se busca contribuir a la búsqueda de alternativas que permitan mejorar la cobertura y entendimiento de la precipitación en contextos de topografía compleja.

## 1.4. Objetivos

### Objetivo general

- Evaluar el desempeño del producto satelital CHIRPS y el de reanálisis ERA5 a partir de Quiahua, una red de monitoreo ciudadano en dos cuencas de montaña del centro de Veracruz, México (Los Gavilanes y Pixquiac), de cuyo suministro dependen en gran medida las ciudades de Xalapa y Coatepec.

### Objetivos específicos

- Caracterizar la precipitación en las cuencas Los Gavilanes y Pixquiac durante el periodo de estudio a partir de los datos de precipitación generados por Quiahua.
- Evaluar el desempeño de los productos CHIRPS y ERA5 para estimar la precipitación a diferentes escalas temporales: diaria y mensual.
- Mediante distintos índices de estadística categórica (POD, FAR y CSI) evaluar la capacidad de detección de distintos tamaños de lluvia (normal, moderadamente lluvioso, muy lluvioso, evento extremo) de los productos CHIRPS y ERA5.

# Capítulo 2

## Marco teórico

### 2.1. Las montañas y su importancia hidrológica

Las montañas se definen como una forma topográfica del relieve que se caracteriza por su altitud y pendiente, de manera que constan de gradientes microclimáticos abruptos y diversos patrones hidrológicos (Viviroli & Weingartner, 2004).

Viviroli y Weingartner (2004) mencionan que a pesar de que es indiscutible que elevaciones iguales o mayores a 2,500 msnm son montañas, para elevaciones menores no existe un consenso que acote la altitud y gradiente de las montañas a nivel mundial. Esto se debe a que el efecto de la altitud varía con las condiciones locales, así como con la masa de la montaña, la circulación global y la continentalidad.

Desde una perspectiva hidrológica, las montañas son de suma importancia ya que al presentar tasas de precipitación altas y bajas tasas evapotranspiración generan una importante escorrentía en comparación con las tierras bajas (Kholer et al., 2014). Además, la mayor parte de los ríos del planeta surgen de estas regiones, provyendo de agua dulce tanto a las partes altas como bajas del sistema montañoso (Viviroli et al., 2004). Debido a lo anterior, las montañas forman parte de lo que en el campo de la hidrología se conoce como "*Torres de Agua*", las cuales se definen como regiones que proveen cantidades importantes de agua a las zonas bajas, debido a sus altos rendimientos hídricos y agua

disponible en cantidad y calidad (Viviroli & Weingartner, 2004; Kholer et al., 2014).

A pesar de que se reconoce la importancia hidrológica de las montañas, autores como Rodda (1994) resaltan que aún existen muchos sesgos en el entendimiento de estos sistemas a nivel mundial. Esto se debe a que al ser zonas que presentan alta variabilidad temporal y espacial, demandan una gran cantidad de recursos humanos y económicos para su monitoreo (Viviroli et al., 2004).

## 2.2. Precipitación

Según Davie (2008) se define como precipitación al agua que tras ser liberada desde la atmósfera llega a la superficie terrestre. De esta manera, el término precipitación incluye lluvia (gotas de agua líquida con diámetros entre los 0.5 y 0.7 mm), nieve (aglomeraciones de cristales de hielo), granizo (bolas de hielo con diámetros entre los 5 y 125 mm), agua-nieve (combinación entre lluvia y nieve) y llovizna (gotas de agua con diámetros menores a 0.5 mm) .

En primera instancia, la ocurrencia de precipitación depende de la capacidad que tiene el aire en alta tropósfera para retener vapor de agua; mientras más frío sea el aire menos vapor de agua es retenido y más favorable es la condensación. Existen distintos mecanismos en la atmósfera que pueden ocasionar que una parcela de aire se enfríe, sin embargo la más común es resultado del ascenso de una parcela a través de la atmósfera. Este ascenso puede darse por diferentes razones: (a) debido al gradiente de densidad que deriva del calentamiento en superficie (precipitación convectiva), (b) forzamiento orográfico (precipitación orográfica), (c) existencia de un sistema de baja presión (precipitación ciclónica) y (d) la convergencia de dos masas de aire de distinta temperatura (Davie, 2008).

Además de las condiciones térmicas previamente mencionadas, para que la precipitación acontezca también son necesarios los núcleos de condensación, los cuales son partículas diminutas (con diámetros menores a 1  $\mu\text{m}$ ) donde el vapor de agua se condensa formando

agua o hielo que posteriormente crece hasta tener la suficiente masa ( $\approx 3,000 \mu\text{m}$ ) para que la fuerza gravitacional supere las fuerzas de elevación dentro de una nube y por ende precipite (Davie, 2008).

La precipitación es uno de los principales componentes del ciclo hidrológico y está estrechamente relacionada con la circulación de la atmósfera a través de la liberación de calor latente, así como con la salinidad del océano (a nivel superficial). Por ello, es una variable de vital interés en campos como la hidrología, las ciencias atmosféricas y la oceanografía —tanto física como biológica— (Michaelides et al., 2009). Además, al ser el componente principal del ciclo hidrológico en los sistemas epi-continetales (Q. Tang et al., 2009), funge como suministro primario de agua dulce y la fuente principal de recarga superficial y subterránea, por lo que su importancia adquiere dimensiones sociales, políticas y económicas (Michaelides et al., 2009). En el caso de las regiones tropicales, la lluvia es la entrada principal de agua, por lo que el monitoreo de esta variable cobra una relevancia fundamental en el entendimiento del ciclo del agua en una región.

Por lo anterior, distintos productos satelitales, radares, redes de monitoreo *in situ* y productos de reanálisis han centrado su interés en desarrollar modelos y estrategias de estimación<sup>1</sup> que permitan contar con series de tiempo fiables de precipitación a nivel global<sup>2</sup>.

## 2.3. Estimación de precipitación

### 2.3.1. Pluviómetros

Un pluviómetro es un dispositivo —manual o automático— que colecta la precipitación en un embudo<sup>3</sup> para ser posteriormente medida. A diferencia de instrumentos como

---

<sup>1</sup>Al ser un parámetro que presenta variaciones espaciales importantes incluso en áreas pequeñas, toda técnica de medición es en realidad una técnica de estimación (Michaelides et al., 2009)

<sup>2</sup>Los ejemplos de productos de estimación de precipitación, reanálisis y redes de monitoreo se desarrollarán en los siguientes capítulos.

<sup>3</sup>El modelo estándar está conformado por un embudo de un material antiadherente, como es el cobre, con una orilla empinada (Davie, 2008).

los disdrómetros, los pluviómetros no cuentan ni miden el tamaño de las gotas de forma individual, sino que cuantifican la precipitación acumulada en milímetros, pulgadas y con menor frecuencia en unidades de volumen (Davie, 2008; Strangeways, 2006). El fundamento de estos instrumentos recae en el hecho de que el volumen de precipitación acumulada durante un tiempo determinado, representa la columna de agua en superficie (Michaelides et al., 2009) si se desprecian los procesos de infiltración y escurrimiento (Shaw, 1998).

Existen distintos tipos de pluviómetros como son los de pesaje, acumulación, ópticos, de balancín, manuales, etc. Michaelides et al. (2009). Atendiendo a los objetivos del presente trabajo de investigación, únicamente se describirán dos de ellos, ya que éstos son los que utiliza la red de monitoreo de ciudadano, Quiahua para la generación de información:

1. **Pluviómetro de balancín:** mide la precipitación a través de un datalogger o contador de pulsos que se activa cada que el balancín de vaciado automático acumula cierta cantidad de agua (por lo general 0.1 mm) (Darrera, 2022; Michaelides et al., 2009).
2. **Pluviómetro manual:** es el dispositivo más simple y consta de un recipiente cilíndrico graduado en el cual se colecta la precipitación. La medición se realiza de manera directa a través de los milímetros marcados en el recipiente.

Shaw (1998) y (Michaelides et al., 2009) en general mencionan que los pluviómetros están sujetos a las siguientes fuentes de error: (1) pérdida por evaporación, adhesión y/o sobrepasar la capacidad del contenedor, (2) sobrestimación por salpicaduras y (3) subestimación por turbulencia alrededor del pluvio. Pese a las fuentes de error previamente mencionadas, las técnicas de estimación *in situ* son más precisas que las estimaciones vía remota en donde se utilizan otras variables para inferir el volumen de agua (Davie, 2008).

### 2.3.2. Percepción remota

La Percepción Remota (PR) se define como la técnica que utiliza la energía electromagnética para detectar, analizar y estudiar objetos sin entrar en contacto directo con los



mismos. Para ello, se utiliza un sensor que almacena información de interés a través de la interacción energética del Sol y consecuente reflexión y emisión del medio —sensores pasivos— o con ayuda de un haz artificial —sensores activos, radares— (Catuna, 1995). El principio de PR radica en el hecho de que un medio puede ser caracterizado a partir su respuesta absorción-emisión en distintos rangos de longitudes de onda, i.e., su respuesta espectral.

En la última década, la PR se ha posicionado como una herramienta imprescindible para estudios hidrológicos, hidrometeorológicos y climáticos, en particular en regiones donde las redes de medición *in situ* son escasas (Q. Tang et al., 2009). Esto se debe, en esencia, a que éstas tecnologías —en conjunto con modelos y estimaciones *in situ*— permiten tener una perspectiva más amplia de la variabilidad temporal y espacial de la precipitación, así como de los procesos físicos que rigen su formación y composición (Michaelides et al., 2009).

Según Kidder y Vonder (1995), los métodos de estimación de precipitación vía PR se pueden clasificar en tres grupos principales: (1) aquellos que utilizan datos dentro del espectro visible (con longitudes de onda  $\lambda$  comprendidas entre los 0.4 - 0.7  $\mu\text{m}$ ) e infrarrojo ( $\lambda$  [0.7, 100  $\mu\text{m}$ ]) —VIS/IR—, (2) los que utilizan datos de sensores pasivos en el espectro microondas ( $\lambda$  [0.1  $\text{cm}$ , 1  $\text{m}$ ]) —PMW por sus siglas en inglés— y (3) las técnicas que utilizan radares. La radiación de la banda visible e infrarrojo cercano, es emitida por el Sol y reflejada o dispersada por la superficie terrestre y la atmósfera —radiación de onda corta—. Por su parte, la radiación de las bandas infrarrojo térmico y microondas se produce por re-emisión de energía de la superficie terrestre y la atmósfera tras su calentamiento —radiación de onda larga— (Strangeways, 2006).

### 2.3.2.1. VIS/IR

Las primeras técnicas desarrolladas para la estimación de precipitación fueron las VIS/IR. A éstas longitudes de onda, las nubes se comportan como un cuerpo negro (i.e., absorben y emiten la misma cantidad de energía). Es por ello que se dice que éste tipo de radiación no puede penetrar las nubes, de manera que la estimación se realiza mediante

mediciones del tope de las nubes (Q. Tang et al., 2009; Kidder & Vonder, 1995; Ferraro et al., 1998). Según Barrett y Martin (1981) las técnicas VIS/IR se dividen principalmente en cuatro categorías: (1) índices de nubes, (2) historia de vida, (3) biespectral y (4) técnicas de modelos de nubes (Ver Figura 2.1).

Técnica	Descripción
Índice de nubes	<p>Se basa en la asignación de tasas de lluvia en función del tipo de nube, para posteriormente calcular la precipitación a partir de la siguiente ecuación (Kidder &amp; Vonder Haar, 1995):</p> $R = \sum_i r_i f_i$ <p>donde <math>r_i</math> es la tasa de lluvia para un tipo de nube <math>i</math> y <math>f_i</math> es la fracción de tiempo que el punto estuvo cubierto (o fracción de área cubierta) por el tipo de nube <math>i</math>.</p> <p>Esta técnica puede presentar errores al no considerar factores que afectan las tasas de lluvia en un tipo de nube y tiempo particular (Follansbee, 1973).</p>
Biespectral	<p>Parte del hecho de que la luminosidad de las nubes está ópticamente relacionada con la profundidad y por ende con el espesor de la nube. Comúnmente las nubes frías en las imágenes infrarrojas tienen mayor profundidad que las cálidas, no obstante, existen excepciones. De manera general, se considera que las nubes frías pero oscuras (cirrus) y luminosas pero cálidas (estratus), son las que tienen menor probabilidad de precipitar (menores cantidades) (Kidder &amp; Vonder Haar, 1995).</p>
Historia de vida	<p>La tasa de lluvia de una nube está en función de la etapa en la que se encuentra dentro de su ciclo de vida; una nube alcanza su pico de precipitación cuando el área es máxima.</p> <p>La historia de vida de las nubes es particularmente relevante para las nubes convectivas, en donde se ha documentado una alta correlación entre el área de la nube y el volumen total de lluvia por unidad de tiempo (Kidder &amp; Vonder Haar, 1995; Lovejoy &amp; Austin, 1979).</p> <p>Para calcular la tasa volumétrica de lluvia <math>R</math>, se considera el área <math>A</math> de la nube, la tasa de cambio del área de la nube (<math>dA/dt</math>) y dos coeficientes de proporcionalidad determinados empíricamente (<math>a_0</math> y <math>a_1</math>, las cuales son mayores a cero):</p> $R = a_0 A + a_1 \frac{dA}{dt}$ <p>Uno de los mayores retos de esta técnica está en el seguimiento de las nubes durante su ciclo de vida, en particular para el caso de nubes convectivas que interactúan frecuentemente con los yunques de cirros cercanos (Kidder &amp; Vonder Haar, 1995).</p>
Modelos de nubes	<p>Incorporan la física de nubes (microfísica) mediante parametrizaciones para calcular la precipitación mediante parámetros medibles con VIS/IR (Kidder &amp; Vonder Haar, 1995).</p>

Figura 2.1: Técnicas VIS/IR. Fuente: elaboración propia.

Algunas de las limitaciones de ésta técnica se enlistan a continuación:

- No existe una relación universal entre la lluvia y lo que es observable fuera de las nubes (Kidder & Vonder, 1995).
- Exhiben un mejor desempeño en áreas donde la precipitación dominante se debe a procesos de convección profunda y un menor desempeño en zonas con precipitación estratiforme dominante (Q. Tang et al., 2009).
- Tienden a subestimar la precipitación convectiva durante el día y sobrestimarla durante las noches (Kidder & Vonder, 1995)

#### 2.3.2.2. Microondas con sensores pasivos

A diferencia de la radiación VIS/IR, la radiación microondas (MW por sus siglas en inglés) al no ser susceptible a la dispersión atmosférica, puede penetrar a través de las nubes, neblina, polvo e interactuar con las gotas de lluvia (Kidder & Vonder, 1995; NRCan, 2019), por lo que la estimación mediante PMW será más directa que las técnicas VIS/IR (Levizzani, 2009). Los sensores PMW son por lo general radiómetros o scanners que poseen una antena mediante la cual registran la energía de MW, la cual proviene de tres fuentes principales: atmósfera, superficie y subsuperficie (NRCan, 2019).

Puesto que la energía es inversamente proporcional a la longitud de onda, las MW poseen menos energía que las VIS/IR. Es por ello que ésta técnica requiere campos de visión mayores para detectar la suficiente energía para registrar una señal. Así, los sensores PMW se caracterizan por poseer una resolución espacial baja (NRCan, 2019) en comparación con las imágenes satelitales proveídas a través de técnicas VIS/IR. Otra limitación de esta técnica son los errores sistemáticos en la estimación de la tasa de lluvia debido a los efectos orográficos (Levizzani, 2009).

El tipo y tamaño del hidrometeoro detectado está en función de la radiación emitida. De esta manera a partir de distintas frecuencias, los radiómetros pueden observar distintas partes de la columna de lluvia (Levizzani, 2009). A grosso modo, el espectro MW puede

dividirse en tres partes: (1) <22 GHz: la absorción es el principal mecanismo que afecta la transferencia de radiación. En esta frecuencia, cualquier hielo encima de la capa de lluvia es transparente, por lo que la información proviene directamente de la capa de lluvia. (2) >66 GHz: la dispersión por el hielo es el proceso dominante, por lo que la estimación de precipitación a altas frecuencias son más indirectas. (3) 22 - 60 GHz: absorción y dispersión son importantes. A pesar de que tanto la absorción como dispersión aumentan con la frecuencia y tasa de lluvia, la dispersión por el hielo incrementa mucho más rápido con la frecuencia que la dispersión de un líquido (Kidder & Vonder, 1995).

### 2.3.2.3. Radares Meteorológicos

El sistema de Radio Detección y Telemetría —RADAR por sus siglas en inglés— es aquel que mediante ondas electromagnéticas puede proporcionar la ubicación de objetos de interés en el espacio, así como medir su velocidad y dirección de desplazamiento (CONAGUA, s.f; Laing & Evans, 2016). Las longitudes de onda en las que opera, están en función de los objetivos del estudio. En la meteorología, los radares operan en rangos de magnitud de milímetros a centímetros, los cuales corresponden a microondas de alta frecuencia (Laing & Evans, 2016).

Los radares meteorológicos se clasifican según su fuente de operación en tres categorías: (a) terrestres, (b) aerotransportados y (c) basados en satélites.

A grandes rasgos, su funcionamiento se puede esquematizar de la siguiente manera (Laing & Evans, 2016; CONAGUA, s.f; Moshinsky, 1995):

1. El radar emite pulsos electromagnéticos en distintos ángulos (aproximadamente de 100 a 1000 pulsos por segundo) que inciden sobre la atmósfera.
2. Los elementos y objetos que conforman la atmósfera al interactuar con las ondas electromagnéticas, reflejan y remiten en todas direcciones parte de la energía recibida —dispersión—.
3. Una porción de la energía reflejada viaja en la dirección del radar —retrodispersión— y es captada a través de un receptor.

4. La señal recibida —eco—, es filtrada, amplificada y procesada para así obtener información del objeto de interés —blanco—.

Una de las ventajas que tiene este instrumento es que al realizar un escaneo en diferentes ángulos, provee una análisis tridimensional de la atmósfera. Las limitaciones por su parte, dependen de la fuente de operación ([Laing & Evans, 2016](#)):

- Terrestres: están limitados a una resolución espacial de unos pocos cientos de kilómetros debido a la curvatura terrestre y a los obstáculos presentes en el terreno como son las montañas.
- Aerotransportados: codifican altos costos económicos, por lo que son poco utilizados.
- Basados en satélites: por el ángulo desde donde operan proveen una perspectiva más completa de la columna de lluvia. Sin embargo, solo pueden muestrear un determinado sitio dos veces por día, por lo que su resolución temporal es baja y por ende es necesario complementar los datos de radar con otro tipo de productos.

### 2.3.3. Productos basados en datos satelitales

La [NASA \(2014\)](#) define un satélite como una luna, planeta o instrumento que orbita un planeta o estrella. En el área de las Ciencias de la Tierra, los satélites han sido ampliamente utilizados al proveer información de interés —como la precipitación— con alta resolución espacio-temporal incluso en lugares de difícil acceso y bajo o nulo monitoreo ([Paredes Trejo et al., 2016](#)).

Las técnicas de estimación satelital, dependiendo de las características de su orbita pueden proveer mediciones continuas en escalas regionales y quasi-globales, no obstante, se requieren observaciones *in situ* para el desarrollo de algoritmos y validación ([Q. Tang et al., 2009](#)), las cuales son variables tanto en calidad como en densidad ([Huffman et al., 1997](#)).

Las primeras estimaciones de precipitación por medio de datos satelitales se realizaron en los años setentas con la técnica VIS/IR ([Strangeways, 2006](#)). Sin embargo, con el paso

del tiempo se han incorporado otras técnicas como las PMW y los radares.

Con base en la información proveída vía PR, diversos grupos de investigación han conjuntado las estimaciones *in situ* con los datos satelitales para desarrollar algoritmos y modelos que culminan en productos de precipitación, siendo CHIRPS, PESIANN y TRMM algunos ejemplos.

### 2.3.4. Productos de reanálisis

Según el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio —ECMWF por sus siglas en inglés—, el reanálisis se define como un producto atmosférico global o regional de retrospectiva generado mediante la conjunción de observaciones y pronósticos en un rango de corto plazo ([ECMWF, 2020](#)). Con la finalidad de que la asimilación de datos sea consistente, se incorporan al modelo las ecuaciones que rigen el sistema climático, como son las ecuaciones de balance de masa y energía ([Lorenz & Kunstmann, 2012](#)).

En la actualidad existe una gran variedad de productos de reanálisis, entre los que destacan ERA-Interim y el ERA5, ambos desarrollados por el ECMWF, el Análisis Retrospectiva Era-Moderna para la investigación y aplicaciones, —por sus siglas en inglés, MERRA— desarrollado por la NASA y el Sistema de Reanálisis para Pronósticos del Clima —CFSR por sus siglas en inglés— desarrollado por NCEP ([Lorenz & Kunstmann, 2012](#)).

Los reanálisis son herramientas de suma importancia, pues proveen una versión más precisa de las observaciones históricas del sistema terrestre ([ECMWF, 2020](#)) al estar configurados por una gran cantidad de información, métodos de asimilación, ecuaciones fundamentales y modelos numéricos ([Lorenz & Kunstmann, 2012](#)).

## 2.4. Ciencia Ciudadana

Según [Eitzel et al. \(2017\)](#), la Ciencia Ciudadana (CC) puede entenderse y definirse a través de tres enfoques: (a) como una herramienta, método o forma de investigación, (b) como un movimiento cuyo objetivo es la democratización de la ciencia y (c) como una vía por la cual los tomadores de decisiones reconocen la evidencia y capacidad de producción de conocimiento de las sociedades. Para el primer caso —que será el enfoque del presente trabajo de investigación—, [Njue et al. \(2019\)](#) definen la CC como el proceso mediante el cual la población se involucra en un estudio científico a través de la generación, interpretación, planificación y/o aporte de información.

Este esquema para realizar ciencia, se ha aplicado a diversos campos, como la ecología, ciencias ambientales y biogeografía. En lo que respecta al campo de la hidrología, se ha utilizado principalmente en programas enfocados al monitoreo de calidad de agua (63 %) y en una menor proporción a proyectos de monitoreo de humedad del suelo y gestión del riesgo en inundaciones. Otra área donde es ampliamente utilizado, es en el monitoreo de precipitación, siendo el proyecto Comunidad Colaborativa de Lluvia, Granizo y Nieve —por sus siglas en inglés CoCoRaHS— fundado en 1998, la red de monitoreo pluvial con mayor cobertura (Estados Unidos y Canadá) y eficiencia del mundo. Otros ejemplos de este tipo de monitoreo es la Red de Precipitación de la Comunidad de Reino Unido —UCRaiN por sus siglas en inglés— y el Programa Ciudadano de Observación del Clima ([Njue et al., 2019](#)).

Actualmente México cuenta con alrededor de 36 iniciativas de CC, todas enfocadas en el monitoreo ambiental. [Monzón Alvarado et al. \(2020\)](#) indican que éstos proyectos abarcan tres ejes temáticos: (a) biodiversidad terrestre (9 casos), (b) vida marina (17 casos) y (c) agua y cambio de uso de suelo (10 casos). Dentro del tercer grupo —que es el eje temático del presente trabajo de investigación—, existen iniciativas tanto a nivel global —como ForestWatchers—, regional —como Mexico REDD ([Monzón Alvarado et al., 2020](#)) y Quiahua, la primer red de CC de monitoreo de lluvia en México ([Shinbrot et al., 2020](#))—.



En las últimas décadas, la CC ha ganado popularidad, no solo por el potencial que tiene para la recabación de información imprescindible para investigaciones de interés social y científica, sino también porque cuestiona la manera de hacer ciencia y por ende de acceder a la justicia.

### 2.4.1. Aplicaciones en hidrología

Las redes de monitoreo que requieren altas resoluciones espacio-temporales codifican importantes gastos económicos en los procesos de instalación, mantenimiento y manejo de los instrumentos de medición. Es por ello, que las bases de datos son escasas e incompletas, dificultando la caracterización y manejo de los recursos hídricos. A pesar de que la percepción remota (PR) se ha utilizado ampliamente para enmendar los problemas anteriores, la resolución de los sensores aún no es suficiente para ser aplicada de manera exitosa en el campo de la hidrología (Njue et al., 2019; Funk et al., 2015).

Los problemas asociados a la resolución del sensor son notorios principalmente a escalas locales y en zonas con gradientes altitudinales y microclimáticos abruptos (Zhao et al., 2005) como son las montañas. Para que los estudios hidrológicos en zonas de montaña gocen de precisión y fiabilidad, es necesario contar con áreas densamente calibradas e instrumentadas para evitar sesgos topográficos y grandes errores (Briggs & Cogley, 1996), los cuales son muy evidentes en algunos componentes hidrológicos como la precipitación (Sevruk & Kirchhofer, 1992).

Ante dicho panorama se posiciona la CC como una alternativa de obtención de datos que permite reducir los costos y mejorar la cobertura de información. A diferencia de otros campos de la hidrología donde la CC presenta limitaciones por el costo de los instrumentos, complejidad de las mediciones, demanda tecnológica y el rango espacio-temporal necesario (Paul et al., 2018), en los estudios de monitoreo de precipitación la CC es un proyecto rentable económica y operacionalmente (Njue et al., 2019).

# Capítulo 3

## Metodología

### 3.1. Área de estudio

El estado de Veracruz, México se localiza en la zona centro de la vertiente del Golfo de México y se enmarca en las coordenadas geográficas 22° 28' N, 17° 09' N, 93° 36' O, 98° 39' O, formando parte del Eje Volcánico Transmexicano (EVT) y perteneciendo a la Región Hidrológica Administrativa (RHA) Golfo Centro. En la zona centro de dicho estado, sobre la ladera este —barlovento— del volcán Cofre de Perote —o montaña de cuatro lados en náhuatl: Nauhcampatépetl— (19° 29'34"N, 97°02'42" O) yacen en la parte alta de la cuenca Antigua ( $\sim 1,565 \text{ km}^2$ ) las subcuencas Pixquiac ( $\sim 100 \text{ km}^2$ , 2,024-3,757 msnm) y Los Gavilanes ( $\sim 41 \text{ km}^2$ , 2,090-2,960 msnm), drenadas por corrientes perennes. Debido a la diferencia altitudinal que caracteriza a ambas subcuencas, existe un pronunciado gradiente microclimático (Shinbrot et al., 2020; Muñoz-Villers et al., 2012). Ambas cuencas son de interés social al ser una fuente de suministro de agua para las zonas urbanas de Coatepec y Xalapa (en una proporción de 38 y 90 %, respectivamente) (Shinbrot et al., 2020).

De manera general, el clima se clasifica como templado-húmedo con abundantes lluvias en verano. A partir de los patrones de precipitación, se distinguen dos estaciones principalmente: (a) temporada de lluvias, que corresponde a los meses de mayo-octubre e ingresa el 80 % de la precipitación anual y (b) temporada relativamente seca, que ocurre durante los meses de noviembre-abril, aportando el 20 % de la lluvia restante (García, 2004;

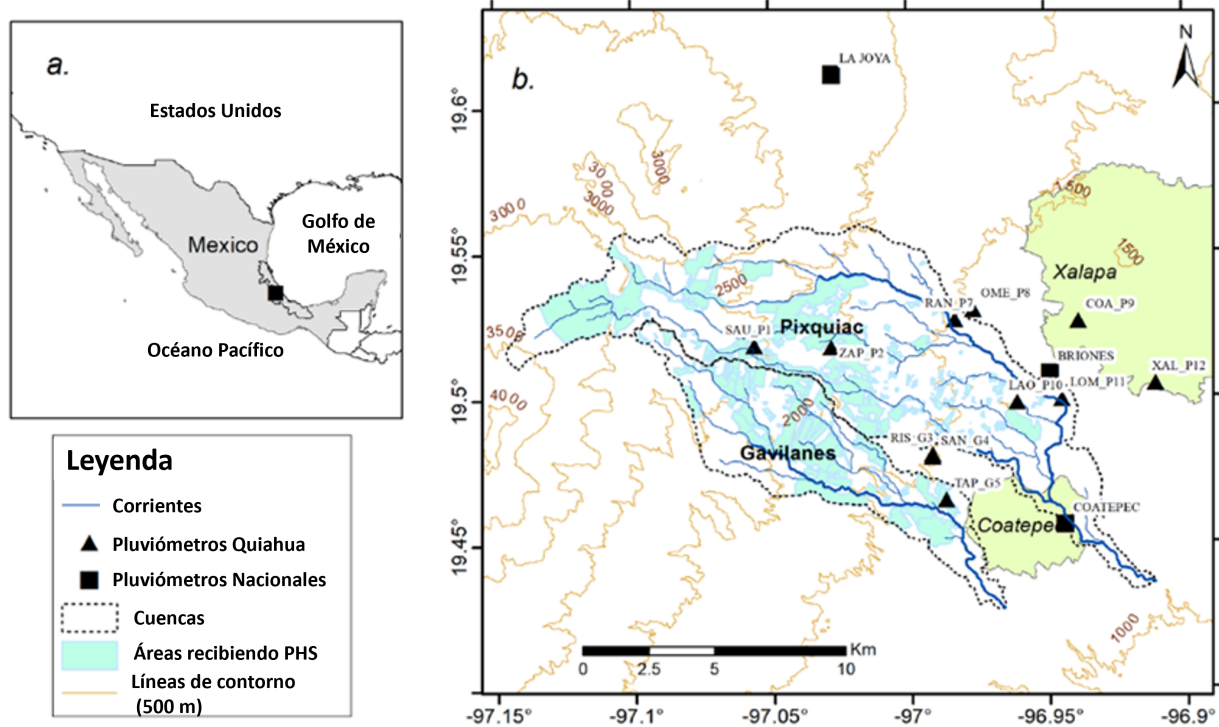


Figura 3.1: (a) Ubicación del área de estudio, (b) localización de las estaciones meteorológicas de la Red Nacional (CONAGUA) y de la red ciudadana Quiahua. Los centros urbanos que dependen del suministro de las cuencas Los Gavilanes y Pixquiatic (verde), zonas que reciben pagos por servicios hidrológicos, PHS (azul). Fuente: figura modificada de [Shinbrot et al. \(2020\)](#).

[Muñoz-Villers et al., 2012](#)). La precipitación durante la temporada de lluvias está asociada a la formación de nubes cumulus y cumulonimbus, originadas por el ascenso orográfico de masas de aire cálidas y húmedas que derivan del paso de los vientos alisios sobre el Golfo de México. Por otro lado, la mayor parte de la precipitación durante la temporada relativamente seca, proviene de nubes tipo estratos producto del choque de masas de aire cálidas y húmedas con aire frío, i.e., frentes fríos ([Holwerda et al., 2010](#); [Muñoz-Villers et al., 2012](#); [Báez et al., 1997](#)). Por su parte, los ciclones tropicales que se generan durante los meses de mayo a noviembre, contribuyen también a la precipitación ([CONAGUA, 2017](#)). La precipitación promedio anual es de 1,765 mm y la temperatura promedio anual de 19.5 °C ([Holwerda et al., 2013](#)). A su vez, se ha documentado que la mayor parte de la precipitación ocurre en la zona de elevación media de las cuencas, entre los 1,800-2,500 msnm ([Shinbrot et al., 2020](#)).

El tipo de suelo predominante en la región de estudio es andosol úmbrico, producto de los procesos volcánicos de Cofre de Perote. Este tipo de suelo se caracteriza por su alta permeabilidad y conductividad hidráulica, que permite un rápido transporte vertical hacia las capas profundas (Muñoz-Villers et al., 2012), alta fertilidad por la vasta proporción de materia orgánica y amplio potencial para retener la humedad en suelo por la presencia de minerales amorfos alófonos —pueden contener hasta 150 % más que su peso— (Williams-Linera, 2012).

La vegetación y usos de suelo en la cuenca río Pixquiac son el bosque mesófilo de montaña (33 %), bosque de coníferas (13 %), pastizal (22 %) y sistemas agroforestales (cafetal de sombra 9 %) (Holwerda et al., 2016). Por su parte, la zona media y alta de la cuenca Los Gavilanes (1,800 - 3,000 msnm), posee principalmente bosque de pino y encino, bosque mesófilo de montaña (maduro y en regeneración) y pastizal. Mientras que la zona ubicada entre los 1,300 - 1,800 msnm se caracteriza por una cobertura de pastizales y fragmentos de bosque mesófilo de montaña, así como cafetales de sombra (Muñoz-Villers et al., 2016).

## 3.2. Información de precipitación

### 3.2.1. Red de ciencia ciudadana Quiahua

Quiahua —del náhuatl *quiahuâ'*, que significa lluvia (Gran Diccionario Nahuatl, 2002)— es un programa de CC coordinado por el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM (ICAyCC), el Global Water Watch (GWW) y la Universidad de Texas, E.U.A., que monitorea la precipitación al interior de las cuencas Los Gavilanes y Pixquiac. Los objetivos de este proyecto son contribuir con datos para conocer la distribución de lluvia, la precisión de la información colectada por las y los ciudadanos voluntarios e informar modelos hidrológicos para el diseño de políticas (Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos, PSAH) y toma de decisiones (Shinbrot et al., 2020).

El interés de esta zona recae en los servicios ecosistémicos brindados por los bosques mesófilos de montañas (BMM), entre los que se destaca su capacidad para modular eventos de precipitación extrema, almacenar y purificar el agua que se suministra a las poblaciones en las partes bajas de la montaña, mantener un alto caudal base en la estación relativamente seca y su alta biodiversidad y endemismo. Durante las últimas décadas, esta zona ha experimentado una deforestación significativa (Von Thaden Ugalde et al., 2021; Muñoz-Villers & López-Blanco, 2008). No obstante, la falta de series de tiempo completas y de largo plazo, tanto de precipitación como de volúmenes de agua en afluentes, han impedido evaluar las repercusiones del cambio de uso de suelo en los componentes y procesos del ciclo hidrológico. Ante dicho panorama surge Quiahua, como una alternativa para recabar información de índole hidrológica a partir de una red de once estaciones monitoreadas por dieciocho voluntarias y voluntarios —cuyos nombres se mencionan al pie de la siguiente página<sup>1</sup>—, que realizan mediciones diarias de 6 am a 10 am (tiempo local) en nueve localidades, cubriendo un rango altitudinal de 1,309 - 2,581 msnm que corresponde a una altitud media, en donde se estima que ocurre la mayor precipitación al interior de las cuencas seleccionadas en el presente estudio (Figura 3.1) (Muñoz-Villers et al., 2012; Holwerda et al., 2013).

En cuanto a la instrumentación, cada estación de monitoreo cuenta con un pluviómetro manual de 250 mm y un pluviómetro automático RG3 con una resolución de 0.2 mm (Shinbrot et al., 2020). A pesar de que se pretende que la Red de Monitoreo Quiahua funcione en un futuro únicamente mediante pluviómetros manuales —por las implicaciones económicas y operativas previamente mencionadas—, fue necesario evaluar primeramente la fiabilidad de las mediciones.

Shinbrot et al. (2020) evaluaron la calidad de los datos de monitoreo ciudadano recabados por las y los voluntarios de Quiahua. Para ello, compararon los resultados de los

---

<sup>1</sup>María Felicitas Cortina Morales, José Valente Ceballos C., Martín Sangabriel Sangabriel, María Antonia Monfil Durán, Rogelio Macías, Raquel Cervantes Alday, Laura González Oliveros, María Luisa León Mateos, Balam Kim Ávila Ochoa, Pakal Moyrón Castillo, Cecilia Castillo, Teúl Moyrón, Britta Shafer, Wendy Vidal, Eduardo Aranda Delgado, Cecilia Ivonne Oviedo Contreras, Oscar Prieto Uscanga y Sebastián Ricalde González

pluviómetros manuales con los registrados por los pluviómetros automáticos y encontraron que durante el periodo de junio de 2017 a febrero de 2019 —abarcando dos estaciones secas y una de lluvia— los voluntarios reportaron datos en el 91 % de los días en promedio, subestimando mínimamente la precipitación (-0.86 mm por día y el 16 % en la temporada de lluvias). La falta de datos contribuyó en un 29 % a este error, mientras que el 71 % se derivó de errores en las lecturas o acumulados de varios días, por lo que mediante protocolos de calidad —como es la eliminación de outliers— se puede mejorar de manera considerable el desempeño de Quiahua.

Ante los resultados previamente expuestos y con el objetivo de aplicar los datos de monitoreo ciudadano en un estudio de validación utilizando productos satelitales y de reanálisis, el presente trabajo de investigación puso énfasis en la serie de datos diarios de lluvia obtenidos a través los pluviómetros manuales durante el periodo del 9 de junio de 2017 al 30 de mayo de 2020<sup>2</sup>. Atendiendo las sugerencias de [Shinbrot et al. \(2020\)](#), las bases de datos fueron sometidas a un protocolo de calidad, en donde se eliminaron los outliers y se evaluó en qué medida éstos afectan la correlación lineal entre el pluviómetro manual y automático. A su vez, se consideraron únicamente los datos de las estaciones con menor cantidad de datos nulos (al menos el 70 % de los datos): COA\_P9 (1,400 msnm), LOM\_P11 (1,289 msnm), OME\_P8 (1,445 msnm), RIS\_G9 (1,535 msnm), SAN\_G4 (1,529 msnm), SAU\_P1 (2,579 msnm) y TAP\_G5 (1,326 msnm), considerándose así siete de las doce estaciones del proyecto Quiahua<sup>3</sup> (ver Figura 3.1) .

### 3.2.2. CHIRPS

Climate Hazards Group Precipitation with Stations (CHIRPS), es un producto de precipitación que utiliza técnicas de interpolación y correlación para crear un mallado de  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  (25 km<sup>2</sup>) a partir de datos satelitales e *in situ*, desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) junto con el Grupo de Santa Bárbara de Riesgos

---

<sup>2</sup>Este periodo de tiempo corresponde a los datos disponibles por parte del proyecto Quiahua al momento de realizar la investigación que aquí se presenta.

<sup>3</sup>Por practicidad, a partir de esta sección las estaciones del proyecto Quiahua serán nombradas de la siguiente manera: COA, LOM, OME, RIS, SAN, SAU y TAP.

Climáticos de la Universidad de California. Frente a productos similares, destaca por su cobertura cuasi global ( $50^{\circ}S$ - $50^{\circ}N$ ,  $180^{\circ}E$ - $180^{\circ}O$ ), baja latencia (con datos disponibles cada tres semanas) y alta resolución espacial ( $0.05^{\circ}$ , i.e.,  $\approx 5$  km) y temporal (1981-hasta la fecha). Su funcionamiento consiste en las siguientes etapas (Funk et al., 2015):

1. **CHPclim**: está formado por dos conjuntos de datos de precipitación, el primero suministrado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) con datos mensuales promedio y el segundo por la Red Global de Climatología Histórica (GHCN) con datos mensuales y diarios. En conjunto conforman una base de datos con un total de 127,453 estaciones en más de 180 países y territorios. A su vez, incorpora información de variables como elevación, temperatura en superficie, longitud y latitud e información mensual promedio de productos satelitales como: Tropical Rainfall Measuring Mission 2B31 (estimación de precipitación por microondas) y CMORPH (estimación de precipitación por microondas e infrarrojo). La información recopilada posteriormente es remuestreada en una malla de  $0.05^{\circ}$  ( $\approx 5$  km) aplicando una regresión a nivel local y considerando diversos predictores satelitales, así como la elevación y la pendiente.
2. **CHIRP**: a partir la duración de nubes frías (CCD) y los datos pentadales de precipitación del producto TMPA 2B42 se realizan estimaciones (pentadales) de lluvia mediante modelos de regresión y calibración local. El resultado se expresa como un porcentaje de la precipitación normal dividiendo los valores estimados mediante los modelos de regresión, entre los valores promedio en un periodo largo de tiempo. Dicha información en conjunto con CHPclim conforma el producto CHIRP.
3. **CHIRPS**: Observaciones medidas in situ se combinan con CHIRP para formar CHIRPS.

Los datos diarios de precipitación de CHIRPS en formato netCDF<sup>4</sup> se descargaron a través del Instituto Internacional de Investigación sobre el Clima y la Sociedad —IRI por

---

<sup>4</sup>Abreviatura de formularios de datos comunes en red

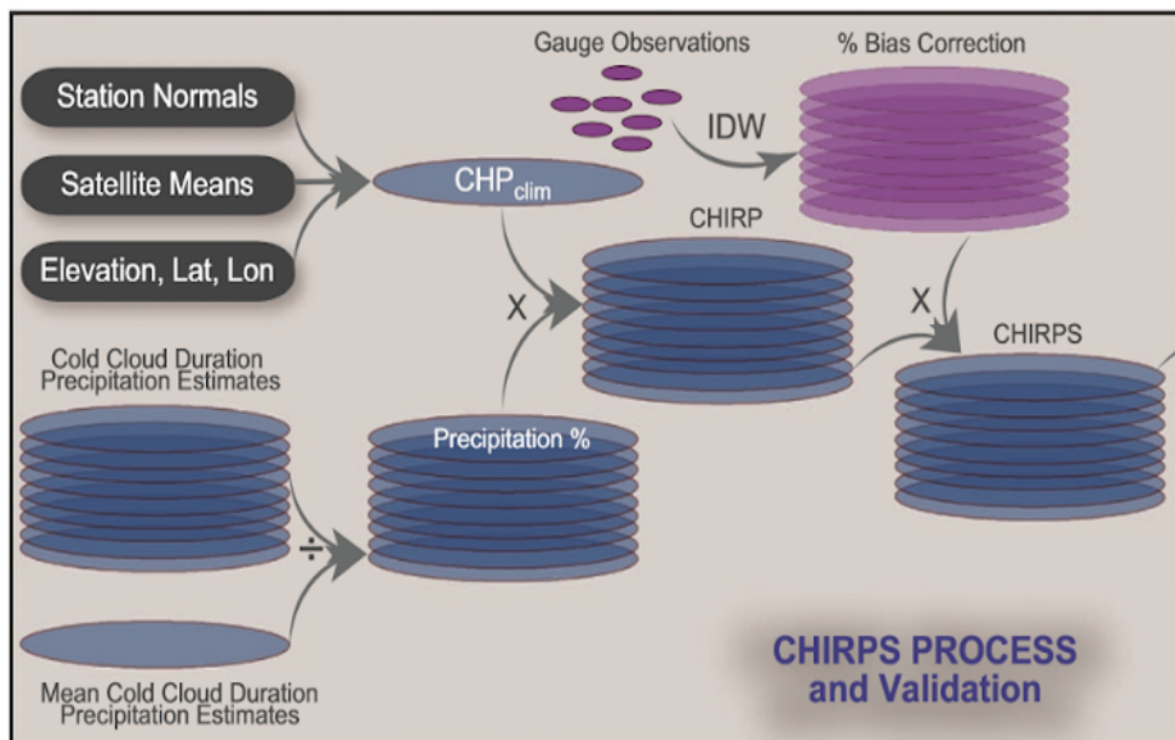


Figura 3.2: Etapas en la elaboración de CHIRPS. Fuente: recuperado de Funk et al. (2015)

sus siglas en inglés— de la Universidad de Columbia. El área se acotó en el eje de las abscisas de  $-97.15^{\circ}$  O a  $-96.8^{\circ}$  O y en el eje de las ordenadas de  $19.6^{\circ}$  N a  $19.4^{\circ}$  N —ésta retícula abarca por completo las cuencas Gavilanes y Pixquiác—. El periodo comprendido fue del 9 de junio de 2017 al 30 de mayo de 2020.

Posteriormente, se realizó la extracción de la información del netCDF a través del software MATLAB; en donde también se definieron las estaciones de Quiahua a partir de sus coordenadas. Mediante la matriz de precipitación de CHIRPS se obtuvieron las coordenadas de los puntos en donde el producto CHIRPS estima la precipitación y se desplegaron en ArcMap junto con las estaciones de Quiahua y los shapefiles de las cuencas Los Gavilanes y Pixquiác (Figura 3.4)<sup>5</sup>.

<sup>5</sup>El método mediante el cual se estimó la precipitación de CHIRPS para cada una de las estaciones se describe a detalle en la sección posterior (Procesamiento de datos).



### 3.2.3. ERA5

ERA5 es la quinta generación de productos de reanálisis atmosférico producido por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo —ECMFW por sus siglas en inglés— en el año 2019. Tiene una resolución espacial horizontal de  $0.25^\circ$ , i.e., aproximadamente 31 km (con una cobertura quasi-global: de los  $50^\circ\text{S}$  a  $50^\circ\text{N}$ ) y 37 niveles de presión (desde la superficie hasta 1 hPa). En cuanto a la resolución temporal, cuenta con salidas horarias y mediciones desde 1979 hasta la fecha ([Hersbach et al., 2020](#)).

A diferencia de productos satelitales —como es el caso de CHIRPS—, los productos de reanálisis combinan observaciones y modelos para proveer mapas consistentes de las variables esenciales del clima —tales como la precipitación, velocidad del viento, humedad en el aire, etc.— que exhiben a su vez concordancia con la dinámica de la circulación global. Es por ello que el resultado final de dichos productos deriva del acoplamiento de distintas parametrizaciones, modelos y datos atmosféricos como son el viento, la temperatura y humedad ([Hersbach et al., 2020](#); [G. Tang, Clark, Papalexiou, Ma, & Hong, 2020](#)).

En comparación con el producto anterior del ECMFW (ERA-Interim), ERA5 aumentó en la correlación de la precipitación media global, de 67% a 77% ([Hersbach et al., 2020](#)). A su vez, un estudio realizado por [Xu et al. \(2019\)](#) documentó un buen desempeño de dicho producto en la estimación de la precipitación en continental de los EUA.

Debido a que ERA5 es un producto relativamente nuevo que mide una gran cantidad de variables, actualmente no se cuenta con suficientes estudios que evalúen su desempeño en la estimación de lluvia. Es por ello, que con el presente trabajo se busca contribuir en el entendimiento del potencial que tiene el producto de reanálisis global ERA5 en la estimación de la precipitación a escala local y en una zona de terreno complejo evaluado a diferentes escalas temporales.

Los datos de precipitación horaria acumulada se descargaron por medio del servidor

CDS —acrónimo de Climate Data Store— y fueron manipulados en el software MATLAB con un código propio, donde se integraron los valores de precipitación del 9 de junio de 2017 al 30 de mayo de 2020, para disponer de salidas diarias (acumulado diario en unidades de milímetros). Cabe destacar que como los y las voluntarias de Quiahua registraron el acumulado diario entre las 6 y 10 am, para ERA5, se integraron los valores de 8:00 AM a 8:00 AM del día siguiente.

### 3.3. Procesamiento de datos

#### 3.3.1. Interpolación para zonas de montañas: CHIRPS

[Childs \(2004\)](#) define una malla como un arreglo de celdas de igual tamaño organizadas en filas y columnas. Cada celda está asociada a uno o varios atributos (como precipitación, temperatura, presión, etc.), de manera que una malla es un conjunto de puntos que representan la variación de un determinado atributo en el espacio. La distancia entre cada punto de la grilla estará asociada a la resolución espacial del producto en cuestión. En el caso del presente estudio, la resolución de CHIRPS es de  $0.05^\circ$ , eso significa que CHIRPS estima un valor de precipitación cada  $\approx 5$  km en una superficie cuasi global.

El desempeño de un producto que estima lluvia puede evaluarse mediante dos enfoques: (a) comparación punto-punto o (b) punto-píxel ([Logah et al., 2021](#)). Para el primer caso es necesario aplicar una interpolación espacial, definida como el proceso mediante el cual se predicen valores de celdas que carecen de puntos de muestreo a partir de operaciones matemáticas y/o estadísticas ([Childs, 2004](#)). Para el segundo caso, se considera que el atributo a evaluar permanece constante en el píxel o celda.

En contextos de terreno complejo —como es el caso de las cuencas Los Gavilanes y Pixquiac—, asumir que un atributo como la precipitación permanece constante en un área de  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  (resolución espacial de CHIRPS) no es adecuado debido a los gradientes climáticos abruptos que caracterizan estos espacios. Estudios realizados por [Muñoz-Villers](#)

et al. (2012); Holwerda et al. (2013) en las cuencas Los Gavilanes y Pixquiac han demostrado que parámetros hidrometeorológicos como la precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación solar y evaporación potencial varían de manera significativa con la altitud.

Respondiendo a problemáticas similares, Zhao et al. (2005) propuso un modelo de interpolación espacial no lineal, ideal para escalas locales con terreno complejo. En dicho trabajo se aplicó la interpolación para calcular diversos datos meteorológicos en un píxel de MODIS de 1-km a partir de los datos meteorológicos de DAO (Data Assimilation Office) cuya resolución espacial es de  $1.00^\circ \times 1.25^\circ$ .

Por las similitudes entre el caso de estudio de Zhao et al. (2005) y el presente, la interpolación espacial se aplicó de manera análoga. En este caso, se calculó la precipitación en cada una de las estaciones de Quiahua a partir de la celda de  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  de CHIRPS. Para ello se realizó el siguiente procedimiento:

Primeramente, se calculó la distancia no lineal ( $D_i$ ) entre la celda de CHIRPS y las estaciones de Quiahua:

$$D_i = \cos^4 [(\pi/2)(d_i/d_{max})] \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (3.1)$$

donde  $d_i$  es la distancia entre el vértice  $i$  de la celda de CHIRPS y la estación correspondiente de Quiahua y  $d_{max}$  la distancia máxima entre los vértices de la celda de CHIRPS, calculada por medio de ArcMap.

A partir de  $D_i$  se calculó un valor ponderado  $W_i$  definido como

$$W_i = D_i / \sum_{i=1}^4 D_i \quad (3.2)$$

Finalmente, se calculó el valor de precipitación  $V$

$$V = \sum_{i=1}^4 (W_i \times V_i) \quad (3.3)$$

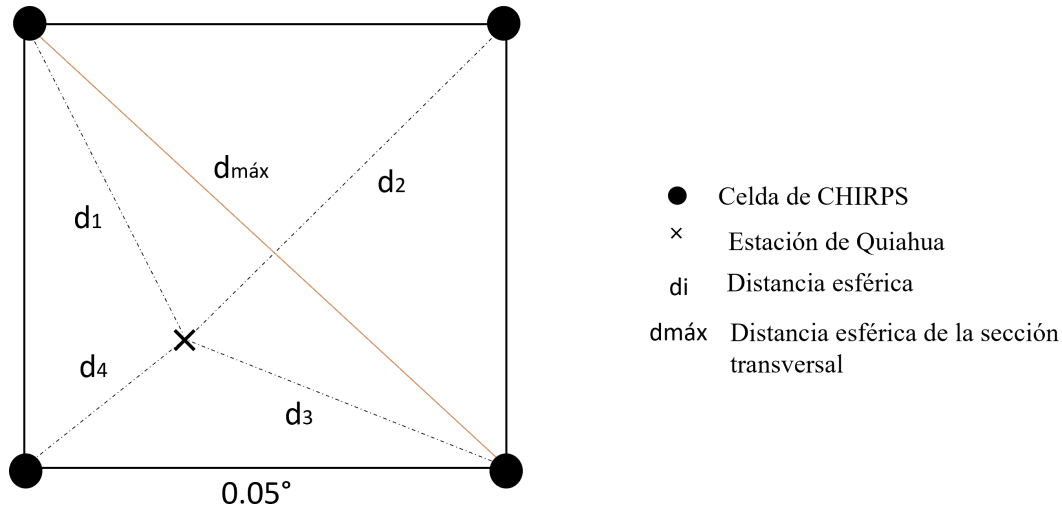


Figura 3.3: Interpolación para zonas de montañas. Fuente: modificado de [Zhao et al. \(2005\)](#)

donde  $V_i$  es el valor estimado en cada uno de los vértices.

### 3.3.2. ERA5

Para el caso de ERA5, no se llevó a cabo la interpolación de [Zhao et al. \(2005\)](#) ya que al tener una resolución espacial de  $0.25^\circ$  —aproximadamente 31 km—, las estaciones de Quiahua se distribuyen de manera preferencial alrededor de un único punto. En este caso particular, incluir el resto de los vértices no es recomendable por la distancia a la que se encuentran de los puntos de muestreo (Ver Figura 3.4).

Debido a que el valor de precipitación de ERA5 es el mismo para todos los puntos, se realizó una única base de datos de Quiahua que corresponde a los valores promedio de precipitación de las siete estaciones de Quiahua —a diferencia del caso de CHIRPS donde se tiene una serie de precipitación para cada estación—.

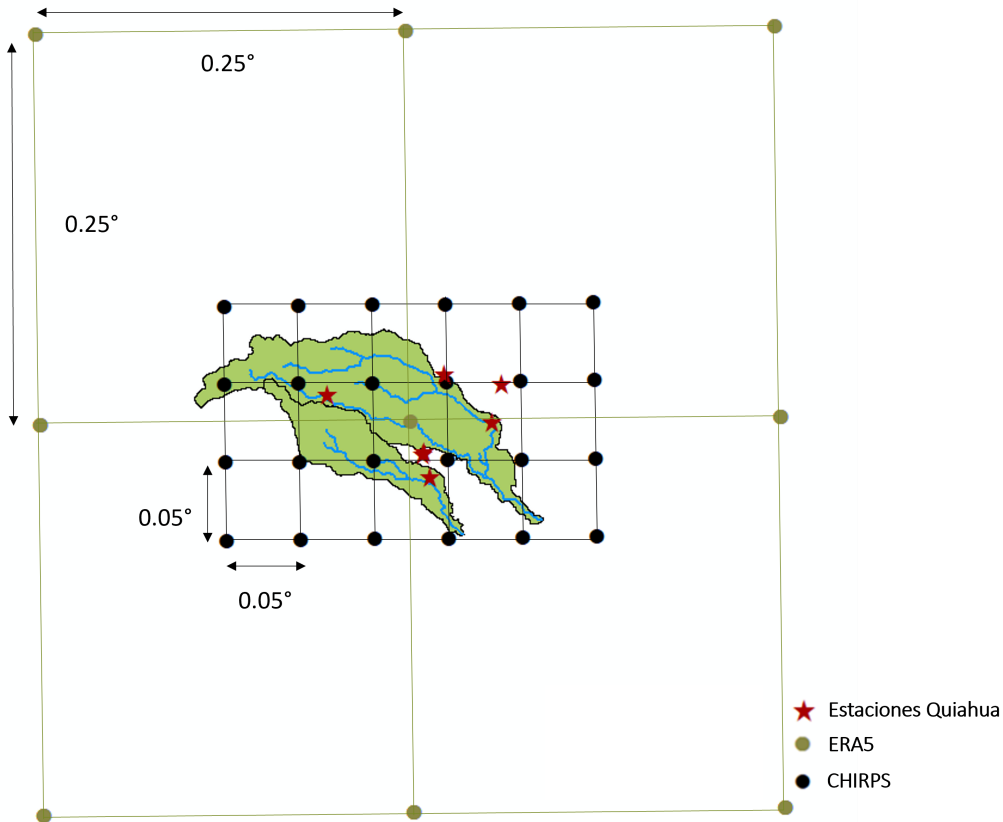


Figura 3.4: Resolución espacial de CHIRPS vs ERA5. Cada punto en la malla corresponde al centroide de un píxel donde el valor de precipitación permanece constante. Fuente: elaboración propia, a partir de los shapefiles de las cuencas Los Gavilanes y Pixquiac y las coordenadas de las estaciones de Quiahua y las mallas de CHIRPS y ERA5.

### 3.3.3. CHIRPS

Con la finalidad de que la evaluación de ambos productos (CHIRPS y ERA5) sea comparable, los datos que resultaron de la interpolación para zonas de montañas propuesta por [Zhao et al. \(2005\)](#), se promediaron para crear una única serie de tiempo de CHIRPS. De esta manera, el presente trabajo no sólo evalúa el desempeño del producto de precipitación CHIRPS a través de un análisis punto-punto (estación-estación), sino también su desempeño a nivel local en comparación con el producto de reanálisis ERA5.

Con el fin de distinguir entre los dos tratamientos de datos aplicados al producto CHIRPS se hará la siguiente distinción: se denominará CHIRPS' al conjunto de series

representadas por estaciones y CHIRPS” a la serie que representa el promedio de las estaciones. Por su parte, se denominará CHIRPS a la evaluación de ambos tratamientos: CHIRPS’ y CHIRPS”.

### 3.4. Métodos de evaluación

Partiendo de la premisa de que todo modelo o producto es una aproximación del fenómeno de interés —en este caso precipitación—, es imprescindible la evaluación de los mismos en distintos contextos, con la finalidad de conocer sus alcances y limitaciones (Beven, 2011). Cabe recalcar que ninguna estimación está exenta de errores; en el caso de la medición de precipitación vía pluviómetros manuales, se estará expuesto a la incertidumbre del instrumento, así como errores de lectura, pérdida de agua por evaporación, etc.

En el caso de Quiahua, la fiabilidad de las mediciones fue evaluada por Shinbrot et al. (2020). Para productos satelitales de estimación de precipitación y/o productos de reanálisis, autores como Logah et al. (2021), Dembélé y Zwart (2016), Duan et al. (2012), R. Xu et al. (2017), Ghozat et al. (2021) y Dinku et al. (2007) documentan que su desempeño puede evaluarse a través de indicadores e índices de estadística pareada y categórica.

#### 3.4.1. Estadística pareada

La comparación en pares es definida por Nordstokke y Stelnicki (2014) como ”el método estadístico utilizado para evaluar las relaciones entre pares de medias al hacer comparaciones de grupo”.

Para poder utilizar indicadores de estadística pareada, se requieren al menos dos conjuntos de datos cuantitativos, ambos de longitud  $n$ . En este caso, se utilizaron los datos de precipitación medidos por Quiahua (Q) (para cada estación en el caso de CHIRPS’ y el promedio de las estaciones para el caso de ERA5 y CHIRPS”) y los estimados por CHIRPS y ERA5 ( $M^6$ ). Con la finalidad de que ambos conjuntos tuvieran la misma longitud, se

---

<sup>6</sup>Denotaremos como ” $M$ ” a los valores de precipitación estimados por el producto, sea CHIRPS o ERA5

eliminaron los valores de M que se correspondían con datos nulos en la serie de Quiahua.

La evaluación del desempeño de CHIRPS y ERA5 a partir de parámetros de estadística pareada, se realizaron a una escala diaria y mensual. Para el análisis mensual, únicamente se consideraron los meses que contaban con al menos el 80 % de los datos.

A continuación se describen los indicadores de estadística pareada utilizados en el presente análisis, los cuales fueron calculados en RStudio a través de la paquetería HydroGOF<sup>7</sup>, desarrollada por [Zambrano-Bigiarini \(2020\)](#).

#### 3.4.1.1. Coeficiente de correlación de Spearman

El coeficiente de correlación de Spearman ( $\rho$ ), es un estadístico no paramétrico, que permite evaluar la relación monótona entre dos variables, i.e. "qué tanto tienden a moverse en la misma dirección" ([Soporte de Minitab, 2019](#)). Esto implica que a diferencia del coeficiente de correlación de Pearson, no está acotado únicamente a relaciones lineales, por lo que es ideal para medir la fuerza de correlación logarítmica, exponencial, lineal, etc. ([Hauke & Kossowski, 2011](#)). Debido a que en el caso de la evaluación de un producto de lluvia se busca que exista una correlación lineal, es importante acompañar éste tipo de estadísticos con diagramas de dispersión.

Para determinar  $\rho$ , se requiere conocer la diferencia de rangos  $d_i$  entre dos vectores. Para ello, los valores numéricos deben sustituirse por la posición que ocupan cuando se ordenan ascendentemente (rangos). Esto quiere decir que si disponemos de los vectores  $\bar{x}$  y  $\bar{y}$  definidos por los valores numéricos a,b,c,d que cumplen que  $a < b < c < d$  ([Borradaile, 2003](#)):

$$\bar{x} = (d, c, a, b)$$

$$\bar{y} = (a, c, b, d)$$

se reescribirán como:

---

<sup>7</sup>Goodness-of-Fit Functions for Comparison of Simulated and Observed Hydrological Time Series

$$\bar{x}' = (4, 3, 1, 2)$$

$$\bar{y}' = (1, 3, 2, 4)$$

A partir de la resta de los vectores  $x'$  y  $y'$  se obtiene  $d_i$ :

$$d_i = x'_i - y'_i \quad (3.4)$$

Finalmente  $\rho$  se determina mediante la ecuación 3.5

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (3.5)$$

Al utilizar la diferencia de rangos en vez de los valores numéricos *per se*; el coeficiente de correlación de Spearman no es sensible a valores extremos (Martínez Ortega et al., 2009), los cuales son comunes de observar en series de tiempo de precipitación. Es por ello, que para esta fase se conservaron los valores extremos de todas las series de tiempo.

Por convención, la fuerza de correlación  $\rho$  se consideró estadísticamente significativa cuando el p-value es menor a 0.05 y se interpretó con los criterios —estandarizados— expuestos en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Categorización de la fuerza de correlación de Spearman

rho	Interpretación
.90 a 1.0 (-.90 a -1.0)	Correlación positiva (negativa) muy alta
.70 a .90 (-.70 a -.90)	Correlación positiva (negativa) alta
.50 a .70 (-.50 a -.70)	Correlación positiva (negativa) moderada
.30 a .50 (-.30 a -.50)	Correlación positiva (negativa) baja
.00 a .30 (.00 a -.30)	Correlación despreciable

Atendiendo al hecho de que la conversión de intervalos a parámetros ordinales (rangos), conlleva a una pérdida de información (Legates & McCabe Jr, 1999), en el presente estudio se consideraron otros indicadores estadísticos (NSE, ME y PBIAS), con la finalidad de disponer de mayores herramientas de evaluación.

En el campo de la hidrología comúnmente se aplican índices que utilizan el criterio de eficiencia (Krause, Boyle, & Bäse, 2005), i.e. el error de las estimaciones, para evaluar el



desempeño de un producto. A diferencia del coeficiente de Spearman, éstos índices son muy sensibles a valores extremos, ya que el error se define como la diferencia entre el valor modelado ( $M_i$ ) y el observado ( $Q_i$ ). Es por ello, que para el cálculo de los índices que se describirán a continuación se despreciaron los valores extremos (outliers).

### 3.4.1.2. Índices de Criterio de Eficiencia

- **Eficiencia de Nash-Sutcliffe:** es un estadístico desarrollado por Nash y Sutcliffe (1970) que mide cuánta de la variabilidad del fenómeno de interés puede ser explicada por un modelo determinado<sup>8</sup> y se define a partir de la siguiente ecuación (Krause et al., 2005):

$$NSE = 1.0 - \frac{\sum_i^n (M_i - Q_i)^2}{\sum_i^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (3.6)$$

El numerador estadísticamente representa la variación de los datos que no pudo ser explicada a través del modelo y el denominador la variación total entre el valor observado respecto a la media (McCuen, Knight, & Cutter, 2006).

Nótese que cuando el cuadrado de las diferencias entre el modelo y las observaciones son iguales a la variabilidad de los datos observados,  $NSE = 0$ , lo cual indica que el predictor M es igual de bueno que la media observada  $\bar{Q}$ , mientras que valores negativos indican que la media observada es mejor predictor que el modelo. Los valores positivos por su parte, indican que el el modelo es tan buen estimador como la media observada. Finalmente, cuando las diferencias entre el valor estimado y observado es igual a 0,  $NSE = 1$ , indicando una concordancia perfecta entre el modelo y las observaciones (Legates & McCabe Jr, 1999).

La interpretación de los valores de NSE se realizó mediante los criterios sugeridos por (Molnar, 2011):

- **Error medio:** estima la diferencia promedio entre los valores estimados y observa-

---

<sup>8</sup>En este caso el modelo corresponde al producto satelital de estimación de lluvia CHIRPS y el producto de reanálisis ERA5, ambos denotados como "M"

Tabla 3.2: Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe

NSE	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2 - 0.4	Satisfactorio
0.4 - 0.6	Bueno
0.6 - 0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

dos, donde un valor positivo o negativo implica que la precipitación estimada generalmente está sobreestimada o subestimada respectivamente (Dembélé & Zwart, 2016):

$$ME = \frac{\sum_i^n (M_i - Q_i)}{n} \quad (3.7)$$

ME toma valores en un rango de  $-\infty$  a  $\infty$ , donde 0 indica que el hay una correspondencia perfecta entre las observaciones y el modelo, i.e., el error es nulo.

- **Sesgo porcentual:** mide la tendencia promedio de sobre o subestimación del modelo en comparación con los datos observados (Zambrano-Bigiarini, 2020):

$$PBIAS = 100 \times \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - Q_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i} \right] \quad (3.8)$$

PBIAS se encuentra en un rango de  $-\infty$  a  $\infty$ , con un valor óptimo de 0%.

### 3.4.2. Estadística categórica

A diferencia de los estadísticos anteriormente descritos donde la precipitación se analiza a partir de su valor numérico, la estadística categórica utiliza datos cualitativos, i.e. cualidades o características del evento de precipitación. En el presente estudio, se utilizó como criterio de categorización la cantidad de precipitación acumulada en un periodo de 24 horas —tamaño de lluvia—.

Desde una perspectiva hidrológica, un análisis categórico de este tipo es de suma importancia, ya que permite determinar en qué contextos es factible aplicar el producto de interés. Por ejemplo, si el modelo exhibe una alta capacidad para detectar un evento extremo y baja capacidad en lluvias normales y moderadas, la aplicación del modelo estará acotada principalmente al área de riesgos hidrometeorológicos.

Un método práctico que permite clasificar la precipitación sin necesidad de conocer la distribución de probabilidad, es a través de los percentiles. Este concepto se define como el valor por debajo del cual cae un determinado porcentaje de datos. De manera que si calculamos el *Percentil 90*, obtendremos el valor por debajo el cual se encuentran el 90 % de las observaciones de una muestra. Matemáticamente se define como:

$$P_i = i \times \left( \frac{n + 1}{100} \right) \quad (3.9)$$

donde  $P_i$  es el valor del percentil y  $n$  el número de observaciones.

En el presente estudio, la clasificación se realizó de acuerdo a los criterios utilizados por [Alfaro Lozano \(2014\)](#), resumidos en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Definición de categorías y rangos de precipitación en las cuencas Los Gavilanes y Pixquiac durante las temporadas de lluvias y de secas.

<b>Clasificación del evento de lluvia</b>	<b>Percentiles (<math>i</math>)</b>
Normal	$< P_{75}$
Moderadamente lluvioso	$P_{75} , < P_{90}$
Muy lluvioso	$P_{90} , < P_{99}$
Evento extremo	$\geq P_{99}$

Las categorías de lluvia se calcularon para la estación de lluvias y secas de manera independiente por medio de la función *PERCENTIL.INC* de Excel. Para ello, se conjuntaron las series de precipitación de todas las estaciones de monitoreo, creando una serie única para la temporada de lluvias y otra para la de secas; ambas ordenadas de manera ascendente. Para el cálculo de los percentiles, se eliminaron los outliers y se consideraron únicamente valores iguales o superiores a 1 mm.

Tabla 3.4: Umbrales de precipitación en las cuencas Gavilanes y Pixquiác

	Estación de lluvias	Estación de secas
Clasificación del evento de lluvia	Acumulado diario (mm)	Acumulado diario (mm)
Normal	0.1 a <21.2	0.1 a <10.2
Moderadamente lluvioso	21.2 a 38.2	10.2 a <18.6
Muy lluvioso	38.2 a <83.76	18.6 a <49.2
Evento extremo	>83.76	>49.2

A partir de los umbrales establecidos en la Tabla 3.4, se calcularon los **índices de evaluación categórica** para evaluar el desempeño de CHIRPS y ERA5 en función del tamaño de lluvia <sup>9</sup>. El proceso fue llevado a cabo en MATLAB a través de un *ciclo for*. A continuación se enlistan los índices utilizados ([Paredes-Trejo, Barbosa, & Dos Santos, 2019](#)):

- **Probabilidad de detección (POD)**: es el número de eventos correctamente detectados ( $A$ ) entre el número total de eventos observados ( $A + C$ ) (donde  $C$  es la cantidad de veces que Quiahua detecta el tamaño de lluvia del grupo de interés y es distinto al que detecta el producto), con un valor perfecto de 1.

$$POD = \frac{A}{A + C} \quad (3.10)$$

- **Proporción de falsa alarma (FAR)**: se define como el número de falsas alarmas  $B$  (la cantidad de veces que el producto detecta la categoría de lluvia que se está evaluando y Quiahua exhibe un resultado distinto) entre el número total de eventos de la categoría que se está analizando, con un valor perfecto de 0.

$$FAR = \frac{B}{A + B} \quad (3.11)$$

---

<sup>9</sup>Los umbrales establecidos a partir de los valores reportados por todas las estaciones de Quiahua, se utilizaron tanto en el análisis categórico de CHIRPS como de ERA5. Esto se debe a que retratan mejor la variabilidad de lluvia en el área de estudio, en comparación con el promedio de las estaciones utilizado en el análisis de estadística pareada para ERA5.

- **Índice de éxito crítico (CSI):** es la cantidad de eventos correctamente detectados ( $A$ ), entre la cantidad de datos totales ( $A+B+C$ ; donde  $C$  son el número de eventos no detectados por el producto) con un valor perfecto de 1.

$$CSI = \frac{A}{A + B + C} \quad (3.12)$$

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1. Precipitación en las cuencas Los Gavilanes y Pixquiac

A partir de los datos obtenidos por los y las voluntarias de Quiahua (pluviómetros manuales), se graficó la precipitación a nivel diario y se agregó la información sobre los sistemas atmosféricos asociados a los eventos de lluvia reportados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (Figuras 4.1, 4.2 y 4.3).

De manera general, los valores máximos locales de precipitación que ocurren a nivel nacional entre los meses de enero y abril, son consecuencia de sistemas frontales generados durante la temporada invernal. Por su parte, de mayo a septiembre, las principales lluvias son consecuencia de sistemas tropicales (ondas tropicales, sistemas de bajas presiones, ciclones tropicales, etc.) (CONAGUA, 2017). La presencia de dichos sistemas y su repercusión en la precipitación, se reflejó de manera clara en las series de tiempo suministradas por Quiahua durante el periodo: junio de 2017 a mayo de 2020.

Durante el año 2017 (junio a diciembre), se observaron altas entradas de precipitación ante la presencia de los huracanes Franklin ( $\approx 138$  mm), Katia ( $\approx 130$  mm) y Harvey ( $\approx 98$  mm). A partir de noviembre de 2017 se observan condiciones relativamente secas y el Re-

porte del Clima en México Anual, documenta ese mes como el más seco desde 1941 a nivel nacional (Ver Figura 4.5) (CONAGUA, 2017).

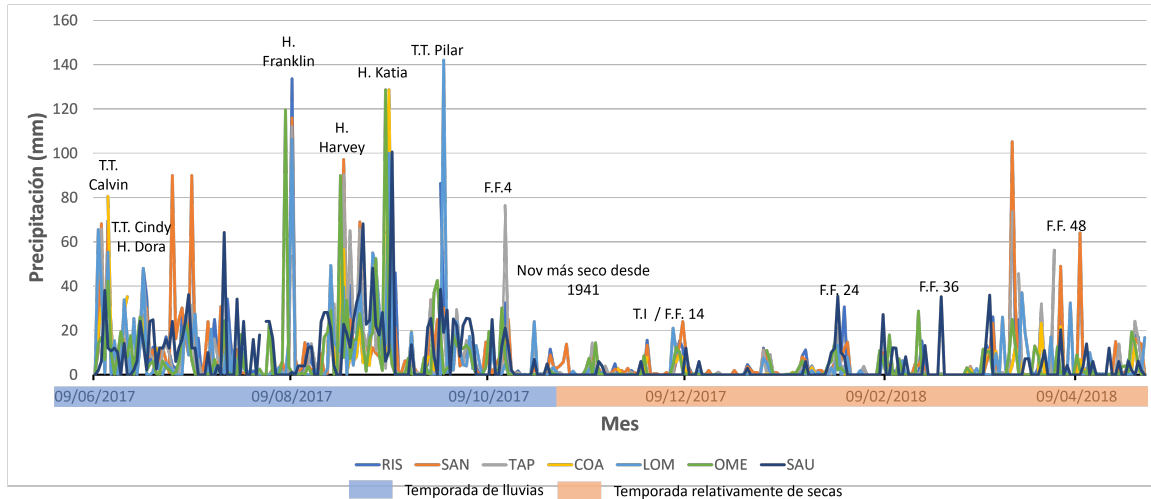


Figura 4.1: Precipitación diaria a partir de los datos de Quiahua y los datos proporcionados por la CONAGUA en las cuencas de los ríos Los Gavilanes y Pixquiatic durante el año hidrológico: junio de 2017 a abril de 2018.

En el 2018 la mayor cantidad de lluvia se recibió sobre los estados costeros del Golfo de México, no obstante, el mes de julio se reportó a nivel nacional como el más seco desde 1941 debido a la ausencia de ciclones tropicales. Por su parte, septiembre tuvo una baja actividad ciclónica, sin embargo la Depresión Tropical 19E, dejó fuertes lluvias en el país (presentando un valor máximo de  $\approx 75$  mm en el área de estudio). Octubre se destacó como el mes con la mayor actividad ciclónica entre los que destacan el Huracán Willa y Michael, los cuales dejaron lluvias mayores a 50 mm sobre el área de estudio. A diferencia del 2017, los meses de noviembre y diciembre reportaron varios eventos de lluvia, algunos de ellos inducidos por sistemas frontales, los cuales también estuvieron presentes los primeros cinco meses del año 2018 (Ver Figura 4.2) (CONAGUA., 2018).

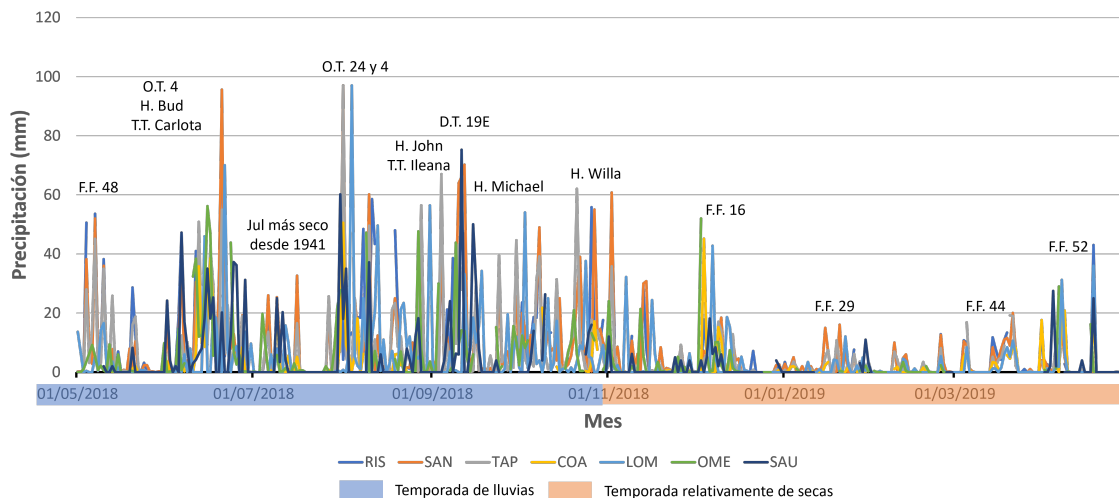


Figura 4.2: Precipitación diaria a partir de los datos de Quiahua y los datos proporcionados por la CONAGUA en las cuencas de los ríos Los Gavilanes y Pixquiac durante el año hidrológico: mayo de 2018 a abril de 2019.

Durante el 2019, los estados de la vertiente del Golfo de México (desde Tamaulipas hasta Tabasco) presentaron un déficit pluvial de 3.5% y en algunas regiones se reportó sequía moderada a extrema (D1 - D3)<sup>1</sup>. El trimestre de junio a agosto se clasificó como el tercero más seco a nivel nacional desde 1941. Esto se debió a que durante este periodo no ingresaron ciclones tropicales al territorio nacional y las ondas tropicales se desplazaron hacia el sur. En las cuencas Los Gavilanes y Pixquiac estas condiciones estuvieron también presentes, puesto que se observaron pocos eventos de precipitación durante los primeros cinco meses del año, no obstante el mes de agosto destacó con eventos de hasta 105 mm con la presencia de la Tormenta Tropical Lorena. Otros sistemas tropicales que produjeron altas entradas de lluvia en la zona de estudio fueron las Tormentas Tropicales Narda (hasta 47 mm) y Priscilla (hasta 58.2 mm) (Ver Figura 4.3) (CONAGUA, 2020).

Finalmente, durante el 2020 el Reporte del Clima en México, reportó un retraso en el inicio de la temporada de lluvias en el centro de Veracruz. A su vez, reportó condiciones de sequía en la vertiente del Golfo de México de enero a mayo. En las cuencas Los Gavilanes y Pixquiac se observan algunos eventos de lluvia que coinciden con sistemas frontales, como son los 32, 39 y 57 (Ver Figura 4.3) (Pascual et al., 2020).

<sup>1</sup>Basado en el monitor de sequía en México (MSM) de la CONAGUA.



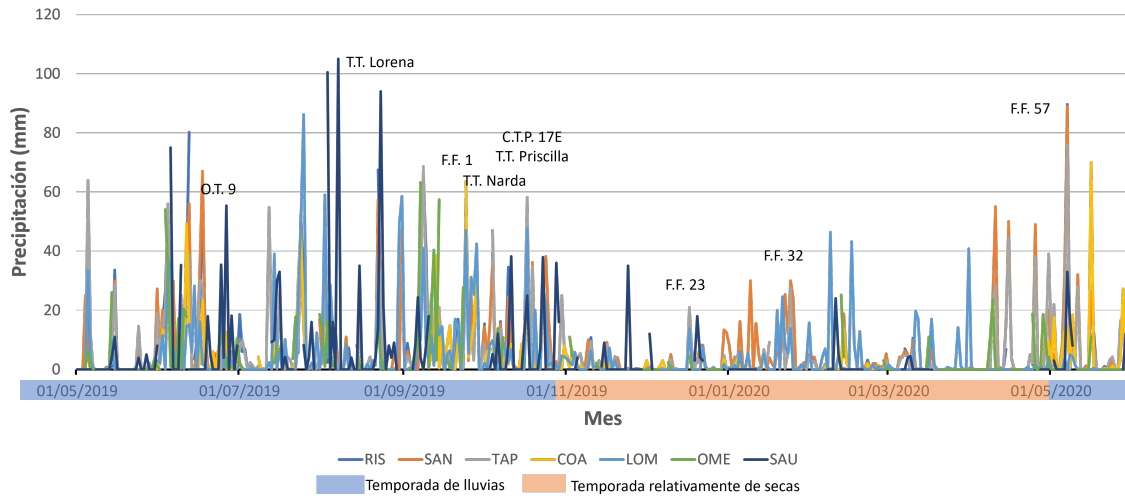


Figura 4.3: Precipitación diaria a partir de los datos de Quiahua y los datos proporcionados por la CONAGUA en las cuencas de los ríos Los Gavilanes y Pixquiac durante el año hidrológico: mayo de 2019 a mayo de 2020.

## 4.2. Eficiencia de la estimación de lluvia mediante estadística pareada.

### 4.2.1. Correlación de Spearman

Con este análisis se encontró que a nivel diario, CHIRPS exhibe una correlación despreciable para todos los casos ( $\rho$  [0.00 – 0.30]). Por su parte ERA5, mostró una correlación moderada ( $\rho = 0.5$ ). A partir de la Figura 4.4, se infiere que la fuerza de correlación descrita por  $\rho$  es lineal para el caso de ERA5, con un menor grado de dispersión —y por ende mayor de correlación— en lluvias menores a 20 mm. CHIRPS por su parte no exhibió ningún tipo de correlación monótona (lineal, logarítmica, exponencial, etc.).

En el análisis mensual se observa una tendencia lineal para todos los casos (Figura 4.5). La fuerza de correlación de CHIRPS' incrementó de manera importante para algunas estaciones; SAU, SAN y RIS, presentando una correlación alta ( $\rho = 0.7$  para los tres casos) y TAP una moderada ( $\rho = 0.6$ ). Para el resto de las estaciones (COA, LOM y OME)

la fuerza de correlación se conservó despreciable. Por otra parte, CHIRPS'' exhibió una fuerza de correlación alta ( $\rho = 0.71$ ). Al igual que en el nivel diario, la correlación mensual de ERA5 ( $\rho = 0.8$ ) fue mayor que las reportadas por CHIRPS.

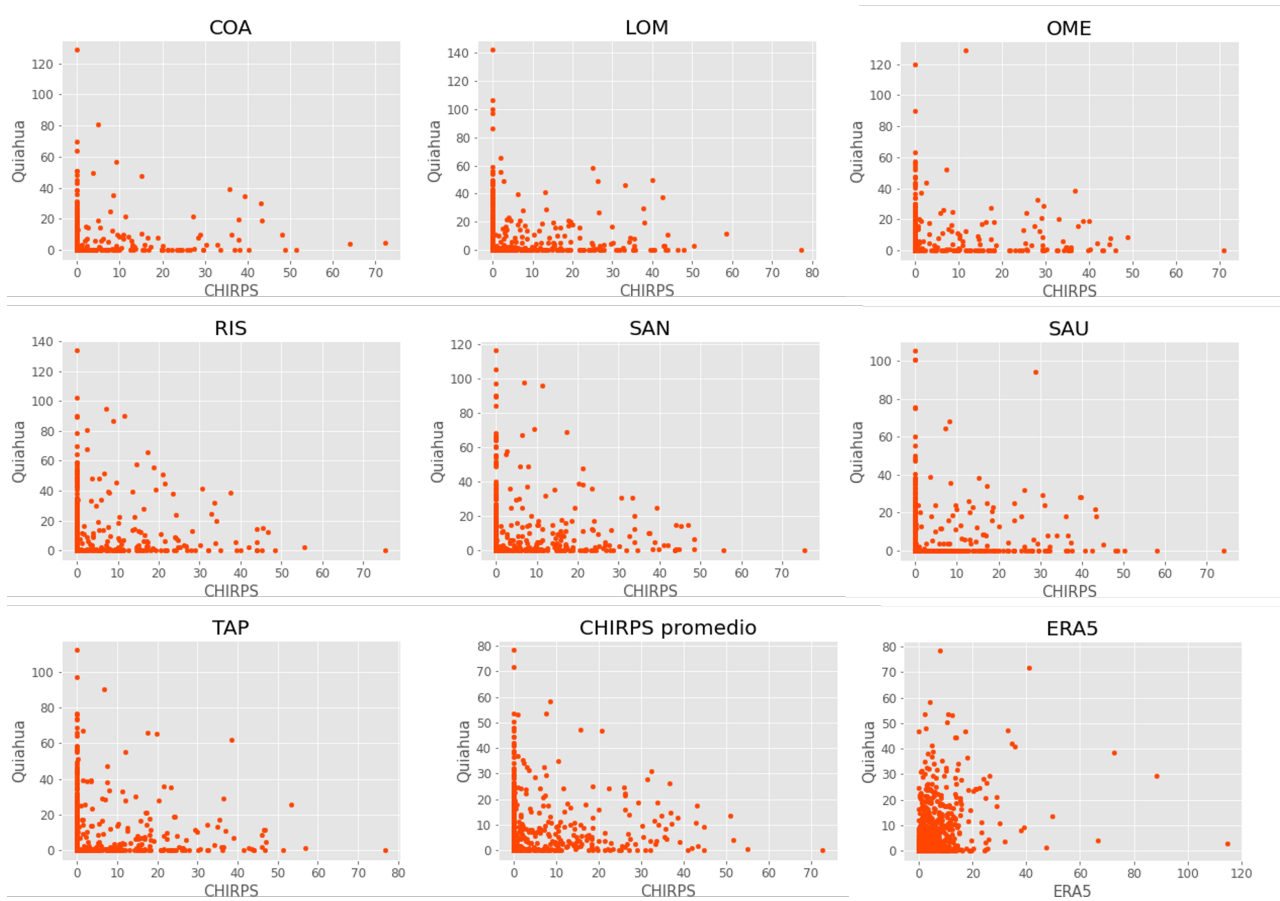


Figura 4.4: Gráficos de dispersión de los valores de precipitación (en mm) reportados por los productos CHIRPS' (estaciones), CHIRPS'' (CHIRPS promedio) y ERA5 vs las mediciones de los pluviómetros manuales de la red de monitoreo ciudadano Quiahua a nivel diario.

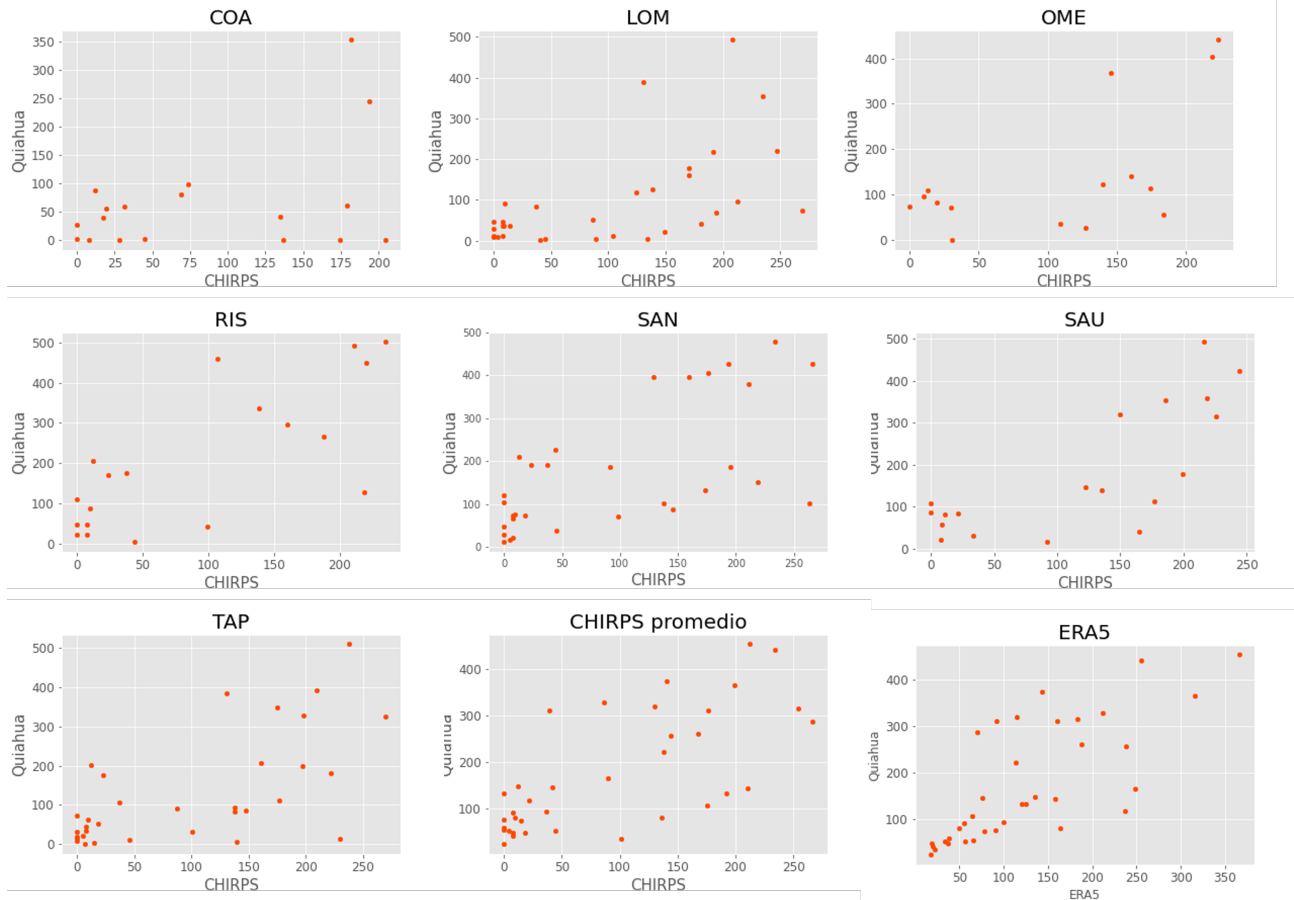


Figura 4.5: Gráficos de dispersión de los valores de precipitación (en mm) reportados por los productos CHIRPS' (estaciones), CHIRPS'' (CHIRPS promedio) y ERA5 vs las mediciones de los pluviómetros manuales de la red de monitoreo ciudadano Quiahua a nivel mensual.

#### 4.2.2. Error medio y sesgo porcentual

Los estadísticos error medio (ME) y sesgo porcentual (PBIAS) deben ser analizados en conjunto ya que el primero proporciona el error promedio en milímetros de lluvia, mientras que el segundo permite conocer el porcentaje que dicho valor representa al ser normalizado con el promedio de los valores observados, i.e. el PBIAS es equivalente a  $ME/\bar{Q}$  (Althoff & Rodrigues, 2021).

A partir de los estadísticos correspondientes, se encontró que el producto ERA5, subestima la precipitación en las cuencas Los Gavilanes y Pixquac; la subestimación a nivel

diario es de -1.80 mm (-31.5 %) en promedio, mientras que a nivel mensual es de -49.63 mm (-28 %).

Para el caso de CHIRPS' la precipitación es subestimada en todas las estaciones en ambas resoluciones temporales, a excepción de COA y LOM que a nivel mensual sobrestiman en promedio 19.96 mm (31.30 %) y 4.45 mm (5.60 %) respectivamente.

A nivel diario, las estaciones que reportan un mayor grado de error medio fueron RIS (-3.63 mm, -53 %), SAN (-3.13 mm, -50 %) y TAP (-2.64 mm, -45 %). CHIRPS'' reportó el cuarto valor más alto con una subestimación de -2.70 mm (-46 %) seguido por ERA5 (-1.8 mm, -31.5 %). Las estaciones de CHIRPS' con menor error medio fueron OME (-1.32 mm, -28.70 %), COA (-1.12 mm, -29.30 %) y LOM (-0.98 mm, -24.40 %) (Ver Figuras 4.6 y 4.8).

En el análisis mensual, las dos estaciones que registraron un menor y mayor error promedio fueron LOM (4.45 mm, 5.60 %) y COA (19.96 mm, 31.30 %) y RIS (-112.78 mm, -55.5 %) y SAN (-81.18 mm, -46.4 %), respectivamente —al igual que en el análisis diario—. El resto de las estaciones (incluyendo los resultados de ERA5 y CHIRPS'') se desplegaron de manera descendente en el siguiente orden: CHIRPS'' (81.39 mm, -49.9 %), SAU (-60.38 mm, -34.10 %), ERA5 (-49.63 mm, -28 %), OME (-37.11 mm, -26 %) y TAP (-33.27 mm, -25.9 %) (Ver Figuras 4.7 y 4.8).

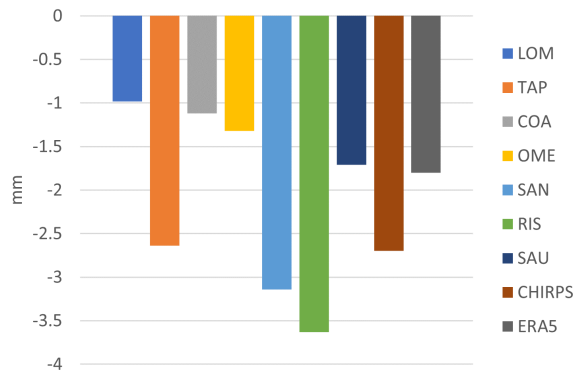


Figura 4.6: Error medio de la estimación diaria de lluvia de los productos CHIRPS' (estaciones), CHIRPS'' (CHIRPS) y ERA5 (en mm).

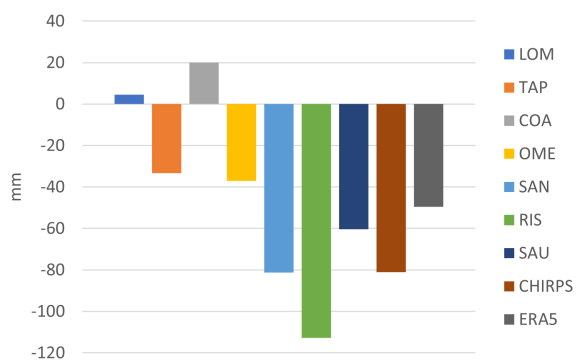


Figura 4.7: Error medio de la estimación mensual de lluvia de los productos CHIRPS' (estaciones), CHIRPS'' (CHIRPS) y ERA5 (en mm).

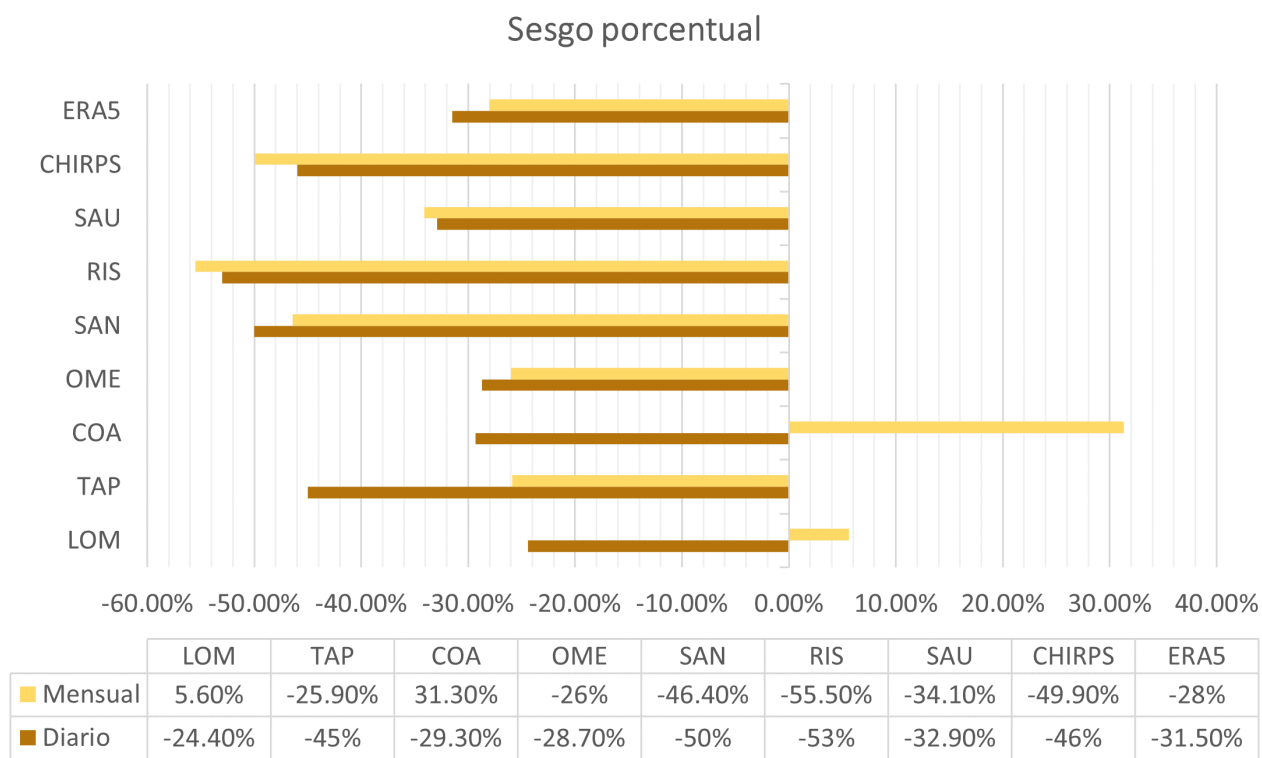


Figura 4.8: Sesgo porcentual en la estimación diaria y mensual de los productos CHIRPS' (estaciones), CHIRPS'' (CHIRPS) y ERA5.

Para todos los casos se observó una disminución porcentual del error a nivel mensual, con excepción de SAU, RIS y CHIRPS'' donde el sesgo porcentual aumentó en un 1.2%,

2% y 3.9% respectivamente. COA por su parte, pasó de una subestimación promedio diaria de -29.30% a una sobrestimación de 31.30% a nivel mensual.

De manera general el porcentaje de precipitación promedio sub y sobrestimado en los productos de precipitación CHIRPS y ERA5 disminuyó conforme la resolución temporal fue menor. Las estaciones que mostraron una mejora destacable con el cambio de resolución fueron LOM (de -24.40% a 5.60%) y TAP (de -45% a -25.90%) (Ver Figura 4.8).

### 4.2.3. Eficiencia de Nash-Sutcliffe

Al igual que para los estadísticos ME y PBIAS, el desempeño de los productos satelitales CHIRPS y ERA5 mejoraron conforme la resolución temporal fue menor:

A nivel diario CHIRPS' exhibió un desempeño insuficiente para todas las estaciones, mientras que a nivel mensual el resultado fue heterogéneo: COA, SAN y RIS exhibieron un desempeño insuficiente, SAU y TAP bueno ( $NSE = 0.4$ ) y el resto de las estaciones satisfactorio. ERA5 por su parte, pasó de tener un desempeño insuficiente a nivel diario ( $NSE = -0.03$ ) a uno bueno a nivel mensual ( $NSE = 0.4$ ), mientras que CHIRPS' tuvo un desempeño insuficiente en ambas resoluciones temporales ( $NSE = -0.72$  a nivel diario y  $NSE = 0.08$  a nivel mensual) (Ver Figura 4.9).

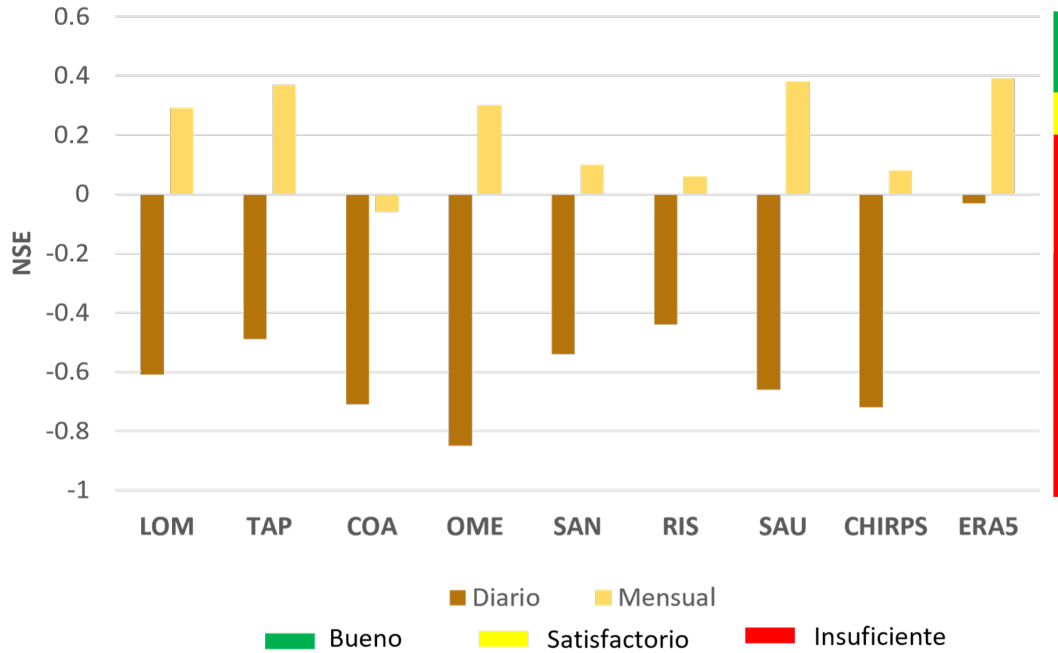


Figura 4.9: Eficiencia de Nash-Sutcliffe para los productos satelitales CHIRPS' (estaciones), CHIRPS'' (CHIRPS) y ERA5

### 4.3. Eficiencia de estimación en función del tamaño de lluvia

A partir de los índices de estadística categórica, se observó que CHIRPS tiene un bajo poder de detección (POD) para todos los tamaños de precipitación ( $POD < 0.30$ ), tanto para temporada de lluvias como para la relativamente seca. Un rasgo distintivo para este producto satelital es que el POD disminuye a medida que el tamaño lluvia aumenta; siendo máximo en la categoría "Normal" ( $CHIRPS' = 0.20$ ,  $CHIRPS'' = 0.28$  durante la estación de lluvias y  $CHIRPS' = 0.07$ ,  $CHIRPS'' = 0.08$  en la estación relativamente seca). La capacidad de detección de CHIRPS disminuyó notablemente durante la estación relativamente seca, exhibiendo un POD tendiente a cero para todas las categorías de lluvia (Ver Tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4).

En cuanto a la FAR, CHIRPS' exhibió valores particularmente elevados para las cate-

gorías "Lluvioso" y "Muy lluvioso" durante la estación de lluvias, con un valor de 0.88 y 0.96, respectivamente. En cuanto a la estación relativamente seca, la FAR alcanzó un valor máximo de 1 para las categorías "Muy lluvioso" y "Extremo". Para la categoría "Normal" la FAR fue relativamente baja (0.23 para la estación de lluvias y 0.20 para la estación relativamente seca) (Ver Tablas 4.1 y 4.2).

Por su parte, CHIRPS" presentó un valor de FAR máximo ( $FAR = 1$ ) para todas las categorías a excepción la categoría "Normal" ( $FAR = 0.32$ ) durante la estación relativamente seca. Durante la estación de lluvias, la FAR fue máxima para la categoría "Muy Lluvioso" ( $FAR = 1$ ) y "Lluvioso" ( $FAR = 0.83$ ). Para eventos de lluvia "Normales", se mantuvo a la baja —como para el caso de CHIRPS'— con un valor de 0.26. Para la categoría "Evento extremo" CHIRPS no obtuvo ningún valor numérico (abreviado NaN por sus siglas en inglés) ya que tanto A como B son 0 (Ver Tablas 4.3 y 4.4).

Para CHIRPS el índice de éxito crítico (CSI) se mantuvo bajo ( $CSI < 30$ ) en todas las categorías de precipitación y disminuyó notablemente durante la estación de secas. El valor más grande se obtuvo para acumulados diarios categorizados como "Normales": 0.19 para CHIRPS' y 0.26 para CHIRPS" (Ver Tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4).

Tabla 4.1: Desempeño del producto satelital CHIRPS' en función del tamaño de lluvia durante la estación de lluvias

<b>CHIRPS'</b>			
<b>Estación de lluvias</b>			
<b>Tamaño de lluvia</b>	<b>POD</b>	<b>FAR</b>	<b>CSI</b>
Normal	0.20	0.23	0.19
Lluvioso	0.07	0.88	0.04
Muy lluvioso	0.01	0.96	0.009
Extremo	0	NaN	0



Tabla 4.2: Desempeño del producto satelital CHIRPS' en función del tamaño de lluvia durante la estación relativamente seca

<b>CHIRPS'</b>			
<b>Estación relativamente seca</b>			
<b>Tamaño de lluvia</b>	<b>POD</b>	<b>FAR</b>	<b>CSI</b>
Normal	0.07	0.20	0.07
Lluvioso	0.015	0.87	0.01
Muy lluvioso	0	1	0
Extremo	0	1	0

Tabla 4.3: Desempeño del producto satelital CHIRPS'' en función del tamaño de lluvia durante la estación de lluvias

<b>CHIRPS''</b>			
<b>Estación de lluvias</b>			
<b>Tamaño de lluvia</b>	<b>POD</b>	<b>FAR</b>	<b>CSI</b>
Normal	0.28	0.26	0.19
Lluvioso	0.14	0.83	0.04
Muy lluvioso	0	1	0
Extremo	NaN	NaN	NaN

Tabla 4.4: Desempeño del producto satelital CHIRPS' en función del tamaño de lluvia durante la estación relativamente seca

<b>CHIRPS''</b>			
<b>Estación relativamente seca</b>			
<b>Tamaño de lluvia</b>	<b>POD</b>	<b>FAR</b>	<b>CSI</b>
Normal	0.08	0.32	0.09
Lluvioso	0	1	0
Muy lluvioso	0	1	0
Extremo	NaN	1	0

ERA5 en cambio, exhibió un alto poder de detección en ambas estaciones para días categorizados como "Normales", 0.94 en la de lluvias y 0.79 en la de secas. Al igual que en el caso de CHIRPS, el valor mínimo de POD ( $POD = 0$ ) se obtuvo para eventos "Extremos", sin embargo, a diferencia de dicho producto, el POD fue mayor para la categoría "Muy lluvioso" que para la categoría "Lluvioso" durante la temporada de lluvias. La estación de secas por su parte, exhibió la misma tendencia que CHIRPS, i.e., un POD que decrece conforme el tamaño de lluvia aumenta. Para las categorías "Normal" y "Muy lluvioso" el

POD fue mayor en la estación de lluvias, con una diferencia de 0.15 y 0.03, respectivamente. Para días "Lluviosos" el POD fue mayor durante la temporada relativamente seca, con una diferencia de 0.29.

La FAR únicamente obtuvo valores bajos para eventos categorizados como "Normales" (0.12 en lluvias y 0.06 en secas). En el resto de las categorías los valores mínimos para cada una de las estaciones fueron de 0.60 para la categoría "Muy lluvioso" durante la temporada de lluvias y de 0.68 para la categoría "Lluvioso" durante la temporada relativamente seca.

Finalmente, el CSI es elevado en ambas estaciones para días "Normales" (0.83 en la temporada de lluvias y 0.75 en la temporada relativamente seca). Para el resto de los casos los valores se mantuvieron muy bajos ( $CSI \leq 0.1$ ) a excepción de la categoría "Lluviosos" durante la estación de secas ( $CSI = 0.37$ ) (Ver Tabla 4.5 y Tabla 4.6).

Tabla 4.5: Desempeño del producto de reanálisis ERA5 en función del tamaño de lluvia durante la estación de lluvias

<b>ERA5</b>			
<b>Estación de lluvias</b>			
<b>Tamaño de lluvia</b>	<b>POD</b>	<b>FAR</b>	<b>CSI</b>
Normal	0.94	0.12	0.83
Lluvioso	0.08	0.79	0.06
Muy lluvioso	0.12	0.60	0.1
Extremo	NaN	1	0

Tabla 4.6: Desempeño del producto de reanálisis ERA5 en función del tamaño de lluvia durante la estación relativamente seca

<b>ERA5</b>			
<b>Estación relativamente seca</b>			
<b>Tamaño de lluvia</b>	<b>POD</b>	<b>FAR</b>	<b>CSI</b>
Normal	0.79	0.06	0.75
Lluvioso	0.37	0.68	0.20
Muy lluvioso	0.09	0.80	0.06
Extremo	NaN	NaN	NaN

# Capítulo 5

## Discusión

### 5.1. Precipitación en las cuencas de estudio

Durante el periodo estudiado (junio 2017 - mayo 2020), se encontró que el contar con datos como Quiahua facilita la visualización de los impactos de los fenómenos meteorológicos en la escala local. Esto permitió correlacionar exitosamente algunos eventos de precipitación con sistemas atmosféricos que causan la modulación de la lluvia en ambas cuencas, como son los sistemas frontales y los ciclones tropicales (Figuras 4.1, 4.2 y 4.3).

Asimismo, se observó la marcada estacionalidad descrita por [García \(2004\)](#) —temporada relativamente seca: noviembre-abril, temporada de lluvias: mayo-octubre— mediante los años hidrológicos ilustrados en las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3, así como con el cálculo de los percentiles 75, 90 y 99, los cuales se utilizaron para clasificar la lluvia en ambas estaciones, a partir de los criterios sugeridos por [Alfaro Lozano \(2014\)](#). En la Tabla 3.4 se observa que los rangos de la estación de lluvias doblan en magnitud los de la estación relativamente seca. Un ejemplo de ello es que el 99 % de la lluvia durante la estación relativamente seca está por debajo de los 49 mm mientras que en la estación de lluvias alcanza máximos de 84 mm.

Si bien, el reporte del clima en México, proveído por la CONAGUA ayuda mes a mes a conocer las condiciones atmosféricas y el comportamiento de fenómenos meteorológicos a nivel nacional, los impactos a nivel local, como es el caso del área de estudio, no son

mencionados en gran medida. Ahondado a ello, la ausencia de estaciones meteorológicas en la región ([Guzmán Huerta & Muñoz Villers, 2021](#)), dificulta la caracterización de la lluvia en ambas cuencas. Es por ello que proyectos como Quiahua podrían brindar un mayor entendimiento de la distribución de la precipitación a nivel nacional, al ampliar la cobertura de mediciones *in situ* y por ende hacer factible la evaluación de distintos productos de estimación remota como CHIRPS y ERA5.

## 5.2. Desempeño de CHIRPS y ERA5 en la estimación de lluvia diaria y mensual

En el presente trabajo de investigación se evaluó el desempeño de los productos CHIRPS y ERA5 a partir de distintas pruebas de estadística pareada (coeficiente de correlación de Spearman ( $\rho$ ), NSE, ME y PBIAS). Los resultados revelaron que ambos productos tienden a (a) exhibir un mayor desempeño cuando la resolución temporal es mensual y (b) subestimar la precipitación en ambas resoluciones temporales (diaria y mensual).

Respecto al primer punto, la fuerza de correlación entre CHIRPS y Quiahua a escala diaria fue de nula ( $p\text{-value} > 0.05$ ) a despreciable ( $\rho \leq 0.3$ ,  $p\text{-value} < 0.05$ ) y valores negativos de NSE, lo cual estadísticamente significa que la media de Quiahua es mejor predictor que CHIRPS ([Legates & McCabe Jr, 1999](#)) y de acuerdo a los parámetros sugeridos por [Molnar \(2011\)](#), que el desempeño es insuficiente para todos los casos ( $\text{NSE} < 0.2$ ). Respecto al ME y PBIAS se observó una tendencia de subestimación y según los criterios de [Moriasi et al. \(2007\)](#), los resultados de CHIRPS fueron insatisfactorios al presentar en la mayor parte de los casos subestimaciones mayores al 25 %, en un rango de -28.70 % a -53 % —con excepción de LOM con un  $\text{PBIAS} = -24.40\%$ —. Dicho lo anterior, las distintas pruebas estadísticas sugieren que CHIRPS no es recomendable a escala diaria.

Por su parte, a nivel mensual los resultados fueron variados, puesto que existieron esta-

ciones —como TAP— que destacaron por presentar resultados relativamente satisfactorios en todas las pruebas estadísticas, a la vez que casos como las estaciones SAN, LOM, OME así como CHIRPS” en donde se obtuvieron puntajes favorables en algunas pruebas y deficientes en otras. Este comportamiento variado se observó también en ERA5 a nivel diario, exhibiendo una fuerza de correlación moderada ( $\rho = 0.5$ ), desempeño insuficiente de NSE (NSE = -0.03) —aunque mejor que para todos los casos de CHIRPS en esa misma escala temporal— y una subestimación de 31.50 %.

Esta aparente falta de congruencia entre los estadísticos, ha sido documentada en distintos estudios que discuten las ventajas y limitaciones de las pruebas estadísticas comúnmente utilizadas para evaluar el desempeño de estimación vía remota así como de modelos hidrológicos en comparación con mediciones *in situ* (Legates & McCabe Jr, 1999; Althoff & Rodrigues, 2021; McCuen et al., 2006).

Respecto a los estadísticos utilizados en el presente estudio, se ha reportado que el coeficiente de correlación de Spearman, ME y PBIAS deben ser complementados con otras pruebas estadísticas. En el caso del primer estadístico ( $\rho$ ), es necesario debido a que la conversión de valores numéricos a rangos conlleva a una pérdida de información (Legates & McCabe Jr, 1999). Es por ello, que en trabajos hidrológicos por lo general se opta por su contraparte paramétrica, i.e. el coeficiente de correlación de Pearson. No obstante, autores como Badii et al. (2014) resaltan la importancia de no aplicar estadísticos paramétricos a distribuciones no paramétricas, como lo fueron las series de precipitación de Quiahua. Asimismo Althoff y Rodrigues (2021) resaltan que si bien, existen intervalos —como el propuesto por Moriasi et al. (2007) para el PBIAS:  $\pm 25\%$ — para evaluar si el desempeño de un modelo es satisfactorio a partir de medidas de error como ME y PBIAS, ambas pruebas por sí solas son insuficientes para evaluar un modelo adecuadamente.

Por otro lado, a diferencia de pruebas como el coeficiente de correlación de Spearman, los métodos que prueban la significancia estadística de la muestra previo a aplicar NSE, aún no han sido bien documentados (McCuen et al., 2006). Adicionalmente, parece no

existir un consenso entre los valores obtenidos de NSE en relación con la eficiencia del modelo (Althoff & Rodrigues, 2021); un ejemplo de ello es la discrepancia en la interpretación de resultados que sugieren Dinku et al. (2007) y (Dubache et al., 2021) y la propuesta por Molnar (2011), la cual fue utilizada en el presente trabajo de investigación, al proveer más categorías (insuficiente, satisfactorio, bueno, muy bueno y excelente) para calificar el desempeño de los productos de interés.

Autores como Gupta et al. (2009) y Althoff y Rodrigues (2021) han reportado que en cuencas con una estacionalidad marcada —como es el caso de Los Gavilanes y Pixquiac—, se sugiere sustituir la línea base (media de los datos) por valores como la media climatológica estacional, tanto para la NSE como para el PBIAS y ME (al ser PBIAS equivalente a  $ME/\bar{Q}$ ) (Gupta et al., 2009; Althoff & Rodrigues, 2021). También se han propuesto formas modificadas de NSE como la relativa y la logarítmica, las cuales pretenden remediar —forma relativa— o reducir —forma logarítmica— la hipersensibilidad a los valores extremos, así como volver el índice más sensible a valores bajos (siendo especialmente notable en su forma relativa) (Krause et al., 2005). Sin embargo, en estudios similares a este no es común encontrar formas modificadas de NSE para evaluar productos como CHIRPS y ERA5.

A pesar de que se han descrito las limitaciones que giran en torno a las herramientas estadísticas previamente mencionadas, los estadísticos NSE, ME y PBIAS siguen siendo ampliamente utilizados en la evaluación de los distintos productos de estimación de precipitación vía remota; siendo algunos ejemplos los trabajos realizados por Dinku et al. (2007), Ghizat et al. (2021), Logah et al. (2021) y (Paredes Trejo et al., 2016).

Con base en la literatura discutida anteriormente, así como los resultados obtenidos a partir de los estadísticos seleccionados ( $\rho$ , NSE, ME y PBIAS), se consideró que el resultado es más confiable cuando el conjunto de los estadísticos utilizados sugieren resultados similares, como fue el caso de ERA5 a nivel mensual. El producto a esta resolución temporal exhibió una fuerza de correlación alta ( $\rho = 0.8$ ), un buen desempeño (NSE = 0.4) y una subestimación promedio de 28 % que corresponde a un ME de -49.63 mm. Si bien este

resultado excede el umbral propuesto por Moriasi et al. (2007), al exhibir una diferencia únicamente del 3% y buenos puntajes en el resto de los estadísticos, se consideró que el desempeño fue satisfactorio.

### 5.3. CHIRPS y ERA5: capacidad de detección de distintas categorías de lluvia

A diferencia del análisis de estadística pareada, el cual fue utilizado para evaluar el desempeño de los productos ERA5 y CHIRPS para estimar la cantidad de lluvia precipitada en las cuencas Los Gavilanes y Pixquiac, la estadística categórica (POD, FAR y CSI) se utilizó para evaluar la capacidad de detección de ambos productos en función del tamaño de lluvia y la estacionalidad (temporada de lluvias y relativamente seca<sup>1</sup>).

Respecto a ello, se encontró de manera general que (a) es mayor para lluvias categorizadas como *Normales*, (b) nula para eventos *Extremos* y (c) insuficiente para las categorías *Lluvioso* y *Muy lluvioso*. Por su parte, los resultados en función de la estación, sugirieron que durante la estación de lluvias (mayo - octubre) la capacidad de detección es mayor para todos los tamaños de lluvias en comparación con la estación relativamente seca (noviembre - abril).

Se encontró que CHIRPS” no mejoró en comparación con CHIRPS’ y ambos exhibieron capacidad de detección muy baja en el área de estudio para todos los tamaños de lluvia en ambas estaciones ( $POD < 0.28$ ,  $CSI < 0.19$ ). Por el contrario, ERA5 obtuvo resultados favorables para las lluvias categorizadas como *Normales*, exhibiendo una probabilidad de detección del 94% ( $POD_w = 0.94$ ) durante la estación de lluvias (0.1 - <21.2 mm) y del 79% ( $POD_d = 0.79$ ) durante la estación relativamente seca (0.1 - <10.2 mm). En cuanto a la proporción de falsas alarmas en ambas estaciones los valores de FAR fueron bajos

---

<sup>1</sup>Con el fin de distinguir la estación de la que se está hablando, a cada índice estadístico se le agregará el subíndice ”w” cuando se refiera a la estación de lluvias y ”d” a la relativamente seca.

( $FAR_w = 0.12$ ,  $FAR_d = 0.06$ ). Conjuntando los eventos correctamente detectados (A), las falsas alarmas (B) y los eventos no detectados por el producto ERA5 (C), el éxito crítico (CSI) del producto fue 0.83 ( $CSI_w$ ) y 0.75 ( $CSI_d$ ).

El hecho de que la capacidad de detección de CHIRPS y ERA5 fuera baja para la mayor parte de los tamaños de lluvia analizados puede deberse a distintas razones; en primera instancia a las características espaciales ( $\approx 141 \text{ km}^2$ ) y temporales (aproximadamente tres años) en las que operó Quiahua y con las cuales fue posible realizar la evaluación.

Respecto al dominio espacial, el área de estudio destaca por ser demasiado pequeña en comparación con la mayor parte de los trabajos que evalúan productos globales o cuasi globales que estiman precipitación —como lo son CHIRPS y ERA5— (Vy, 2020; Dinku et al., 2007, 2008, 2010, 2018; Duan et al., 2012; Ghizat et al., 2021; Paredes Trejo et al., 2016; Paredes-Trejo et al., 2019; Yu et al., 2020; Ghizat et al., 2021; Logah et al., 2021; Cavalcante et al., 2020; Paredes Trejo et al., 2016; Morales-Velázquez et al., 2021; Siddig et al., 2022; Degefu et al., 2022; Dubache et al., 2021; Dembélé & Zwart, 2016; Derin & Yilmaz, 2014; G. Tang et al., 2020; Xu et al., 2019; R. Xu et al., 2017). La desventaja de hacer evaluaciones a este nivel espacial ( $\approx 141 \text{ km}^2$ ) es que la capacidad de estimación de precipitación se reduce drásticamente para eventos locales en comparación con sistemas sinópticos que están organizados en gran escala (Michaelides et al., 2009). Adicionalmente, se ha reportado que las estimaciones promedio de precipitación a lo largo de grandes áreas y periodos tendrán mayor posibilidad de ser correctos que aquellos estimados en áreas más pequeñas y menos tiempo, como el caso del presente estudio (Kidder & Vonder, 1995).

Otro punto a destacar es el régimen topográfico en el que yacen las cuencas evaluadas, que al estar ubicadas en una zona montañosa, se caracterizan por presentar una alta variabilidad espacio-temporal controlada por la orografía, fungiendo como uno de los ambientes más desafiantes para los productos que estiman precipitación vía remota (Derin & Yilmaz, 2014; Dinku et al., 2008). En el caso de aquellos que utilizan información de sensores satelitales VIS/IR y PMW combinada con información *in situ* —como es el caso



de CHIRPS— están expuestos a sesgos sistemáticos que provienen de los errores de muestreo, limitaciones del sensor y sesgos de las estimaciones de los algoritmos, lo cual puede decantar en sobre o subestimaciones sistemáticas (Siddig et al., 2022).

En el caso de CHIRPS, se observó que existe una tendencia hacia la subestimación que muy probablemente influyó la detección de las distintas categorías de lluvia. Estos resultados probablemente pueden ser explicados por la ubicación y dimensión de ambas cuencas, así como la topografía, las limitaciones intrínsecas de los sensores PMW, VIS/IR y la información *in situ* con la cual se calibran los productos —por lo general escasa en este tipo de regiones—.

Respecto a lo anterior se ha documentado que para el caso regiones montañosas ubicadas en barlovento —como las cuencas del presente estudio— suele existir una tendencia a la subestimación por parte de distintos productos satelitales, debido a que la lluvia orográfica cálida no puede ser detectada por ningún sensor pasivo, sea IR o MW (Scofield & Kuligowski, 2003; Petty & Krajewski, 1996; Dinku et al., 2007, 2010). Esto se debe a que los sensores IR utilizan la temperatura de tope de nube para estimar precipitación, cuyo umbral (235 K) es menor que la temperatura presentada en este tipo de lluvia (Dinku et al., 2018).

Por su parte, los sensores MW presentan problemas en detectar ese tipo de precipitación debido a que al provenir de nubes cálidas carecen de partículas de hielo, las cuales son utilizadas por los sensores PMW para detectar precipitación (Dinku et al., 2008, 2018). Otra limitación asociada a este tipo de sensores es que al tener una mayor longitud de onda —en comparación con los sensores VIS/IR—, destacan por tener menor resolución espacial, por lo que su precisión se ve reducida a escalas locales. Aunado a ello, el largo intervalo de tiempo entre escaneos de PMW probablemente resultará en precipitación perdida (Kidder & Vonder, 1995; Derin & Yilmaz, 2014).

Otro punto a destacar es que los algoritmos de los productos satelitales están por lo

general sensibilizados a estimar precipitación líquida en vez de hidrometeoros congelados (Derin & Yilmaz, 2014), por lo que pueden presentar problemas en detectar eventos de precipitación fuertes que pueden presentar granizo, como suele ocurrir en la zona media y alta de la montaña.

A diferencia de CHIRPS, ERA5 es un producto que no incorpora ninguna medición directa —e.g. información proveniente de VIS/IR, PMW o información *in situ*—, por el contrario, la lluvia se produce como resultado de la dinámica interna de un modelo de circulación global y datos de las principales variables atmosféricas, como el viento, temperatura y humedad (Vy, 2020). A pesar de que por lo general, los productos de reanálisis, al ser más indirectos, se caracterizan por ser menos precisos que los productos satélites (Vy, 2020), los resultados del presente estudio, mostraron que ERA5 tiene un mejor desempeño que CHIRPS, siendo particularmente bueno para detectar adecuadamente lluvias catalogadas como "Normales" que corresponden al 75 % de los eventos de precipitación dentro del área de estudio ( $CSI_w=0.83$ ,  $CSI_d=0.75$ ).

Estos resultados pueden deberse a distintas razones, entre las que destaca la resolución espacio-temporal de este producto. Respecto a la resolución espacial, a pesar de que la malla de ERA5 ( $0.25^\circ$ ) es mucho menos fina que la de CHIRPS ( $0.05^\circ$ ), ERA5 probablemente pudo exhibir un mayor desempeño debido a que la cobertura espacial de la malla tiene más probabilidad de detectar núcleos de tormenta así como otras características que modulan la precipitación dentro y fuera de las cuencas.

En comparación con estudios como el de Vy (2020) que optan por reescalar la malla de CHIRPS a la de ERA5 —mediante la paquetería xESMF de Phyton—, en el presente análisis se optó por prescindir de éste proceso, por dos razones, por un lado, debido la escala espacial a la que se trabajó ( $\approx 141 \text{ km}^2$ ), que resulta ser demasiado pequeña para la malla de ERA5 y por el otro, con la finalidad de aprovechar la alta resolución espacial por la que destaca CHIRPS frente a otros productos satelitales.

En cuanto a la resolución temporal, ERA5 al tener una resolución horaria, pudo ajustarse de manera adecuada al horario en el que los voluntarios y las voluntarias de Quiahua registraban el acumulado de diario —i.e., en un intervalo de 6 am a 10 am<sup>2</sup>—, evitando así pérdidas significativas por desfase de tiempo —como pudo ser el caso de CHIRPS<sup>3</sup>— particularmente visible en el análisis de estadística pareada a nivel diario y los resultados de estadística categórica.

---

<sup>2</sup>Para ERA5 los acumulados diarios se hicieron de 8:00 AM a 8:00 AM del día siguiente

<sup>3</sup>Puesto que el artículo de [Funk et al. \(2015\)](#) no provee el horario de referencia de CHIRPS —generalmente reportado en UTC—, se desconoce el desfase temporal que presentan los datos de este producto a nivel diario

# Capítulo 6

## Conclusiones

En la última década, cada vez son más frecuentes los trabajos que haciendo uso de productos que estiman precipitación vía remota, —tanto aquellos basados en información satelital como los de reanálisis— realizan estudios hidrológicos en regiones caracterizadas por una topografía compleja y redes de monitoreo *in situ* dispersas. Es por ello que el presente trabajo de investigación tuvo como objetivo evaluar el desempeño del producto satelital CHIRPS y el de reanálisis ERA5 en dos cuencas de montaña del centro de Veracruz, México (Los Gavilanes y Pixquiac); fungiendo como uno de los primeros trabajos que evalúan el desempeño de distintos productos en México y destacando por ser el primero en hacerlo mediante datos provenientes de un proyecto de Ciencia Ciudadana (Quiahua).

Las evaluaciones de ambos productos se realizaron a partir de aproximadamente tres años de información (9 de junio de 2017 a 30 de mayo de 2020). Mediante un análisis riguroso de distintas pruebas de estadística pareada e índices de estadística categórica, se concluyó que los hallazgos y contribuciones principales del presente trabajo de investigación, son los siguientes:

1. De acuerdo los estadísticos aplicados, CHIRPS no es un producto cuyo uso sea recomendable en el área de estudio al exhibir un bajo poder de estimación —en ambas resoluciones temporales— y detección —tanto en la temporada de lluvias como la relativamente seca— en el área de estudio.

2. ERA5 demostró ser un producto que provee estimaciones satisfactorias a nivel mensual (dentro de las cuencas estudiadas), a la vez que destaca por detectar exitosamente eventos catalogados como "*Normales*" —en especial durante la temporada de lluvias— que representan el 75% de la precipitación dentro de las cuencas. Al ser un producto que representa adecuadamente bajas cantidades de precipitación, así como la mayor parte de los eventos en el área de estudio, ERA5 podría ser aplicado exitosamente para el monitoreo de sequía en las cuencas Los Gavilanes y Pixquiac.
3. Existe un distanciamiento importante entre la teoría detrás de las pruebas de estadística pareada y la aplicación de las mismas en el campo de la hidrología, por lo que se recomienda analizar las pruebas en conjunto y evaluar si sugieren resultados similares antes de dictaminar si un producto es —o no— eficiente.
4. La Ciencia Ciudadana tiene un enorme potencial para el desarrollo de estudios hidrológicos, particularmente a escala local y en regiones de bajo monitoreo o terreno complejo —como las zonas de montaña— donde los productos de estimación vía remota presentan menores facultades para estimar y detectar parámetros de interés hidrológico, como es la precipitación.

Trabajos como el presente, pretenden impulsar futuras investigaciones, que haciendo un uso adecuado de las herramientas de estimación vía remota, contribuyan al entendimiento de la dinámica hidrológica de los ecosistemas tropicales de montaña y por ende se puedan generar más y mejores estrategias para la gestión del agua y bosque en latitudes tropicales.

## Referencias

- Alfaro Lozano, L. (2014). Estimación de umbrales de precipitaciones extremas para la emisión de avisos meteorológico. *Nota Técnica 001 SENAMHI-DGM-2014*.
- Althoff, D., & Rodrigues, L. N. (2021). Goodness-of-fit criteria for hydrological models: Model calibration and performance assessment. *Journal of Hydrology*, *600*, 126674. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126674>
- Badii, M., Guillen, A., Lugo Serrato, O., & Aguilar Garnica, J. (2014). Non-parametric correlation and its application in scientific research. *International Journal of Good Conscience*, *9*(2), 31–40.
- Barrett, E. C., & Martin, D. W. (1981). *Use of satellite data in rainfall monitoring*. Academic press.
- Beven, K. J. (2011). *Rainfall-runoff modelling: the primer*. John Wiley & Sons.
- Borradaile, G. J. (2003). *Statistics of earth science data: their distribution in time, space and orientation*. Springer Science & Business Media.
- Briggs, P., & Cogley, J. G. (1996). Topographic bias in mesoscale precipitation networks. *Journal of Climate*, *9*(1), 205–218. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009<0205:TBIMPV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<0205:TBIMPV>2.0.CO;2)
- Báez, A., Padilla, H., Cervantes, J., Pereyra, D., & Belmont, R. (1997). Rainwater chemistry at the eastern flanks of the Sierra Madre Oriental, Veracruz, Mexico. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *102*(D19), 23329–23336. doi: <https://doi.org/10.1029/97JD02077>
- Catuna, N. (1995). La percepción remota y el análisis del espacio geográfico. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, *5*(2), 83–106.
- Cavalcante, R. B. L., da Silva Ferreira, D. B., Pontes, P. R. M., Tedeschi, R. G., da Costa, C. P. W., & de Souza, E. B. (2020). Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia. *Atmospheric Research*, *238*, 104879.
- Childs, C. (2004). Interpolating surfaces in arcgis spatial analyst. *ArcUser*, 32–35.
- CONAGUA. (2017). *Reporte del Clima en México. Reporte anual 2017*. Autor.

- CONAGUA. (2018). *Reporte del Clima en México. Reporte anual 2018*. CONAGUA.
- CONAGUA. (2020). *Reporte del Clima en México. Reporte anual 2019*. Autor.
- CONAGUA. (s.f). *El radar meteorológico*. Descargado 02-2022, de <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/radares-meteorologicos-separador/el-radar-meteorologico>
- Darrera. (2022). *Pluviómetro de balancín*. Descargado 02-2022, de <https://www.darrera.com/wp/es/producto/15189-pluviometro-balancin/>
- Davie, T. (2008). *Fundamentals of hydrology*. Routledge.
- Degefu, M. A., Bewket, W., & Amha, Y. (2022). Evaluating performance of 20 global and quasi-global precipitation products in representing drought events in Ethiopia I: Visual and correlation analysis. *Weather and Climate Extremes*, 35, 100416. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100416>
- Dembélé, M., & Zwart, S. J. (2016). Evaluation and comparison of satellite-based rainfall products in Burkina Faso, West Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 37(17), 3995-4014. doi: [10.1080/01431161.2016.1207258](https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1207258)
- Derin, Y., & Yilmaz, K. K. (2014). Evaluation of multiple satellite-based precipitation products over complex topography. *Journal of Hydrometeorology*, 15(4), 1498–1516. doi: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-0191.1>
- Dinku, T., Ceccato, P., Grover-Kopec, E., Lemma, M., Connor, S., & Ropelewski, C. (2007). Validation of satellite rainfall products over East Africa's complex topography. *International Journal of Remote Sensing*, 28(7), 1503–1526. doi: <https://doi.org/10.1080/01431160600954688>
- Dinku, T., Chidzambwa, S., Ceccato, P., Connor, S., & Ropelewski, C. (2008). Validation of high-resolution satellite rainfall products over complex terrain. *International Journal of Remote Sensing*, 29(14), 4097–4110. doi: <https://doi.org/10.1080/01431160701772526>
- Dinku, T., Connor, S. J., & Ceccato, P. (2010). Comparison of CMORPH and TRMM-3B42 over mountainous regions of Africa and South America. En *Satellite rainfall applications for surface hydrology* (pp. 193–204). Springer. doi: [10.1007/978-90-481-2915-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2915-7_11)

- Dinku, T., Funk, C., Peterson, P., Maidment, R., Tadesse, T., Gadain, H., & Ceccato, P. (2018). Validation of the chirps satellite rainfall estimates over eastern africa. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *144*, 292–312. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.3244>
- Duan, Z., Bastiaanssen, W., & Liu, J. (2012). Monthly and annual validation of TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA) products in the Caspian Sea Region for the period 1999–2003. En *2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 3696–3699). doi: [10.1109/IGARSS.2012.6350613](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6350613)
- Dubache, G., Asmerom, B., Ullah, W., Ogwang, B. A., Amiraslani, F., Weijun, Z., & Gul, C. (2021). Testing the accuracy of high-resolution satellite-based and numerical model output precipitation products over Ethiopia. *Theoretical and Applied Climatology*, *146*(3), 1127–1142. doi: [10.1007/s00704-021-03783-x](https://doi.org/10.1007/s00704-021-03783-x)
- ECMWF. (2020). *Fact sheet: Reanalysis*. Descargado 01-2021, de <https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/focus/2020/fact-sheet-reanalysis>
- Egan, P., & Price, M. (2014). Las montañas como torres de agua del mundo: Protegiendo el agua y los servicios ecosistémicos de montaña ante el cambio climático. *Informe de política. UICN Comisión para la Gestión de Ecosistemas*.
- Eitzel, M., Cappadonna, J., Santos-Lang, C., Duerr, R., Virapongse, A., West, S., ... Jiang, Q. (2017). Citizen science terminology matters: Exploring key terms. *Citizen science: Theory and practice*, *2*(1). doi: <http://doi.org/10.5334/cstp.96>
- Ferraro, R. R., Kusselson, S. J., & Colton, M. (1998). An introduction to passive microwave remote sensing and its applications to meteorological analysis and forecasting. *Polarization*, *1*, 2.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, *2*(150066), 1–21. doi: <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía-UNAM.
- Ghozat, A., Sharafati, A., & Hosseini, S. A. (2021). Long-term spatiotemporal evaluation of



- CHIRPS satellite precipitation product over different climatic regions of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 143(1), 211–225. doi: [10.1007/s00704-020-03428-5](https://doi.org/10.1007/s00704-020-03428-5)
- Gran Diccionario Nahuatl. (2002). *Definición quiahua*. Descargado 06-2021, de <https://gdn.iib.unam.mx/diccionario/quiahua>
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1-2), 80–91. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Guzmán Huerta, A., & Muñoz Villers, L. E. (2021). Comportamiento hidrológico de una mesocuenca de montaña en el centro oriente de México. *Bosque (Valdivia)*, 42(2), 163–175. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002021000200163>
- Hauke, J., & Kossowski, T. (2011). Comparison of values of Pearson's and Spearman's correlation coefficients on the same sets of data. *Quaestiones geographicae*, 30(2), 87–93. doi: [10.2478/v10117-011-0021-1](https://doi.org/10.2478/v10117-011-0021-1)
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., . . . others (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Holwerda, F., Alvarado-Barrientos, M., & González Martínez, T. (2016, 07). Surface energy exchange in a tropical montane cloud forest environment: Flux partitioning, and seasonal and land cover-related variations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228-229, 13-28. doi: [10.1016/j.agrformet.2016.06.011](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.06.011)
- Holwerda, F., Bruijnzeel, L., Barradas, V., & Cervantes, J. (2013). The water and energy exchange of a shaded coffee plantation in the lower montane cloud forest zone of central Veracruz, Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology*, 173, 1-13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.12.015>
- Holwerda, F., Bruijnzeel, L., Muñoz-Villers, E., Equihua, M., & Asbjornsen, H. (2010). Rainfall and cloud water interception in mature and secondary lower montane cloud forests of central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology*, 384(1), 84–962. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.012>
- Huffman, G. J., Adler, R. F., Arkin, P., Chang, A., Ferraro, R., Gruber, A., . . . Schneider,

- U. (1997). The global precipitation climatology project (GPCP) combined precipitation dataset. *Bulletin of the american meteorological society*, 78(1), 5–20. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0005:TGPCPG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0005:TGPCPG>2.0.CO;2)
- Kholer, K., Wehril, A., & Jurek, M. (2014). *Las montañas y el cambio climático. una preocupación mundial*. Centro para el Desarrollo y el Medio Ambiente (CDE), Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), y Geographica Bernensia.
- Kidder, S., & Vonder, T. H. (1995). *Satellite meteorology: an introduction*. Gulf Professional Publishing.
- Krause, P., Boyle, D., & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in geosciences*, 5, 89–97. doi: <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- Laing, A., & Evans, J. T. (2016). *Introduction to tropical meteorology. A Comprehensive Online Print Textbook*. The COMET Program.
- Legates, D. R., & McCabe Jr, G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water resources research*, 35(1), 233–241. doi: <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>
- Levizzani, V. (2009). Satellite clouds and precipitation observations for meteorology and climate. En *Hydrological modelling and the water cycle* (pp. 49–68). Springer. doi: [10.1007/978-3-540-77843-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-77843-1_3)
- Logah, F., Adjei, K., Obuobie, E., Gyamfi, C., & Odai, S. (2021, 03). Evaluation and comparison of satellite rainfall products in the Black Volta Basin. *Environmental Processes*, 8, 1–19. doi: [10.1007/s40710-020-00465-0](https://doi.org/10.1007/s40710-020-00465-0)
- Lorenz, C., & Kunstmann, H. (2012). The hydrological cycle in three state-of-the-art reanalyses: Intercomparison and performance analysis. *Journal of Hydrometeorology*, 13(5), 1397–1420.
- Martínez Ortega, R. M., Tuya Pendás, L. C., Martínez Ortega, M., Pérez Abreu, A., & Cánovas, A. M. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8(2), 0–0.
- McCuen, R. H., Knight, Z., & Cutter, A. G. (2006). Evaluation of the Nash–Sutcliffe efficiency index. *Journal of hydrologic engineering*, 11(6), 597–602. doi:

[10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2006\)11:6\(597\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(597))

- McVicar, T., Van Niel, T., Li, L., Hutchinson, M., Mu, X., & Liu, Z. (2007b). Spatially distributing monthly reference evapotranspiration and pan evaporation considering topographic influences. *Journal of Hydrology*, *338*, 196–220. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.02.018>
- McVicar, T., Van Niel, T., Roderick, M., Li, L., X., M., Zimmermann, N., & Schmatz, D. (2010). Observational evidence from two mountainous regions that near-surface wind speeds are declining more rapidly at higher elevations than lower elevations: 1960–2006. *Geophysical Research Letters*, *37*(6).
- Michaelides, S., Levizzani, V., Anagnostou, E., Bauer, P., Kasparis, T., & Lane, J. (2009). Precipitation: Measurement, remote sensing, climatology and modeling. *Atmospheric Research*, *94*(4), 512–533. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.08.017>
- Molnar, P. (2011). *Calibration. Watershed Modelling*. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.
- Monzón Alvarado, C. M., Rendon, A. Z., & Pérez, A. d. S. V. (2020). Integrating public participation in knowledge generation processes: Evidence from citizen science initiatives in Mexico. *Environmental Science & Policy*, *114*, 230–241. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.08.007>
- Morales-Velázquez, M. I., Herrera, G. d. S., Aparicio, J., Rafieeiniasab, A., & Lobato-Sánchez, R. (2021). Evaluating reanalysis and satellite-based precipitation at regional scale: A case study in southern Mexico. *Atmósfera*, *34*(2), 189–206. doi: <https://doi.org/10.20937/atm.52789>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, *50*(3), 885–900. doi: [10.13031/2013.23153](https://doi.org/10.13031/2013.23153)
- Moshinsky, M. R. (1995). Fundamentos de radares meteorológicos: aspectos clásicos (primera de dos partes). *Tecnología y ciencias del agua*, *10*(1), 55–74.
- Muñoz-Villers, L., & López-Blanco, J. (2008). Land use/cover changes using Land-

- sat TM/ETM images in a tropical and biodiverse mountainous area of central-eastern Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 29(1), 71–93. doi: [10.1080/01431160701280967](https://doi.org/10.1080/01431160701280967)
- Muñoz-Villers, Geissert, D. R., Holwerda, F., & McDonnell, J. J. (2016). Factors influencing stream baseflow transit times in tropical montane watersheds. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(4), 1621–1635. doi: [10.5194/hess-20-1621-2016](https://doi.org/10.5194/hess-20-1621-2016)
- Muñoz-Villers, McDonnell, & Jeffrey, J. (2012). Runoff generation in a steep, tropical montane cloud forest catchment on permeable volcanic substrate. *Water Resources Research*, 48(9). doi: <https://doi.org/10.1029/2011WR011316>
- NASA. (2014). *What is a satellite?* Descargado 02-2022, de <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-a-satellite-58.html>
- Njue, N., Stenfert Kroese, J., Gräf, J., Jacobs, B. B. L., S. R. and Weeser, & Rufino, M. C. (2019). Citizen science in hydrological monitoring and ecosystem services management: State of the art and future prospects. *The Science of the total environment*, 693(13), 1621–1635. doi: [10.1016/j.scitotenv.2019.07.337](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.337)
- Nordstokke, D., & Stelnicki, A. M. (2014). Pairwise comparisons. En A. C. Michalos (Ed.), *Encyclopedia of quality of life and well-being research* (pp. 4575–4576). Dordrecht: Springer Netherlands. doi: [10.1007/978-94-007-0753-5\\_2059](https://doi.org/10.1007/978-94-007-0753-5_2059)
- NRCan. (2019). *Remote sensing tutorials*. Descargado 12-2021, de <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/satellite-imagery-and-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/9309>
- Paredes-Trejo, F., Barbosa, H., & Dos Santos, C. A. (2019). Evaluation of the performance of SM2RAIN-derived rainfall products over Brazil. *Remote Sensing*, 11(9), 1113. doi: <https://doi.org/10.3390/rs11091113>
- Paredes Trejo, F. J., Alves Barbosa, H., Peñaloza-Murillo, M. A., Moreno, M. A., & Farias, A. (2016). Intercomparison of improved satellite rainfall estimation with CHIRPS gridded product and rain gauge data over Venezuela. *Atmósfera*, 29(4), 323–342. doi: [10.20937/ATM.2016.29.04.04](https://doi.org/10.20937/ATM.2016.29.04.04)
- Pascual, R., López, M., Chablé, L., Loranca, Y., Ledesma, J., Zavala, A., & Martínez, A.

- (2020). *Reporte del Clima en México. Reporte anual 2020*. CONAGUA.
- Paul, J. D., Buytaert, W., Allen, S., Ballesteros-Cánovas, J. A., Bhusal, J., Cieslik, K., ... Supper, R. (2018). Citizen science for hydrological risk reduction and resilience building. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 5(1), e1262. doi: <https://doi.org/10.1002/wat2.1262>
- Petty, G. W., & Krajewski, W. F. (1996). Satellite estimation of precipitation over land. *Hydrological sciences journal*, 41(4), 433–451.
- Ramírez, B. H., Teuling, A. J., Ganzeveld, L., Hegger, Z., & Leemans, R. (2017). Tropical montane cloud forests: Hydrometeorological variability in three neighbouring catchments with different forest cover. *Journal of Hydrology*, 552, 151–167. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.023>
- Rivera, J. A., Hinrichs, S., & Marianetti, G. (2019). Using CHIRPS dataset to assess wet and dry conditions along the semiarid central-western Argentina. *Advances in Meteorology*, 2019. doi: <https://doi.org/10.1155/2019/8413964>
- Rodda, J. C. (1994). Mountains—a hydrological paradox or paradise. *Beiträge zur Hydrologie der Schweiz*, 35, 41–51.
- Scofield, R. A., & Kuligowski, R. J. (2003). Status and outlook of operational satellite precipitation algorithms for extreme-precipitation events. *Weather and Forecasting*, 18(6), 1037–1051. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2003\)018<1037:SAOOOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2003)018<1037:SAOOOS>2.0.CO;2)
- Sevruk, B., & Kirchhofer, W. (1992). Mean annual corrections of measured precipitation depths 1951–1980. *Hydrological Atlas of Switzerland, Plate, 2*.
- Shaw, E. (1998). Hydrology in practice 3rd ed. *Stanley Thornes Pub, UK pp569*.
- Shinbrot, X. A., Muñoz-Villers, L., Mayer, A., López-Portillo, M., Jones, K., López-Ramírez, S., ... Manson, R. (2020). Quiahua, the first citizen science rainfall monitoring network in Mexico: Filling critical gaps in rainfall data for evaluating a payment for hydrologic services program. *Citizen Science: Theory and Practice*, 5(1).
- Siddig, M. S., Ibrahim, S., Yu, Q., Abdalla, A., Osman, Y., Atiem, I. A., ... Taha, M. M. (2022). Bias adjustment of four satellite-based rainfall pro-

- ducts using ground-based measurements over sudan. *Water*, 14(9), 1475. doi: <https://doi.org/10.3390/w14091475>
- Soporte de Minitab. (2019). *Relaciones lineales, no lineales y monótonas*. Descargado 06-2021, de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/basics/linear-nonlinear-and-monotonic-relationships/>
- Strangeways, I. (2006). *Precipitation: theory, measurement and distribution*. Cambridge University Press.
- Su, F., Hong, Y., & Lettenmaier, D. P. (2008). Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin. *Journal of hydrometeorology*, 9(4), 622–640. doi: <https://doi.org/10.1175/2007JHM944.1>
- Tang, G., Clark, M. P., Papalexiou, S. M., Ma, Z., & Hong, Y. (2020). Have satellite precipitation products improved over last two decades? a comprehensive comparison of gpm imerg with nine satellite and reanalysis datasets. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111697. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425720300663> doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111697>
- Tang, Q., Gao, H., Lu, H., & Lettenmaier, D. P. (2009). Remote sensing: hydrology. *Progress in Physical Geography*, 33(4), 490–509. doi: <https://doi.org/10.1177/0309133309346650>
- Viviroli, D., & Weingartner, R. (2004). The hydrological significance of mountains: from regional to global scale. *Hydrology and earth system sciences*, 8(6), 1017–1030. doi: <https://doi.org/10.5194/hess-8-1017-2004>
- Viviroli, D., & Weingartner, R. (2008). "Water towers" —a global view of the hydrological importance of mountains. En *Mountains: Sources of water, sources of knowledge* (pp. 15–20). Springer. doi: [10.1007/978-1-4020-6748-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6748-8_2)
- Viviroli, D., Weingartner, R., & Messerli, B. (2004). Assessing the hydrological significance of the worlds mountains. *Mountain research and Development*, 23(1), 32–40.
- Von Thaden Ugalde, J., Manson, R., Congalton, R., López Barrera, F., & Jones, K. (2021, 01). Evaluating the environmental effectiveness of payments for hydrological services

- in Veracruz, México: A landscape approach. *Land Use Policy*, *100*, 105055. doi: [10.1016/j.landusepol.2020.105055](https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105055)
- Vy, D. N. T. (2020). Evaluation and comparison of satellite-based rainfall product chirps and reanalysis product ERA5 in West Africa.
- Wechsler, S. P., & Kroll, C. N. (2006). Quantifying dem uncertainty and its effect on topographic parameters. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, *72*(9), 1081–1090.
- Wiegandt, E. (2008). Framing the study of mountain water resources: an introduction. En *Mountains: Sources of water, sources of knowledge* (pp. 3–13). Springer.
- Williams-Linera, G. (2012). *El bosque de niebla del centro de Veracruz: ecología, historia y destino en tiempo de fragmentación y cambio climático*. ICONABIO-Instituto de Ecología.
- Xu, Frey, S., Boluwade, A., Erler, A., Khader, O., Lapen, D., & Sudicky, E. (2019, 06). Evaluation of variability among different precipitation products in the Northern Great Plains. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *24*. doi: [10.1016/j.ejrh.2019.100608](https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100608)
- Xu, R., Tian, F., Yang, L., Hu, H., Lu, H., & Hou, A. (2017). Ground validation of GPM IMERG and TRMM 3B42V7 rainfall products over southern Tibetan Plateau based on a high-density rain gauge network. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *122*(2), 910–924. doi: <https://doi.org/10.1002/2016JD025418>
- Yu, C., Hu, D., Liu, M., Wang, S., & Di, Y. (2020). Spatio-temporal accuracy evaluation of three high-resolution satellite precipitation products in china area. *Atmospheric Research*, *241*, 104952. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104952>
- Zambrano-Bigiarini, M. (2020). Package ‘hydrogof’. *Goodness-of-fit Functions for Comparison of Simulated and Observed*.
- Zhao, M., Heinsch, F., Nemani, R., & Running, S. (2005). Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote Sensing of Environment*, *95*, 164–176. doi: [10.1016/j.rse.2004.12.011](https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.12.011)