

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**POTENCIAL DE LA CAPTURA DE NIEBLA PARA USO
DOMÉSTICO RURAL Y RIEGO DURANTE LA ÉPOCA SECA DEL
AÑO EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL, GALÁPAGOS, ECUADOR**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA AMBIENTAL**

PAOLA ALEJANDRA ECHEVERRÍA GARCÉS
paoecheg@gmail.com

DIRECTOR: Ph.D. CHRISTIAN GONZALO DOMÍNGUEZ GONZÁLEZ
cdominguez@ups.edu.ec

CODIRECTOR: Ph.D. MARCOS JOSHUA VILLACÍS ERAZO
marcos.villacis@epn.edu.ec

QUITO, marzo 2018

DECLARACIÓN

Yo, Paola Alejandra Echeverría Garcés, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Paola Alejandra Echeverría Garcés

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Paola Alejandra Echeverría Garcés, bajo mi supervisión.

Ph.D. Christian Domínguez
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ph.D. Marcos Villacís
CODIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría expresar mis sinceros agradecimientos a Christian Domínguez y Marcos Villacís, por el inmenso apoyo que recibí durante la realización de este proyecto, por su impulso, dedicación, enseñanzas y consejos.

Al equipo científico del proyecto GIIWS, en especial a Sophie Violette, por compartir su experiencia y conocimiento, y a Wojtek, mi compañero de trabajo y aventura.

A la familia Albán Almeida, quienes me brindaron un espacio en su casa y su ayuda para la construcción de los dispositivos.

A mis amigos, de quienes recibí ánimo en todo momento, a pesar de la distancia.

A mi prima Daniela y mi mejor amiga Diana Montalvo, por depositar tanta confianza en mí y alentar mis logros, muchas gracias.

A mis padres, mi hermana y mi abuelita, por su apoyo incondicional durante este proyecto y todas las sorpresas que vinieron con él, por su amor y paciencia en el trayecto, ¡gracias infinitas!

Paola Echeverría Garcés

DEDICATORIA

A mis padres, por todo su esfuerzo y amor incondicional, por inculcarme valores y ser un ejemplo para mí.

A mi hermana, por estar siempre a mi lado, por ser mi consejera y mi amiga.

A mi abuelita, por su cariño, por cuidarnos y alentarnos siempre.

Paola Echeverría Garcés

CONTENIDO

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	2
1.2.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA.....	2
1.2.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA.....	4
1.2.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA.....	6
1.3 OBJETIVOS	8
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	8
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 ÁREA DE ESTUDIO	9
2.1.1 CLIMA.....	9
2.1.2 HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA DE GALÁPAGOS.....	17
2.1.3 USO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL.....	21
2.2 CAPTURA DE NEBLINA.....	23
2.2.1 TIPOS DE DISPOSITIVOS DE CAPTURA DE NIEBLA	23
2.2.2 COLECTOR DE NIEBLA ESTÁNDAR (STANDARD FOG COLLECTOR SFC).....	28
2.2.3 PRINCIPIO DE OPERACIÓN	32
CAPÍTULO 3 MATERIALES Y MÉTODOS	34
3.1 SITIO DE ESTUDIO	35
3.1.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO	35

3.1.2 VEGETACIÓN DE LA PARTE ALTA DE SAN CRISTÓBAL Y ÁREA DE INVESTIGACIÓN	35
3.1.3 MONITOREO DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS	37
3.2 CONSTRUCCIÓN DE UN COLECTOR ESTÁNDAR DE NIEBLA (SFC) EN SAN CRISTÓBAL	39
3.3 CARACTERIZACIÓN METEOROLÓGICA	41
3.3.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	41
3.3.2 REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE.....	42
3.3.3 ANÁLISIS DE CUANTÍA	42
3.4 MODELO DE SEPARACIÓN DE LLUVIA Y NIEBLA.....	43
3.5 ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA EN LA ZONA RURAL DE LA ISLA SAN CRISTÓBAL	46
3.6 AGUA SUPERFICIAL.....	47
3.6.1 CAPACIDAD DE SUMINISTRO DE AGUA.....	47
3.6.2 SUMINISTRO DE AGUA	48
3.7 DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA EN LA ZONA RURAL.....	49
3.7.1 DEMANDA DE USO DOMÉSTICO.....	49
3.7.2 DEMANDA DE AGUA PARA GANADERÍA	50
3.7.3 DEMANDA DE USO AGRÍCOLA.....	52
CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	59
4.1 RESULTADOS.....	59
4.1.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS	59
4.1.2 CARACTERIZACIÓN METEOROLÓGICA	60
4.1.3 CUANTIFICACIÓN DE LA NEBLINA.....	82
4.1.4 INFLUENCIA DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA RECOLECCIÓN DE NEBLINA	85

4.1.5 ANÁLISIS DE LA OFERTA Y DEMANDA DE AGUA.....	89
4.1.6 CONSUMO DOMÉSTICO.....	89
4.1.7 GANADERÍA.....	89
4.1.8 AGRICULTURA	92
4.2 DISCUSIÓN	94
4.2.1 COMPARACIÓN DE LOS PATRONES TEMPORALES DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS DE SAN CRISTÓBAL CON OTROS SITIOS.....	94
4.2.2 INFLUENCIA DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS.....	96
4.2.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CON OTROS ESTUDIOS Y APLICABILIDAD.....	97
4.2.4 SATISFACCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA EN LA ZONA RURAL DE SAN CRISTÓBAL CON DISPOSITIVOS DE CAPTURA DE NEBLINA.....	99
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	102
5.1 CONCLUSIONES	102
5.2 RECOMENDACIONES	104

ÍNDICE DE TABLAS

3.1 EQUIPO DE LA ESTACIÓN CLIMÁTICA A 600 M DE ELEVACIÓN EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL.....	39
3.2 CLASIFICACIÓN DEL GANADO EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL.....	51
4.1 VOLUMEN DE AGUA EN LOS TRES COLECTORES	83
4.2 NEBLINA EN LOS TRES COLECTORES.....	83
4.3 VALORES DE SIGNIFICANCIA ESTADÍSTICA.....	86
4.4 INFLUENCIA DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA CAPTURA DE NEBLINA.....	88
4.5 DÉFICIT HÍDRICO ANUAL Y MENSUAL POR RANGOS DE ELEVACIÓN.....	90
4.6 INTERCEPCIÓN DE NEBLINA ANUAL Y MENSUAL POR RANGOS DE ELEVACIÓN.....	91
4.7 PORCENTAJE DE DÉFICIT DE AGUA CUBIERTO EN UN AÑO PROMEDIO CON COLECTORES 50-SFC.....	93
4.8 PORCENTAJE DE DÉFICIT DE AGUA CUBIERTO EN UN AÑO SECO CON COLECTORES 50-SFC	93
4.9 COMPARACIÓN DE LA NEBLINA RECOLECTADA EN SAN CRISTÓBAL CON OTROS SITIOS.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ISLAS GALÁPAGOS	10
2.2	ZONIFICACIÓN CLIMÁTICA EN LA ÉPOCA DE GARÚA	11
2.3	ARCHIPIÉLAGO DE GALÁPAGOS Y BARLOVENTO DE LA ISLA SANTA CRUZ EN A) TEMPORADA DE INVIERNO, B) TEMPORADA DE GARÚA.....	12
2.4	TEMPERATURA HISTÓRICA EN SAN CRISTÓBAL	13
2.5	TEMPERATURA HISTÓRICA EN SANTA CRUZ.....	14
2.6	ZONAS CLIMÁTICAS DE SAN CRISTÓBAL EN LA TEMPORADA DE GARÚA Y DE INVIERNO.....	16
2.7	RED DE DRENAJE Y EXTRACCIÓN DE CUENCAS DEL BARLOVENTO DE SAN CRISTÓBAL.....	19
2.8	LOCALIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CAPTACIONES DE AGUA EN SAN CRISTÓBAL	20
2.9	COLECTOR CILÍNDRICO DE NEBLINA TIPO “HARP”	24
2.10	COLECTOR DE NEBLINA BIDIMENSIONAL	25
2.11	COLECTORES DE NEBLINA INSTALADOS EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL A) Y B) COLECTORES ESTÁNDAR DE NEBLINA, C) COLECTOR CILÍNDRICO DE NEBLINA	25
2.12	A) COLECTOR DE NIEBLA MACRODIAMANTE (CARLOS ESPINOZA, ANTOFAGASTA, CHILE), B) COLECTOR DYSDERA (CARLOS SÁNCHEZ RECIO, ISLAS CANARIAS, ESPAÑA).....	26
2.13	A) WIRE HARP SCREEN Y JUVIK-TYPE FOG GAUGE MODIFICADO Y B) DAUBE-TYPE TUNNEL GAUGE	28
2.14	DIMENSIONES DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES DE UN COLECTOR ESTÁNDAR DE NIEBLA.....	31

3.1	LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO USADA PARA EL MONITOREO CLIMÁTICO EN EL BARLOVENTO DE LA ISLA SAN CRISTÓBAL.....	36
3.2	ARBUSTOS DE MICONIA EN LA ZONA DE ESTUDIO EN LA PARTE ALTA DEL BARLOVENTO DE LA ISLA SAN CRISTÓBAL: A) DOSEL, B) ÁNGULO DE LAS RAMAS, C) FORMA DE LAS HOJAS Y ORIENTACIÓN, D) OBSTRUCCIONES DE FLUJO: EPÍFITAS.....	37
3.3	ESTACIÓN CLIMÁTICA A 600 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL.....	38
3.4	A) SUPERFICIE COLECTORA DE NEBLINA, B) ACCESORIOS PVC, C Y D) COLECTORES ESTÁNDAR DE NEBLINA INSTALADOS EN LA ESTACIÓN CLIMÁTICA A 600 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL.....	40
3.5	VARIACIÓN EN LA SUPERFICIE DE INCIDENCIA DE LA LLUVIA CON RESPECTO A SU INCLINACIÓN A) COLECTOR CILÍNDRICO Y B) COLECTORES ESTÁNDAR DE NEBLINA.....	46
3.6	ZONA DE ESTUDIO DE LA DEMANA DE AGUA EN SAN CRISTÓBAL.....	47
3.7	OFERTA Y DEMANDA DE AGUA EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL	48
3.8	PROCESO DE REALIZACIÓN DEL BALANCE HIDROLÓGICO	57
3.9	CÁLCULO DEL DÉFICIT DE AGUA POR RANGOS DE ELEVACIÓN	58
4.1	PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA DE LA ISLA SANTA CRUZ, A) PRECIPTACIÓN ANUAL, B) PRECIPITACIÓN POR TEMPORADA, C) TEMPERATURA ANUAL, D) TEMPERATURA POR TEMPORADA	61
4.2	PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA DE LA ISLA SAN CRISTÓBAL, A) PRECIPTACIÓN ANUAL, B) PRECIPITACIÓN POR TEMPORADA, C) TEMPERATURA ANUAL, D) TEMPERATURA POR TEMPORADA	62

4.3	PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN EL PERÍODO DE ESTUDIO EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL	63
4.4	PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA DIARIA A A) 300 MSNM Y B) 600 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL.....	65
4.5	VARIACIÓN DIARIA DE A) FACTOR DE NUBOSIDAD (MEDIA DIARIA Y PROMEDIO DE 10 DÍAS), B) RADIACIÓN SOLAR (DIARIA Y CIELO DESPEJADO) Y C) VELOCIDAD DEL VIENTO (MEDIA DIARIA Y PROMEDIO DE 10 DÍAS) A 300 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL	66
4.6	VARIACIÓN DIARIA DE A) FACTOR DE NUBOSIDAD (MEDIA DIARIA Y PROMEDIO DE 10 DÍAS), B) RADIACIÓN SOLAR (DIARIA Y CIELO DESPEJADO), C) VELOCIDAD DEL VIENTO (MEDIA DIARIA Y PROMEDIO DE 10 DÍAS) Y D) ALTURA DE NEBLINA A 600 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL.....	67
4.7	VARIACIÓN DIARIA DE A) FACTOR DE NUBOSIDAD (MEDIA DIARIA Y PROMEDIO DE 10 DÍAS), B) RADIACIÓN SOLAR (DIARIA Y CIELO DESPEJADO), C) PRECIPITACIÓN Y D) ALTURA DE NEBLINA A 600 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL.....	68
4.8	ALTURA DE NEBLINA MENSUAL E INTENSIDAD DE NEBLINA MENSUAL EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL.....	70
4.9	PRECIPITACIÓN MENSUAL A 300 Y 600 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL.....	70
4.10	TEMPERATURA MENSUAL A 300 Y 600 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL.....	71
4.11	VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO PROMEDIO, HUMEDAD RELATIVA MEDIA Y RADIACIÓN SOLAR MEDIA A 300 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL	73
4.12	VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO PROMEDIO, HUMEDAD RELATIVA MEDIA Y RADIACIÓN SOLAR MEDIA A 600 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL	74

4.13 CICLO DIARIO MENSUAL DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS A 300 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL	77
4.14 CICLO DIARIO MENSUAL DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS A 600 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL	78
4.15 COMPARACIÓN DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS ENTRE LOS AÑOS HIDROLÓGICOS 2013-2014, 2014-2015, 2015-2016 Y LA MEDIA A 300 MSNM	79
4.16 COMPARACIÓN DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS ENTRE LOS AÑOS HIDROLÓGICOS 2013-2014, 2014-2015, 2015-2016 Y LA MEDIA A 600 MSNM	80
4.17 COMPARACIÓN DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS ENTRE EL PERÍODO DE ESTUDIO EN EL 2016 Y EL MISMO PERÍODO DE TIEMPO EN EL 2013, 2014 Y 2015 A 600 MSNM.....	81
4.18 MATRIZ DE CORRELACIÓN DEL A) VOLUMEN DE AGUA Y B) NEBLINA EN LOS TRES COLECTORES DE NEBLINA	83
4.19 CANTIDAD DE NEBLINA INTERCEPTADA POR EL 35-SFC, 50-SFC Y CFN EN MM.....	84
4.20 CLASIFICACIÓN DE LA NEBLINA POR INTERVALOS DE VELOCIDAD DEL VIENTO	87

RESUMEN

El archipiélago de Galápagos es una zona semiárida con escasas fuentes superficiales de agua. Sin embargo, debido a su posición geográfica y a la presencia de corrientes oceánicas, las islas permanecen cubiertas por una capa semi-permanente de neblina durante siete meses al año; este fenómeno permite que sea posible el aprovechamiento de la neblina como una fuente potencial de suministro de agua para las islas. En este proyecto de investigación, se busca determinar la factibilidad de la captura de neblina para uso doméstico rural y riego en las islas Galápagos. Para esto, se realizó un monitoreo de las principales variables meteorológicas durante un periodo de 48 días usando un sitio experimental en la parte alta de la isla San Cristóbal, que cuenta con una estación climática y una red cilíndrica para coleccionar neblina (CFN). Adicionalmente, se instalaron dos colectores estándar de neblina de 50% (50-SFC) y 35% (35-SFC) de coeficiente de sombra. Para verificar la factibilidad del uso de estos dispositivos se estimó la cantidad neta de neblina recolectada mediante la aplicación de un modelo trigonométrico que utiliza variables climáticas para separar el agua de lluvia y el agua de neblina recolectada por estos dispositivos. También se determinó la demanda de agua en la zona rural de San Cristóbal para consumo doméstico, ganadería y agricultura; siendo la última la más relevante (99.6% de la demanda total). Con la información climática se realizó el balance hidrológico anual y mensual por rangos de elevación cada 100 m, para un año promedio y un año seco a partir de los gradientes orográficos de precipitación, evapotranspiración e intercepción de neblina. Se determinaron las elevaciones con mayor escasez de agua y también los meses más secos, así como también los meses en los que existe más neblina. A partir del balance se calculó el déficit de agua para riego total y en cada rango de elevación. Los resultados muestran que la cantidad de neblina capturada fue 7.9 mm/día, 5.9 mm/día y 3.4 mm/día con 50-SFC, 35-SFC y CFN, respectivamente. Finalmente, se estimó que un sistema de colectores estándar de 50% de coeficiente de sombra podría cubrir el 25% de este déficit en un año promedio y el 15% en un año seco, mostrando el potencial de esta alternativa como fuente de agua.

ABSTRACT

The Galápagos Archipelago is a semiarid zone with scarce superficial water sources. Due to its geographic location and oceanic currents, these islands are covered by a semi-permanent fog layer during seven months per year, between June and December. This may be used as a potential source of water supply for the islands. In this research the feasibility of fog collection for rural use and irrigation was investigated. In order to do this, the monitoring of the main meteorological variables was carried out during 48 days using an experimental site in the highlands of San Cristóbal with a weather station and a cylindrical fog net (CFN). Additionally, two Standard Fog Collectors (SFC) of 35% shade coefficient (35-SFC) and 50% shade coefficient (50-SFC) were installed. To verify the feasibility of the use of these devices, the net amount of fog intercepted was estimated by applying a trigonometric model which uses climatic variables to separate the water from fog and rain captured with these devices. Additionally, the water demand for domestic consumption, livestock and agriculture was calculated, being the latter the most relevant (99.6% of the total water demand). The hydrological balance was developed annually and monthly, for an average year and a dry year, with the climatic information by elevation ranges of 100 m each, using the orographic gradients of rainfall, evapotranspiration and fog water interception. The elevations with greater scarcity of water were identified, as well as the driest months and the months with greater amount of fog interception. From the hydrological balance, the total water deficit for irrigation was calculated as well as the water deficit in each range of elevation. The results show that the amount of water from fog captured was 7.9 mm/day, 5.9 mm/day and 3.4 mm/day with the 50-SFC, 35-SFC and CFN, respectively. Finally, it was estimated that a 50% shade coefficient standard fog collector system could cover the 25% of this deficit in an average year and 15% in a dry year, showing the potential of this alternative as a source of water.

PRESENTACIÓN

Este proyecto de investigación se ha estructurado en 5 capítulos, de manera que faciliten la comprensión del problema y los métodos realizados para cumplir los objetivos propuestos.

Capítulo 1: Se detalla el problema, la justificación y los objetivos que se pretenden alcanzar.

Capítulo 2: Se describe las condiciones climáticas, hidrológicas e hidrogeológicas existentes y los usos de agua en las islas. Se presenta una recopilación de las experiencias de recolección de neblina en otros sitios y los tipos de dispositivos utilizados para este fin. Se profundiza sobre el colector estándar de neblina y se explica su principio de operación.

Capítulo 3: Se detallan las características de la zona de estudio y el monitoreo de las variables climáticas en la estación climática a 600 msnm en la isla San Cristóbal. También se explican los materiales que se utilizaron en la construcción de los dispositivos, y los métodos que se desarrollaron en el análisis de las variables climáticas y el proceso de determinación de la demanda de agua para consumo doméstico, ganadería y agricultura en la zona rural de San Cristóbal.

Capítulo 4: Se muestran los resultados obtenidos de la investigación y su respectiva discusión.

Capítulo 5: Se exponen las conclusiones obtenidas y las recomendaciones sobre el desarrollo del proyecto de investigación.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La provincia insular de Galápagos es una zona semiárida, carente de fuentes de agua superficial, lo que determina que la cantidad y calidad de agua no sea adecuada para satisfacer las demandas de la población. El líquido vital es insuficiente tanto para el consumo humano, como para otro tipo de actividades, como es el caso de la producción agropecuaria, que se ve limitada por la falta de agua dulce para los cultivos y el ganado, lo que motiva a los pobladores a abandonar las fincas y optar por otros modos de sustento, como es el turismo (CISPDR, 2015).

Galápagos tiene una población total de 25,124 habitantes; 7,475 se ubican en el cantón San Cristóbal; de éstos, 803 viven en áreas rurales (INEC, 2010). La superficie terrestre del archipiélago es de 799,771 hectáreas, de las cuales el 3.3%, es decir, 26,245 hectáreas están destinadas para el aprovechamiento humano; de ellas, el 95.5% corresponde al área rural y el 5.5% al área urbana. El 76% del área rural conforma Unidades de Producción Agropecuaria (UPA) (CGREG, 2014). La rentabilidad de la actividad agrícola ha disminuido en los últimos años debido al incremento del turismo en las islas y actividades relacionadas, esto crea una fuerte dependencia del archipiélago a la importación de productos desde el continente lo cual tiene repercusiones en la disponibilidad de productos alimenticios (Llive, 2010). Según CEPROEC-SENPLADES (2014) en el año 2012 el 83% de los alimentos consumidos en el archipiélago fueron importados.

Las condiciones geográficas de Galápagos determinan que el agua dulce sea limitada. San Cristóbal tiene mayor disponibilidad del recurso tanto en cantidad como en calidad, debido a que en esta isla existe un mayor número de fuentes de agua superficial; el cantón cuenta con 17 encañadas (valles angostos erosionados

por el flujo de agua), que podrían satisfacer la demanda para consumo y actividades agropecuarias (CISPDR, 2015); sin embargo, los habitantes de las zonas que están alejadas de dichas encañadas, no son beneficiarios del recurso y se ven obligados a recurrir a la compra de agua por medio de tanqueros; lo mismo ocurre en Santa Cruz, Isabela y Floreana, que son las otras islas habitadas del archipiélago.

En San Cristóbal el riego se ve favorecido en los sectores Cerro Verde, Cerro Gato, El Progreso, La Soledad, El Chino y El Socavón; en las épocas de sequía, que se verifican entre junio y diciembre, los pobladores utilizan el agua de lluvia almacenada en albaradas, que consisten en una construcción hidráulica con paredes de tierra en donde se almacena lentamente el agua de escorrentía o de pequeños cauces que tienen origen en épocas lluviosas, además de agua proveniente de tanqueros municipales (CISPDR, 2015).

En lo que respecta a la disponibilidad de agua segura para satisfacer la demanda de consumo humano, es insuficiente en San Cristóbal, en donde, la captación del recurso es reducida durante todo el año y más aún en la época seca. El aprovechamiento de agua lluvia en todas las islas del archipiélago es deficiente, por lo que no se puede considerar como una fuente potencial para uso, lo que hace necesario buscar otras alternativas que cubran las necesidades de la población (CISPDR, 2015).

1.2 JUSTIFICACIÓN

1.2.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

El agua es un recurso indispensable para garantizar la vida; la cantidad y calidad del recurso, ya sea que se use para consumo humano o para el desarrollo de actividades productivas, como la producción agropecuaria, es determinante en la calidad de vida de la población.

El actual déficit de abastecimiento del recurso hídrico en las islas, durante ciertas épocas del año, obliga a buscar soluciones, para lo cual es fundamental la

implementación de dispositivos alternativos que permitan aprovechar fuentes que no han sido explotadas en el archipiélago, como es el caso de la niebla.

La niebla es considerada una fuente potencial de agua dulce para uso en zonas de eventos drásticos de sequía e incluso en locaciones áridas, semiáridas y zonas costeras alrededor del mundo (Olivier, 2002; Schemenauer & Cereceda, 1991, 1994b). Esta forma de obtención de agua ha sido utilizada a lo largo de la historia en lugares zonas como Palestina; varios desiertos, entre ellos el de Atacama; las Islas Canarias, y otros lugares, en los que se han logrado exitosos resultados (Olivier, 2002). Existen numerosos experimentos sobre la cuantificación del volumen de la deposición de la niebla, de ellos, los más destacados se encuentran en Sudáfrica y Namibia, según Olivier (2002).

De acuerdo a la literatura disponible, la captura de niebla ya sea por la vegetación o por colectores artificiales, se realiza en varios países, de seis continentes; entre ellos: Sudán, Sudáfrica, Namibia, Nepal, Kenya, Angola, Isla Ascensión, Islas Cabo Verde, Islas Canarias, Hawaii, Islas Reunión, México, Perú, Chile, Ecuador y Colombia (Gabriel & Jauze, 2008; Ingraham & Matthews, 1988; Molina & Escobar, s/f; Olivier, 2002; Schemenauer & Cereceda, 1991, 1994b; Shanyengana, Henschel, Seely, & Sanderson, 2002).

Esta forma de obtener agua se ha desarrollado a lo largo del tiempo, principalmente para cubrir las necesidades de agua segura de las poblaciones con escaso acceso al recurso, en donde la calidad de las fuentes disponibles no es adecuada, o en locaciones con condiciones climáticas y geográficas hostiles. Los resultados han sido exitosos y la demanda de agua en estas poblaciones ha sido satisfactoriamente cubierta.

En el caso de la Isla San Cristóbal, el suministro de agua es ineficiente, la cantidad de agua para riego y consumo no abastece adecuadamente a la población. La zona rural presenta dificultad en el acceso a la red de distribución de agua potable (CISPDR, 2015), lo que hace necesario buscar otras fuentes que contribuyan al desarrollo y progreso del área rural del cantón; por ello se propone

el uso de dispositivos alternativos para recolectar agua dulce de la niebla, que podrían ser implementados con el fin de lograr el autoabastecimiento de agua en la zona rural, donde no se disponga de fuentes del recurso hídrico. Si se demuestra que la cantidad de agua que se puede capturar a través de la neblina es adecuada para cubrir las necesidades identificadas en las poblaciones rurales de San Cristóbal, se contribuirá a mejorar la calidad de vida de la población y el progreso de las actividades productivas.

Dado que la niebla se genera por movimiento de masas de aire marinas sobre las montañas costeras, ésta puede ser usada para consumo doméstico y actividades agrícolas, puesto que se considera que este recurso es de buena calidad (Schemenauer & Cereceda, 1991). En el caso de San Cristóbal, gracias a sus condiciones topográficas y meteorológicas, la niebla puede ser un recurso potencial de agua dulce, ya que durante siete meses al año existe una capa semipermanente de neblina en la parte alta de la isla (Trueman & d'Ozouville, 2010; Domínguez, 2016).

La misma tecnología utilizada en San Cristóbal, puede ser aplicada en Santa Cruz, Floreana e Isabela, que carecen de agua superficial y la calidad del agua subterránea no es buena. Santa Cruz cuenta con un sistema de agua entubada y una parte de la población se abastece de grietas subterráneas de agua salobre (CISPDR, 2015). La implementación de colectores de niebla podría mejorar su situación en cuanto a la disponibilidad del recurso, en especial en zonas alejadas que requieren cantidades considerables de agua, como es el caso de las zonas donde se desarrollan actividades agrícolas.

1.2.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA

La recolección de agua de la niebla es un proceso sencillo, relativamente de bajo costo y que puede ser manejado, a largo plazo, por la comunidad en donde se lo aplique.

La niebla es el conjunto de micro gotas, cuyo tamaño varía entre 1 μm a 40 μm , suspendidas en el aire, y la visibilidad horizontal se ve reducida a 1 km (Molina &

Escobar, s/f). Las gotas de niebla tienen velocidades de caída muy bajas, entre menos de 1 cm/s a 5 cm/s, por lo que son fácilmente arrastradas por el viento en dirección horizontal (Schemenauer & Cereceda, 1994b). En las islas Galápagos la dirección del viento es relativamente constante durante la época de garúa, debido a la influencia de los vientos alisios del Sudeste (Domínguez, 2016).

La técnica aplicada ha tenido éxito alrededor del mundo, en lugares donde el agua dulce es escasa. Las condiciones geográficas y meteorológicas del archipiélago favorecen la presencia de neblina, y por ende, el contenido de agua recolectado podría ser satisfactorio para cubrir la demanda de las poblaciones rurales.

En cuanto a los colectores de neblina, existen varios tipos, de diferente forma y estructura, siendo los más comunes los colectores cilíndricos y los bidimensionales. Estos últimos por lo general se caracterizan por el coeficiente de sombra de la malla, que se refiere a la cantidad de luz que pasa por la misma, de acuerdo al tamaño de sus agujeros. Si el coeficiente de sombra es mayor quiere decir que los agujeros son más pequeños.

Para esta investigación se ha optado por analizar el potencial de captura de niebla mediante colectores estándar (Standard Fog Collector SFC), debido a que su costo de construcción e implementación es relativamente bajo, y también permite obtener respuestas en cuanto a la posibilidad de utilizar el agua de la niebla como una fuente de abastecimiento del recurso hídrico en la zona rural (Schemenauer & Cereceda, 1994a).

Los SFC consisten en una estructura que soporta una malla de área de 1 m², idealmente de polipropileno; sin embargo, no existe restricción del material que se emplee mientras se considere la resistencia de la misma frente a los factores ambientales. La parte inferior de la malla debe estar posicionada a 2 m sobre la superficie del suelo. La estructura propuesta por Schemenauer & Cereceda (1994a) es metálica; sin embargo, puede ser construida con otros materiales

dependiendo de la disponibilidad, presupuesto, acceso al sitio, entre otros factores.

Para esta investigación se utilizó un colector estándar de neblina de 35% y otro de 50% de coeficiente de sombra. Se escogió una estructura con paneles verticales y perpendiculares a la dirección del viento para capturar el agua de la niebla en la isla ya que ésta se desplaza en dirección horizontal por las corrientes del viento; las pendientes del barlovento constituyen un obstáculo para las masas de aire cargadas de humedad que son arrastradas por el viento durante la época seca, lo que constituye una ventaja para evaluar el potencial de captura de niebla. Se comparó la cantidad de neblina recolectada por los dos SFC y se determinó cuál es el colector más eficiente bajo las condiciones de Galápagos.

1.2.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

Este proyecto de investigación se realiza con el fin de conocer el potencial de captura de niebla en San Cristóbal para mejorar la calidad de vida de la población en el archipiélago.

El agua colectada con los atrapanieblas, en caso de ser suficiente para cubrir la demanda y de que se implemente, podría satisfacer las necesidades de los habitantes, reducir los costos que deben afrontar en la época seca, en la que tienen que abastecerse del recurso por medio de tanqueros municipales, además de incrementar las fuentes de trabajo, al mejorar la capacidad productiva. Un incremento en la actividad agrícola reduciría la dependencia de la importación de productos desde el continente, lo que a su vez, disminuiría la introducción de especies, como se menciona en la Planificación de Recursos Hídricos de las Islas Galápagos (CISPDR, 2015).

El agua captada de la niebla puede ser aprovechada con mayor facilidad por los agricultores de la zona rural que carezca de fuentes hídricas; los costos de construcción de los dispositivos son relativamente bajos, los materiales son de fácil acceso e incluso se pueden utilizar materiales de la zona, el ensamblaje del dispositivo es sencillo; los costos de mantenimiento también son bajos, la malla,

dependiendo del material usado, tendrá que ser reemplazada cada 3 a 10 años (Schemenauer & Cereceda, 1994a), y se debe remover los agentes que se hayan impregnado en la misma ya que reducen su eficiencia. La cantidad de agua recolectada está en función del tamaño de la malla, lo que a su vez, determinará los costos de implementación (Schemenauer & Cereceda, 1994a).

La intervención del proyecto internacional *Galápagos Islands Integrated Water Studies (GIWS)*, de la Universidad Pierre et Marie Curie de París, dirigido por Sophie Violette, se enfoca en la investigación de los recursos hídricos del archipiélago para brindar recomendaciones sobre el manejo de los mismos. El proyecto ha estado trabajando en las islas desde el año 2003 y abarca tres aspectos importantes dentro de la investigación, que son la cuantificación de la recarga, las propiedades de las formaciones volcánicas y la modelación.

El proyecto GIWS cuenta con sitios pilotos expuestos a los vientos alisios en el lado barlovento en la isla Santa Cruz (Pelican Bay) y la isla San Cristóbal (Cerro Gato y cuencas hidrográficas adyacentes) (GIWS, 2016). El estudio se realizó en la isla San Cristóbal debido a que existe más información disponible y a la facilidad de acceso al sitio donde se localiza la estación meteorológica a 600 msnm, ubicación propicia para instalar los dispositivos y registrar la intercepción de neblina.

La obtención de datos de captura de neblina, contribuye a dicha investigación y podrían ser de gran utilidad en la toma de decisiones con respecto a la utilización del recurso hídrico en el archipiélago. Una vez que los resultados de la investigación sean aplicados, el área rural de las islas podría ser beneficiada en gran medida, ya que la actividad productiva se incrementaría y mejoraría su calidad de vida.

El desarrollo de este proyecto de investigación también permite adquirir destrezas sobre la investigación en campo y el tratamiento y explotación de datos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Cuantificar el agua de niebla capturada y determinar las condiciones que favorecen su recolección para mejorar la dotación de agua para la población rural de la Isla San Cristóbal que no disponga de fuentes hídricas durante la época de sequía, a través de la utilización de colectores de niebla estándar (Standar Fog Collector SFC) y datos meteorológicos.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los dispositivos de captura de neblina aplicables en San Cristóbal a través de la recopilación y análisis bibliográfico.
- Determinar la necesidad de captura de agua de niebla durante la época seca del año.
- Analizar la variabilidad temporal de la existencia de neblina a través del análisis de datos meteorológicos.
- Determinar estadísticamente las variables meteorológicas de mayor influencia en la captura de neblina.
- Identificar el dispositivo que presente mayor eficiencia de captura de neblina a través de la instalación de los mismos en la estación a 600 msnm en San Cristóbal.
- Determinar si el potencial de dicho dispositivo es suficiente para satisfacer la demanda de agua.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

El archipiélago de Galápagos tiene condiciones climáticas atípicas, determinadas por su posición geográfica, la presencia de corrientes oceánicas y el movimiento de la Zona de Convergencia Inter-Tropical (ITCZ), lo que da lugar a dos temporadas al año, la fría de garúa y la cálida de invierno (Trueman & d'Ozouville, 2010).

En general, las islas no cuentan con recursos de agua superficial, no obstante, en San Cristóbal, la morfología de la isla y las condiciones climáticas y geológicas han favorecido el desarrollo del suelo que ha dado lugar a una red de drenaje, y es la única isla con fuentes permanentes de agua que son alimentadas por acuíferos colgados. La población de la isla depende de estas fuentes para abastecerse del recurso y lo realizan por medio de captaciones ubicadas en el barlovento, sin embargo, existen lugares que no tienen acceso a la red de drenaje o a fuentes naturales de agua próximas.

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

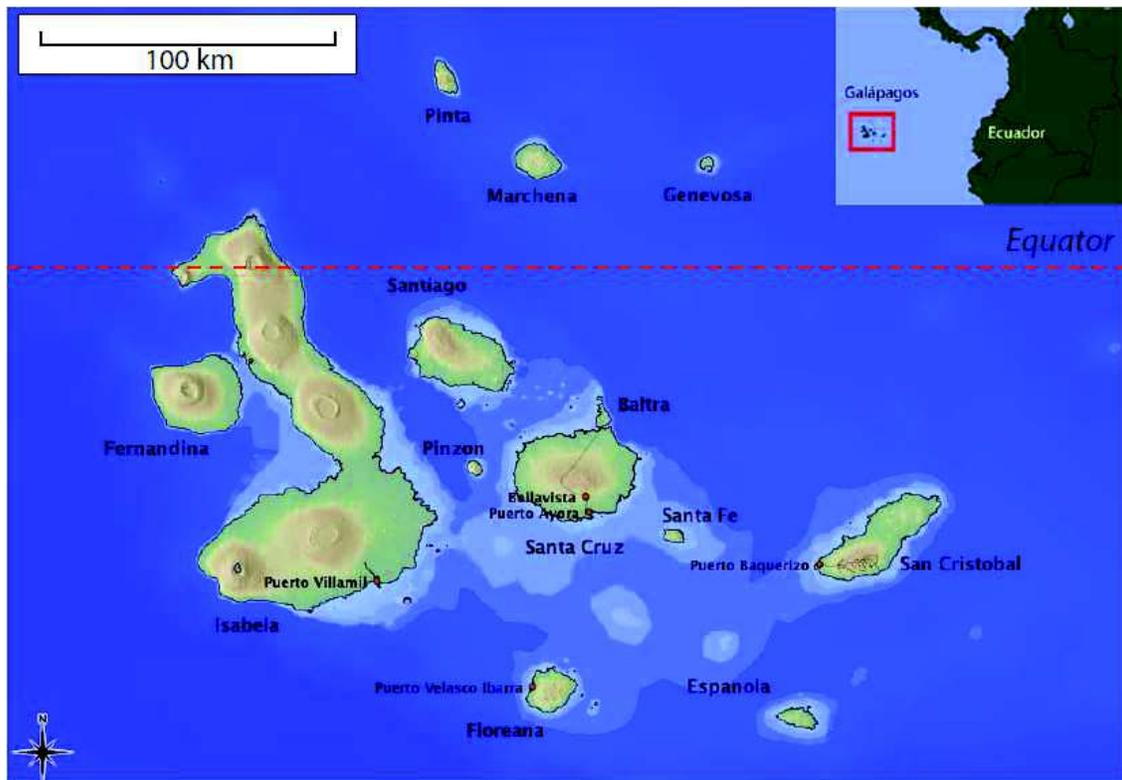
Las condiciones climáticas de Galápagos son atípicas debido a la posición geográfica en la que se encuentra y existen dos estaciones al año, la época calurosa de invierno y la época fría de garúa.

2.1.1 CLIMA

Las islas Galápagos están ubicadas a 1000 km al oeste del Ecuador continental (figura 2.1) y su clima es único debido a la influencia de corrientes oceánicas y del viento. Se diferencian claramente dos zonas climáticas, en las partes altas el clima es húmedo mientras que las partes bajas son secas; estas características

se hacen más evidentes en presencia del fenómeno cálido de El Niño y seco de La Niña (Trueman & d'Ozouville, 2010).

FIGURA 2.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ISLAS GALÁPAGOS



Fuente: Pyret (2011)

El clima de Galápagos está determinado por la interacción de las corrientes oceánicas y los vientos alisios del Sudeste, la influencia de estas corrientes se basa en la migración interanual de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ por sus siglas en inglés), desde el norte hacia el sur (Trueman & d'Ozouville, 2010). En esta zona coinciden los vientos alisios del hemisferio norte con los del hemisferio sur, según Sachs et al. (2009) la ITCZ es una banda tibia de convección profunda que pasa de los 10°N en el hemisferio norte en verano a 3°N en el hemisferio norte en invierno (Trueman & d'Ozouville, 2010).

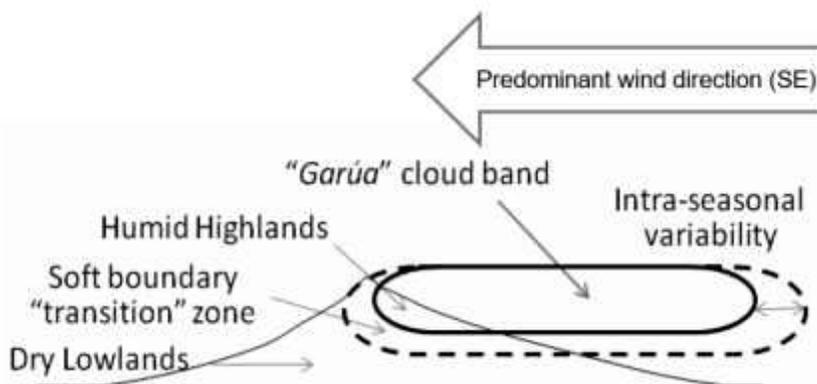
El movimiento de la Zona de Convergencia Intertropical determina la diferencia estacional de Galápagos, esto resulta en variaciones de los vientos alisios

predominantes del sudeste (SE) y las corrientes oceánicas frías ascendentes (Ecuatorial y Humboldt) que convergen en el archipiélago (Violette et al., 2014).

De acuerdo a Alpert (1946), la ITCZ se encuentra al norte de Galápagos la mayor parte del año y los vientos alisios del sudeste atraviesan el archipiélago, trayendo consigo masas de aire enfriadas por las bajas temperaturas del océano hacia el sur; las condiciones de las islas son tropicales cuando la ITCZ migra hacia el sur, ya que los vientos alisios son reducidos y se hacen presentes corrientes cálidas que llegan desde el norte (Trueman & d'Ozouville, 2010).

La migración interanual de la zona de convergencia intertropical da lugar a la aparición de dos temporadas climáticas, la cálida de “invierno” y la fría de “garúa”, que se puede observar en la figura 2.2. En la época fría, que ocurre generalmente de junio a diciembre, la temperatura del aire y del océano son menores y existe una capa de inversión térmica, en la que las masas de aire, que han sido enfriadas por el agua fría de la superficie del océano, permanecen atrapadas debajo de las masas de aire caliente produciéndose condensación en donde estas masas se juntan; este proceso se evidencia más en el lado barlovento de las islas, debido a que los vientos empujan las masas de aire contra la pendiente de las islas; la nubosidad y las lluvias orográficas son persistentes en las partes altas de la isla pero escasas en la parte baja (figura 2.2) (Trueman & d'Ozouville, 2010). La condensación ocurre a partir de los 250 m de altura y se forman nubes de estrato que dan lugar a la garúa (Trueman & d'Ozouville, 2010).

FIGURA 2.2 ZONIFICACIÓN CLIMÁTICA EN LA ÉPOCA DE GARÚA



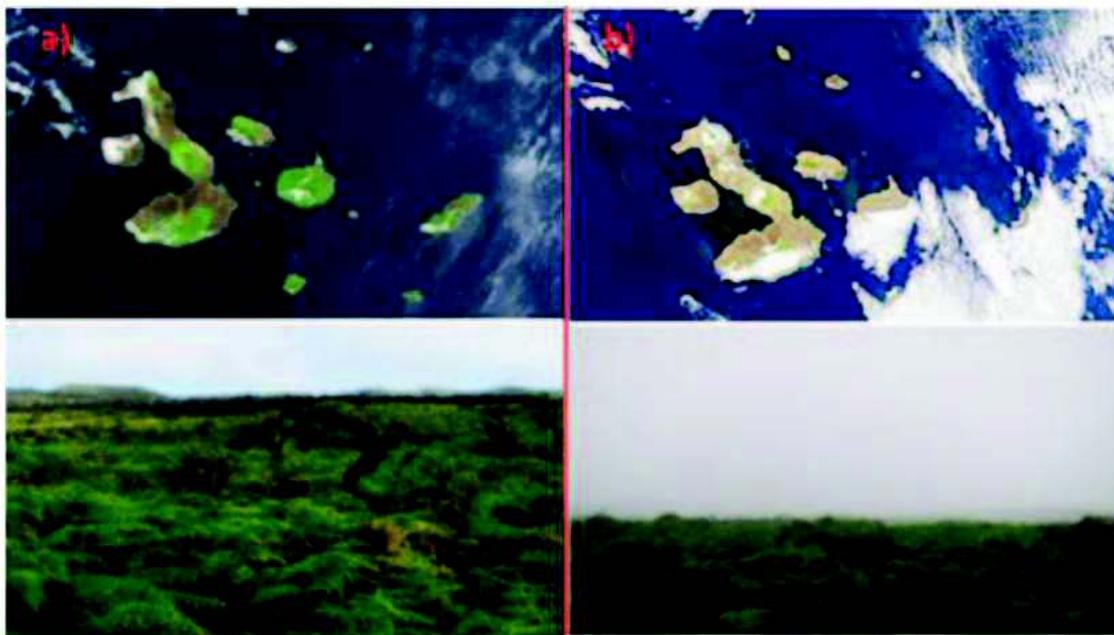
Fuente: Trueman & d'Ozouville (2010)

En estas islas se puede diferenciar claramente el lado barlovento y sotavento, el primero está siempre expuesto a los vientos alisios del sudeste (Violette et al., 2014).

Por otra parte, en la época cálida de invierno, de enero a mayo, el agua del océano se encuentra a mayor temperatura, provocando que la Zona de Convergencia Intertropical se desplace hacia el sur y los vientos alisios cesen, al igual que las corrientes frías (Trueman & d'Ozouville, 2010; Domínguez, 2016). La temperatura del océano y del aire incrementan y se producen procesos de convección, lo que origina lluvias convectivas, siendo éstas mayores conforme incrementa la altura (Trueman & d'Ozouville, 2010; Domínguez, 2016).

La diferencia de las dos estaciones se puede ver en la figura a continuación:

FIGURA 2.3 ARCHIPIÉLAGO DE GALÁPAGOS Y BARLOVENTO DE LA ISLA SANTA CRUZ EN A) TEMPORADA DE INVIERNO, B) TEMPORADA DE GARÚA



Fuente: González, 2013

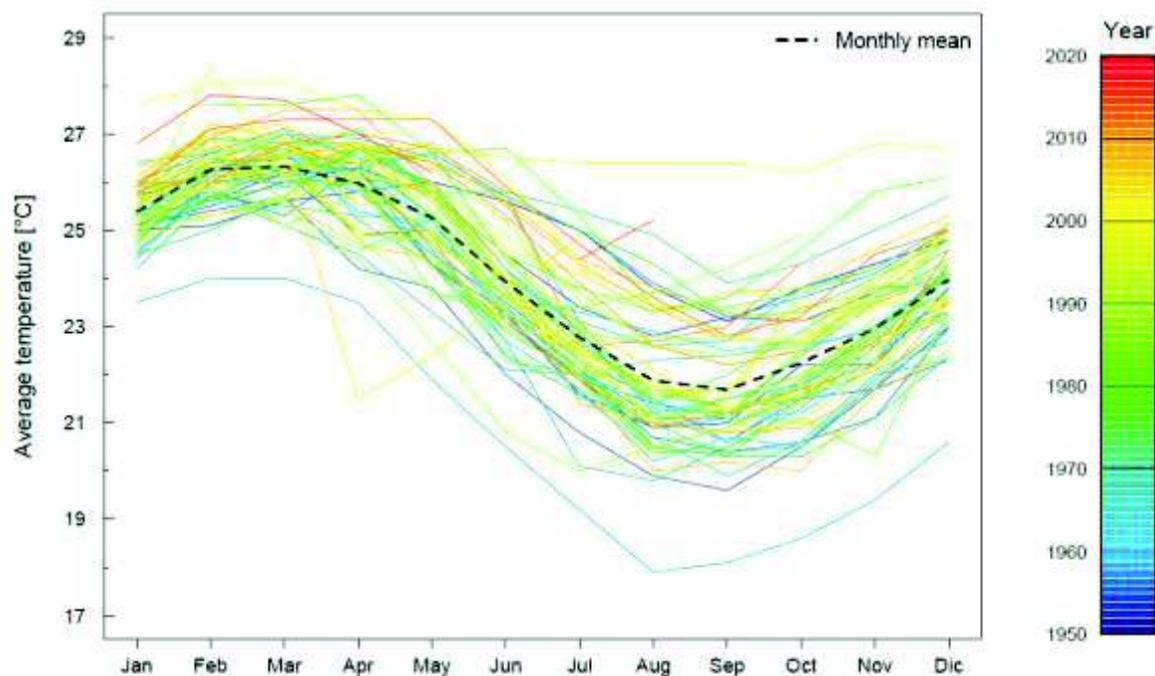
Un fenómeno de gran influencia en las temporadas climáticas es el ENSO (El Niño Southern Oscillation). La fase cálida de ENSO es El Niño, la temperatura del océano se incrementa y los vientos alisios se debilitan, ocasionando que las temperaturas del aire aumenten, existan fuertes lluvias y la duración de la época

cálida de invierno sea más larga de lo normal. Por el contrario, La Niña provoca sequías y condiciones más frías de lo normal (Trueman & d'Ozouville, 2010).

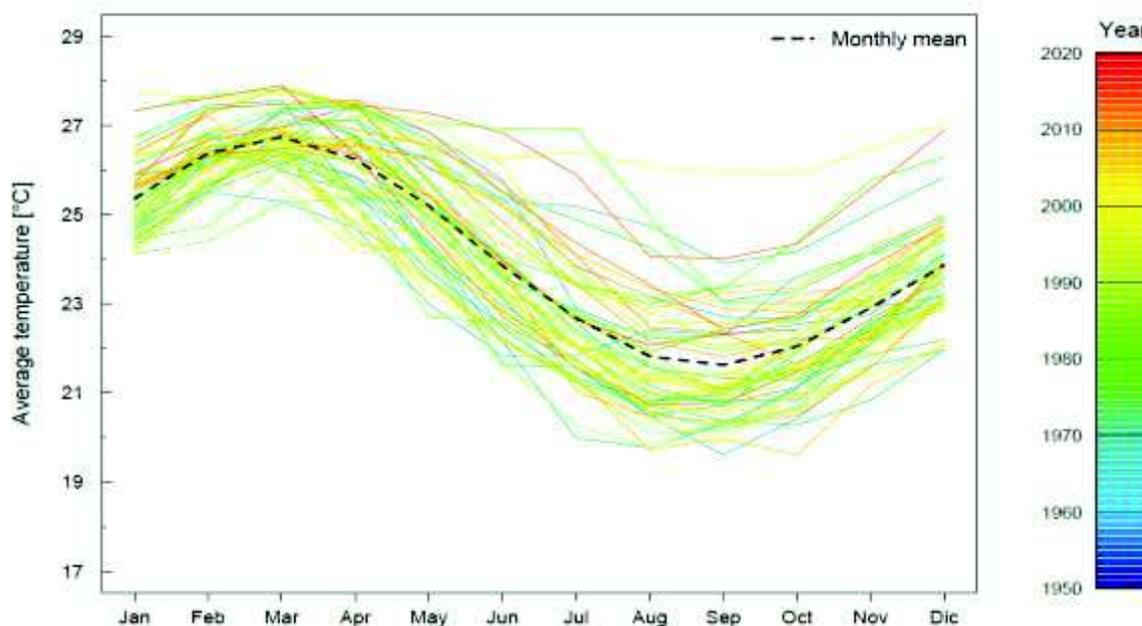
De acuerdo a registros históricos desde 1950 hasta la actualidad, la temperatura promedio sigue la misma tendencia cada año, en San Cristóbal y en Santa Cruz. En la isla San Cristóbal, las temperaturas más altas se presentan en los meses entre enero y mayo, siendo mayor entre febrero y marzo, donde la temperatura media llega a 26.3°C, aproximadamente. Esta temperatura empieza a decrecer a partir de junio hasta septiembre, siendo éste el mes más frío con 21.6°C, aproximadamente, a partir de ahí la temperatura empieza a incrementar (figura 2.4).

En Santa Cruz la mayor temperatura media mensual se da en marzo, con 26.8°C, aproximadamente, y la menor llega a 21.6°C, aproximadamente, en septiembre (figura 2.5).

FIGURA 2.4 TEMPERATURA HISTÓRICA EN SAN CRISTÓBAL



Elaboración: Domínguez Christian

FIGURA 2.5 TEMPERATURA HISTÓRICA EN SANTA CRUZ

Elaboración: Domínguez Christian

Galápagos puede dividirse en diferentes regiones según su temperatura: tropical y subtropical, y temperada fría y cálida (PDOT, 2012).

San Cristóbal cuenta con tres zonas bioclimáticas claramente diferenciadas, se observa en la figura 2.6, la zona árida que se encuentra entre los 0 y 180 msnm y presenta una temperatura de 17 a 22°C, la zona de transición que va desde los 180 a 320 msnm con temperaturas entre los 14 y 17°C, y la zona húmeda ubicada sobre los 320 msnm con temperaturas entre los 13 y 17°C (PDOT, 2012).

En la zona agropecuaria los patrones de precipitación se consideran buenos y los valores promedio oscilan entre los 1500 mm al año (PDOT, 2012).

La precipitación anual en el Archipiélago de Galápagos es desigual, es decir, la precipitación en el barlovento es mayor que en la pendiente del sotavento, y es mayor conforme aumenta la altitud (CISPDR, 2015).

La precipitación está influenciada en ciertos lugares por las fuentes de humedad y también por la elevación. Las estaciones meteorológicas del archipiélago de menor elevación presentan una mayor variación en la precipitación interanual,

mientras que en las estaciones con mayor elevación es al contrario (CISPDR, 2015).

La Isla San Cristóbal, al encontrarse al Sureste del archipiélago, está más influenciada por los vientos alisios cargados de humedad (PDOT, 2012). La temperatura promedio anual en San Cristóbal es de 24.8°C según los datos de condiciones meteorológicas en Puerto Baquerizo a 6 msnm; durante la época fría o de garúa la temperatura promedio anual es de 23.5°C y en la época cálida es de 26.5°C, la precipitación anual en Puerto Baquerizo Moreno es 343 mm (Domínguez, 2016). De acuerdo a Domínguez (2016), el gradiente de precipitación es 270mm/100m, y la precipitación alcanza 190 mm en la costa.

La humedad relativa en la Isla San Cristóbal sigue un patrón estacional, entre enero y junio, que corresponde a la época de lluvia y tiene valores entre 90% y 97% de humedad (PDOT, 2012).

Las regiones con elevaciones a partir de los 400 msnm poseen abundante neblina desde el mes de junio hasta septiembre, ésta se condensa y aporta a la recarga de agua subterránea, cerca de 20% de agua adicional para dichas elevaciones (Pryet et al., 2012). El agua procedente de la niebla corresponde al 8.18% de la precipitación total anual (CISPDR, 2015).

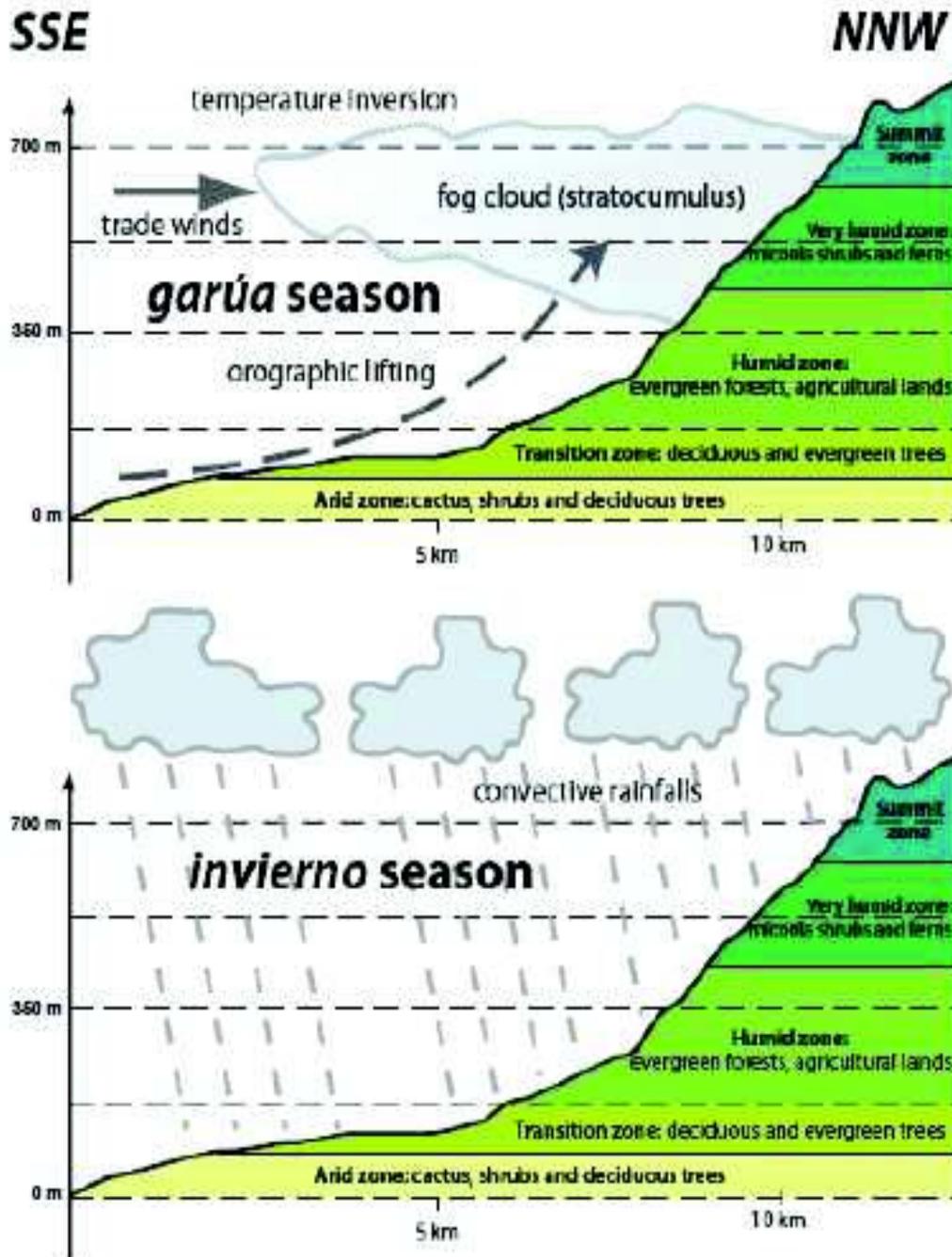
En la zona agrícola la precipitación es de 2000 mm y disminuye hacia la parte baja, siendo la menor de 400 mm (Domínguez, 2016; SIGTIERRAS, 2011).

La zona más húmeda de la isla se encuentra en la parte alta, en el sector Pampa Mía y La Soledad la precipitación supera los 1800 mm, esto se debe a la garúa y las lluvias orográficas, lo que a su vez, permite que existan fuentes de agua superficial, siendo la única isla del archipiélago que las posee (SIGTIERRAS, 2011).

La intensidad de precipitación en 30 minutos en San Cristóbal es baja en comparación con el Ecuador continental, pero durante el fenómeno de El Niño las precipitaciones superan hasta el doble su parámetro normal (SIGTIERRAS,

2011). En la parte alta de la isla la intensidad de precipitación es mayor que en la parte costera, reportando un promedio mayor a 30 mm/h (SIGTIERRAS, 2011).

FIGURA 2.6 ZONAS CLIMÁTICAS DE SAN CRISTÓBAL EN LA TEMPORADA DE GARÚA Y DE INVIERNO



Fuente: Pryet (2011)

2.1.2 HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA DE GALÁPAGOS

Las islas Galápagos están formadas de rocas basálticas mixtas (Adelinet, Fortin, d'Ozouville, & Violette, 2008), y emergen de una plataforma submarina poco profunda que forma la parte occidental de la cordillera Carnegie Ridge, en la placa de Nazca (Violette et al., 2014).

La isla Santa Cruz es una isla joven, cuya superficie de lava más antigua es de hace 1.3 Ma, mientras que la isla San Cristóbal emergió hace 2.35 Ma (Violette et al., 2014).

La parte alta de Santa Cruz tiene fuertes pendientes, de más de 5° , y la costa es relativamente plana, está rodeada de norte a sur por una plataforma asimétrica de baja pendiente de menos de 2° (Adelinet et al., 2008; Violette et al., 2014). La parte sur de San Cristóbal también posee fuertes pendientes de más de 5° (Violette et al., 2014).

La isla San Cristóbal está cubierta en la parte alta por una gruesa capa de piroclastos con un espesor de 10 m; el clima húmedo del barlovento de la isla, la capa gruesa de piroclastos y la larga exposición al ambiente han favorecido el desarrollo del suelo (Violette et al., 2014). Por otra parte, el lado barlovento de Santa Cruz está cubierto por una capa fina de suelo cuyo espesor varía con la altura, siendo de 0 m en la costa, 1 m en la mitad de la isla y de pocos centímetros en la parte alta (Violette et al., 2014). Esta capa fina cubierta de basaltos fracturados no permite la retención de agua y la mayoría del agua de precipitación se infiltra (Violette et al., 2014).

Estas dos islas difieren en sus propiedades hidrodinámicas, esto se debe a las diferencias en su morfología. San Cristóbal ha estado expuesta por más tiempo a los factores ambientales y procesos de erosión que Santa Cruz, y tiene condiciones más húmedas por estar más influenciada por los vientos alisios debido a su posición. También su morfología permite que se creen fuentes de agua a diferentes alturas, mientras que en Santa Cruz esto no ocurre debido a su perfil empinado (Adelinet et al., 2008; Violette et al., 2014; Domínguez, 2016).

Existe un acuífero base en la isla Santa Cruz, y es posible que existan en otras islas como en San Cristóbal. El acuífero base de Santa Cruz es utilizado para suministro de agua en Puerto Ayora, sin embargo, el incremento de su conductividad eléctrica sugiere que está siendo sobreexplotado (Violette et al., 2014). El acuífero base se observa en toda la isla, a éste ingresa el agua del mar por los lados de las rocas basálticas altamente permeables, no existen grandes pérdidas en el potencial hidráulico y el valor del gradiente hidráulico es bajo ($i=5.10^{-5}$), así como también el coeficiente de almacenamiento (Violette et al., 2014). Esto ocurre en las islas jóvenes, el agua se infiltra y llega al océano rápidamente, mientras que en las islas viejas el almacenamiento de agua subterránea es mucho mejor (Pryet, 2011).

2.1.2.1 ENFOQUE EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL

La isla San Cristóbal es la única del archipiélago que posee fuentes de agua superficial. Existen fuentes de agua permanentes y esporádicas localizadas en el lado sureste de la isla entre los 200 m y 550 m de elevación, que tienen lugar gracias a los acuíferos colgados, que se forman sobre una superficie impermeable (Domínguez, 2016; Violette et al., 2014).

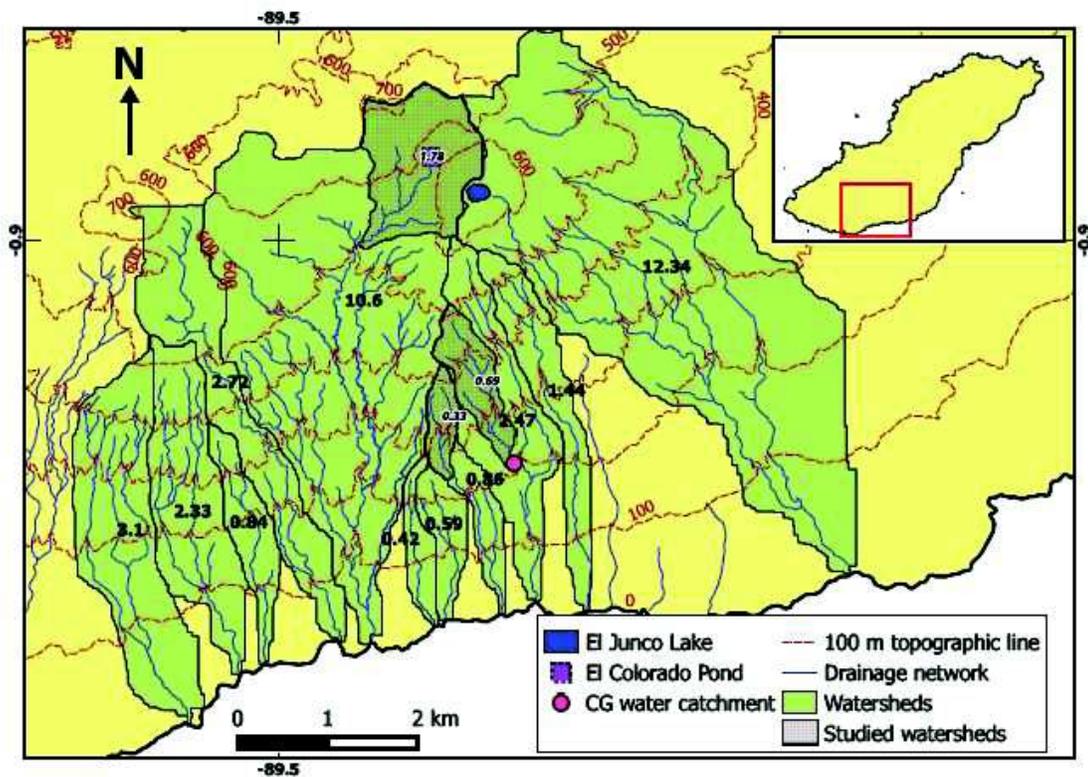
El sistema hidrológico en San Cristóbal es complejo, más aún en el barlovento de la isla. En la parte alta existen pastos con pendientes suaves que favorecen el encharcamiento de agua de lluvia, este es el caso del estanque “El Colorado”, de 0.05 km², en donde la acumulación de agua depende de la temporada, y la laguna “El Junco” de 0.04 km² y 5 m de profundidad, con acumulación permanente de agua (Domínguez, 2016).

San Cristóbal posee una capa de suelo espeso. En la parte media de la isla, entre los 200 y 500 m de elevación se encuentra una red de drenaje bien desarrollada (figura 2.7). La escorrentía erosiona la superficie de materiales arcillosos y crea espacios en donde el agua se acumula. Algunas encañadas están secas pero otras son alimentadas de agua por fuentes permanentes que corresponden a salidas naturales de agua de acuíferos colgados y su caudal sufre variaciones

durante su recorrido, desapareciendo o reapareciendo aguas abajo (Domínguez, 2016). Estas fuentes de agua se recargan tanto en la temporada de garúa como en invierno a partir de los 420 msnm (Domínguez, 2016).

También se observa la formación de una capa persistente de neblina sobre los 400 m de elevación, y es un factor que puede contribuir a la recarga del agua subterránea (Domínguez, 2016).

FIGURA 2.7 RED DE DRENAJE Y EXTRACCIÓN DE CUENCAS DEL BARLOVENTO DE SAN CRISTÓBAL



Fuente: Domínguez (2016)

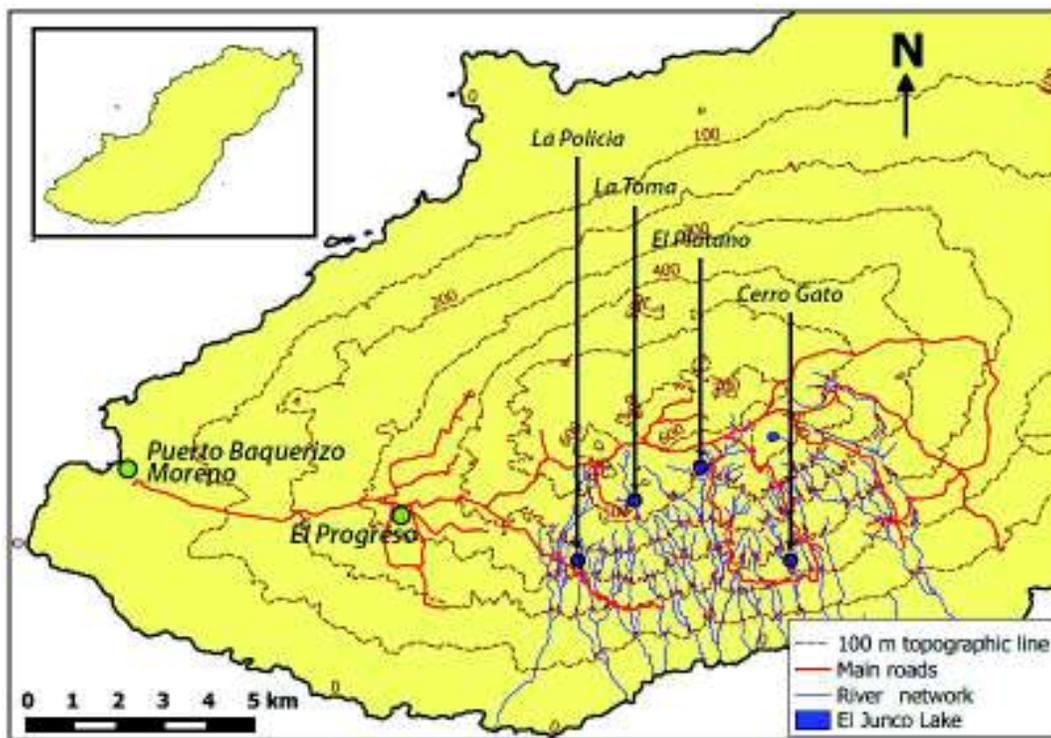
Debido a la corta extensión de las cuencas, el estudio y comprensión del ciclo hidrológico a nivel atmosférico, superficial y subterráneo se facilita, así como también el monitoreo hidrológico (Domínguez, 2016).

En las pendientes del barlovento las cuencas hídricas son relativamente pequeñas, entre 0.5 a 12 km². Se realizan captaciones en los ríos para abastecer

a la población de la isla y para irrigación (figura 2.8); según Domínguez (2016) éstas son:

- Encañada Cerro Gato: Se utiliza para el suministro de agua que abastece al 50% la población de Puerto Baquerizo Moreno con una captación a 175 msnm (figura 2.8).
- Embalse La Toma: Consiste en una presa a 520 msnm que recoge aguas de la parte alta que su usa para los habitantes de Puerto Baquerizo Moreno, El Progreso y otros sectores (figura 2.8).
- Encañada La Policía: Se encuentra a 320 msnm y este recurso es recolectado por medio de tanqueros para ser distribuido a algunos sectores de San Cristóbal (figura 2.8).
- Encañada El Plátano: Se utiliza para el riego de cultivos, consiste en un tanque ubicado en la salida de la cuenca El Bayo a 500 m de elevación (figura 2.8).

FIGURA 2.8 LOCALIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CAPTACIONES DE AGUA EN SAN CRISTÓBAL



Fuente: Domínguez (2016)

La población depende de estas fuentes para su abastecimiento de agua. Según d'Ozouville (2007) en las partes bajas de la isla únicamente cuatro encañadas llegan al océano, esto ocurre debido a que se producen pérdidas por infiltración en los lechos de los ríos (Domínguez, 2016).

2.1.3 USO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL

Algunos datos que se mencionan a continuación están basados en el Censo de Población y Vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) en el año 2010, que han sido recopilados por el Consejo de Gobierno del Régimen Especial de Galápagos (CGREG, 2014).

Galápagos tiene una población total de 25,124 habitantes (INEC, 2010); el cantón San Cristóbal tiene una población total de 7,475 habitantes, de los cuales 803 pertenecen a la población rural, correspondiente al 10.74% de la población total del cantón (CGREG, 2014).

El agua en la zona rural del cantón proviene de cinco fuentes: de la red pública se abastecen 141 viviendas, aunque el agua no es potable, de pozo 2 viviendas, de río, vertiente, acequia o canal 32 viviendas, de carro repartidor 4, y otras fuentes como agua lluvia o albarrada 8 viviendas (INEC, 2010).

El agua para consumo en la zona rural de San Cristóbal es, en su mayoría, hervida, 132 viviendas del total, mientras que 54 viviendas compran agua purificada, 25 la beben tal como llega al hogar, en 11 le colocan cloro para consumirla, y 6 la filtran (INEC, 2010).

En la isla Santa Cristóbal, la zona húmeda se divide en dos sub-zonas, por debajo de los 400 m de altitud se encuentra la zona húmeda caracterizada por bosque secundario y pastizales, y la zona muy húmeda a partir de los 400 m de altitud, la cual posee en mayor cantidad Miconias y helechos endémicos. La zona agrícola se ubica en mayor proporción en la parte alta de la isla hasta la cumbre, la mayoría de fincas están localizadas en el lado barlovento y sotavento (Domínguez, 2016). Los sectores más favorecidos para la agricultura y ganadería

se encuentran en el barlovento, sin incluir la zona costera, y las partes altas de la isla (Domínguez, 2016).

La actividad agropecuaria es significativa en la provincia de Galápagos. Actualmente, la superficie total de las Unidades de Producción Agropecuaria (UPA) es de 755 ha; el 47% de éstas se encuentra en la Isla Santa Cruz, el 34% le corresponde a San Cristóbal, el 17% a la isla Isabela, y finalmente el 2% se encuentra en Floreana (CGREG, 2014).

En cuanto al riego, en la isla existen 3 fuentes: Policía, Honda y Chino con 6 L/s, 30 L/s y 20 L/s, respectivamente; sin embargo existe un déficit de 1 766 016 m³ al 2010, lo que equivale a 20.5% de déficit. Para el 2025 y 2035 se tendrá un déficit de 6.28 hm³ y 7.10 hm³ respectivamente, equivalentes a un déficit de 74.9% y de 80.1% respectivamente (CISPDR, 2015). En el área agrícola de la isla el 16.16% corresponde a especies de pasto. El cultivo permanente que más se cultiva es el café (74%), y entre los cultivos semi-perennes se encuentran la caña de azúcar, la cual ocupa el 11.07% del área agrícola, el plátano el 0.49% y la piña el 0.71% (SIGTIERRAS, 2011).

En cuanto a la superficie de uso agrícola del cantón, los cultivos de ciclo de producción entre 1 a 3 años ocupan una superficie de 51.37 ha, lo que equivale al 0.49% de la tierra agrícola, cultivos de ciclo de producción menor a un año ocupan 74.95 ha, es decir, 0.71%, los ciclos de producción mayores a tres años ocupan 1167.59 ha y 11.07% en porcentaje de tierras, el uso agrícola de invernadero ocupa 0.20 ha o 0.002% de la superficie agrícola (SIGTIERRAS, 2011).

El área agropecuaria se ubica entre los 130 y 730 msnm en el cerro San Joaquín, existen varias encañadas en el lado Sureste de la isla que abastecen de agua a la zona rural. En la isla la actividad agropecuaria se ve favorecida por contar con suelos profundos y disponibilidad de agua dulce para riego, sin embargo, actualmente solo el 11% de la superficie agropecuaria se destina para cultivos (SIGTIERRAS, 2011).

La disponibilidad de los servicios básicos (agua, luz y alcantarillado) en la parroquia Puerto Baquerizo Moreno y El Progreso es baja a media, siendo baja un 43.34% de la superficie, es decir, 4570.12 ha, y media el 34.87% de la superficie, lo que corresponde a 3678.99 ha de superficie; la cobertura del servicio de agua potable es de 56.12% (SIGTIERRAS, 2011).

Dadas estas condiciones se puede contribuir a reducir o incluso eliminar el déficit de agua, enfocándose a la zona rural de San Cristóbal, por medio de dispositivos de captura de niebla.

2.2 CAPTURA DE NEBLINA

2.2.1 TIPOS DE DISPOSITIVOS DE CAPTURA DE NIEBLA

Los dispositivos de captura de neblina varían ampliamente en su estructura y superficie de recolección (tamaño, material, geometría, entre otros). Las estructuras más utilizadas a lo largo del tiempo han sido cilíndricas y bidimensionales; sin embargo, éstas pueden presentar variaciones específicas según el lugar o el estudio para el que hayan sido diseñadas.

2.2.1.1 Dispositivo cilíndrico

Este diseño fue creado por Pilar Cereceda, Horacio Larraín, Joaquín Sánchez y Nazareno Carvajal con la cooperación de la Universidad Católica de Chile, en el año 1980. Consiste en filamentos de polietileno colocados verticalmente y un bidón metálico para recolectar el agua. Es altamente eficiente en cuanto a captación de niebla y resistente a fuertes vientos (Aránguiz et al., 2009; Pascual et al., 2011).

La eficiencia de intercepción de este diseño disminuye con la adición de cilindros concéntricos ya que se crea más resistencia al viento y se vuelve una estructura más compacta (Gischler & Gischler, 1991).

FIGURA 2.9 COLECTOR CILÍNDRICO DE NEBLINA TIPO “HARP”

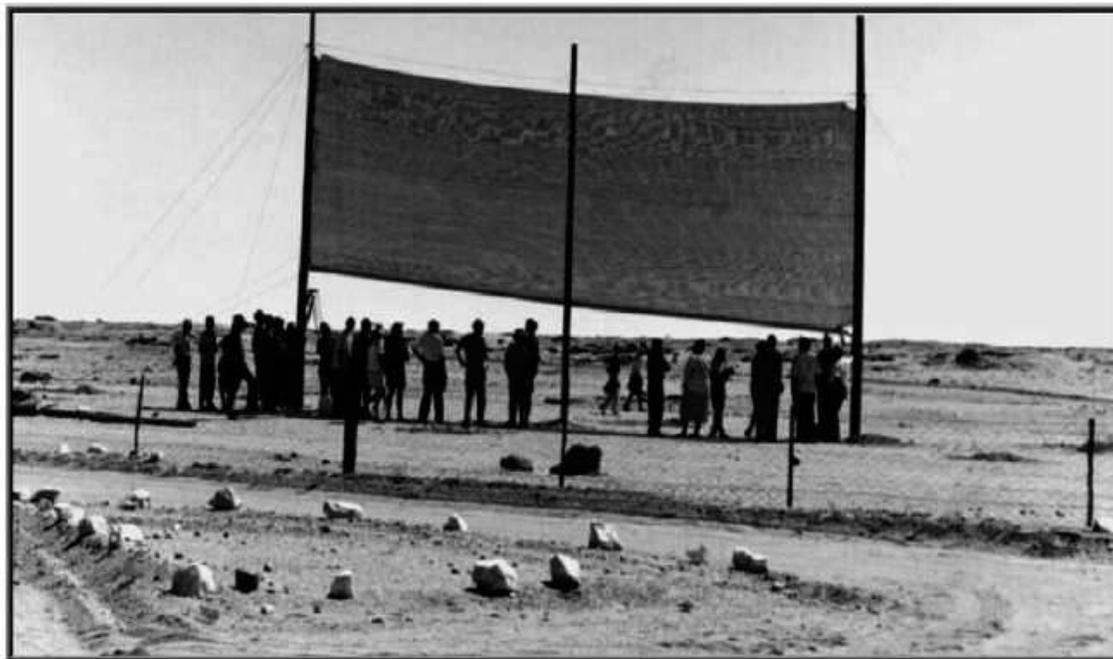
Fuente: USGS (2002)

2.2.1.2 Bidimensional

La mayoría de colectores de niebla instalados en el mundo pertenece a este grupo. Consisten en una superficie de intercepción de neblina, generalmente de malla Raschel (es posible utilizar otras), colocada perpendicularmente a la dirección del viento. La estructura puede estar enmarcada en una estructura rígida o tensada, entre dos postes. Las dimensiones de este tipo de dispositivos pueden variar según el sitio, presupuesto, requerimientos, entre otros, al igual que la forma en que están sostenidos, empotrados en el suelo o los materiales con los que son construidos (Cereceda et al., 2014).

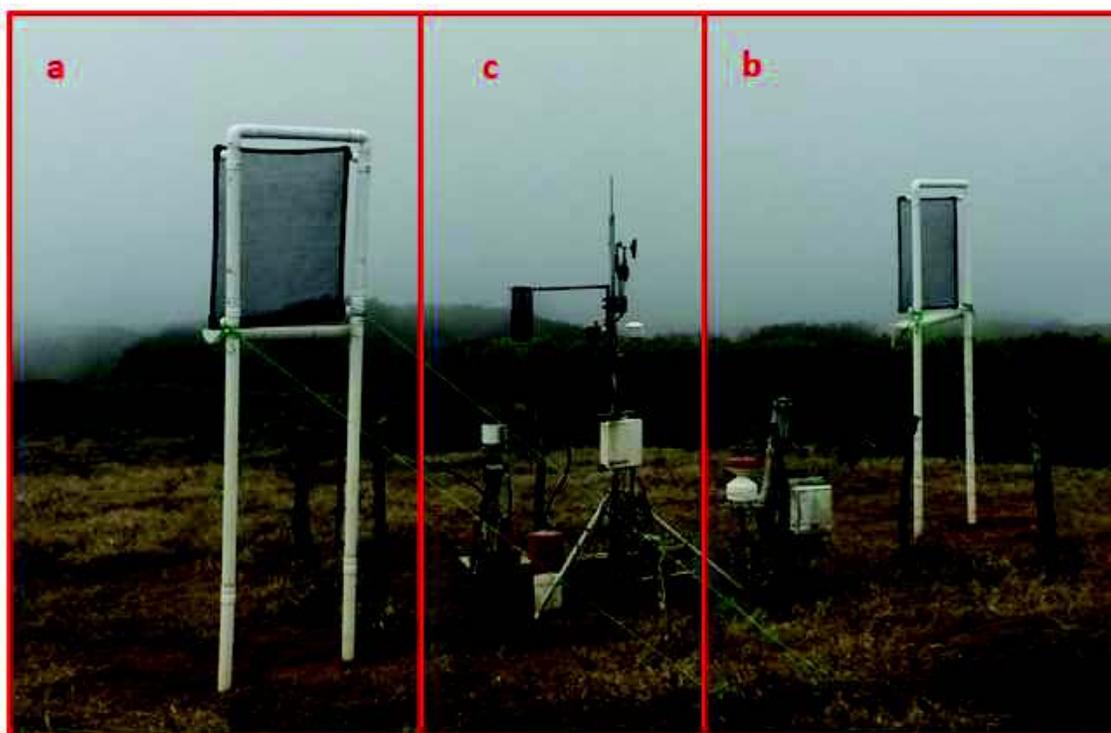
Este tipo de colectores presenta desventajas frente a vientos fuertes ya que su estructura pierde estabilidad y también la malla puede romperse, por otra parte, sus costos de construcción son bajos y son sencillos de implementar (Cereceda et al., 2014).

FIGURA 2.10 COLECTOR DE NEBLINA BIDIMENSIONAL



Fuente: Shanyengana et al. (2002)

FIGURA 2.11 COLECTORES DE NEBLINA INSTALADOS EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL A) Y B) COLECTORES ESTÁNDAR DE NEBLINA, C) COLECTOR CILÍNDRICO DE NEBLINA



Elaboración: Echeverría Paola

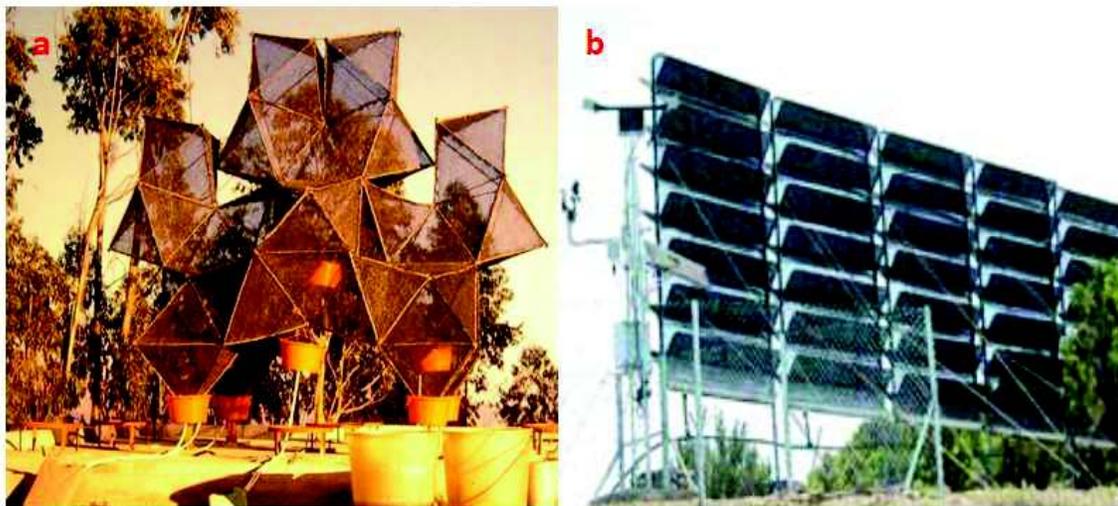
2.2.1.3 Tridimensionales

Son menos comunes que los diseños bidimensionales y se utilizan en mayor medida para experimentación. Este tipo de colectores se emplea en sitios con nieblas multidireccionales, por lo cual tienen superficies de captura en varias direcciones (Cereceda, Hernández, Leiva, & Rivera, 2014).

El colector macrodiamante pertenece a este grupo (figura 2.12a), fue el primer diseño realizado para la captación de niebla a nivel mundial por Carlos Espinosa en 1958, y fue patentado por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). La estructura del primer colector construido consiste en tubos cubiertos por malla Raschel; presentan alta eficiencia de captación, al igual que resistencia al viento, pero su costo por m² de captación es elevado (Aránguiz et al., 2009; Pascual et al., 2011).

Otro diseño de colector es el atrapanieblas DYSDERA (figura 2.12b), el cual tiene solo un frente expuesto al viento pero dentro de esta superficie están colocados paneles para mejorar la eficiencia de captura de agua de la niebla (Cereceda et al., 2014).

FIGURA 2.12 A) COLECTOR DE NIEBLA MACRODIAMANTE (CARLOS ESPINOZA, ANTOFAGASTA, CHILE), B) COLECTOR DYSDERA (CARLOS SÁNCHEZ RECIO, ISLAS CANARIAS, ESPAÑA)



Fuente: a) Hernández (2011), b) Cereceda et al. (2014)

Debido a que la cosecha de niebla es una alternativa eficiente para proveer de agua a zonas de escasez de agua, como zonas áridas, semiáridas, y zonas costeras; y además la niebla es un aporte en el balance hidrológico, se han implementado colectores piloto en diversas partes del mundo de manera exitosa.

Se han reportado experiencias de recolección del agua de niebla, con colectores bidimensionales, cilíndricos y otros, en Sudáfrica, Chile, Islas Canarias, Perú, Ecuador, Sultanato de Omán, Puerto Rico, Nepal, Croacia, la Península Ibérica, Japón, Colombia, Venezuela, Namibia, Costa Rica (Corell et al., 2014; Olivier, 2002; Regalado et al., 2017; Uehara et al., 2012).

El diseño de éstos varía en los materiales utilizados, el tamaño de la superficie colectora, el material de la misma, la estructura de soporte, la altura a la que se ubica la malla, entre otros factores, no obstante, casi todos tienen el mismo principio de operación.

Algunos ejemplos de diseños de colectores de neblina son (Olivier, 2002):

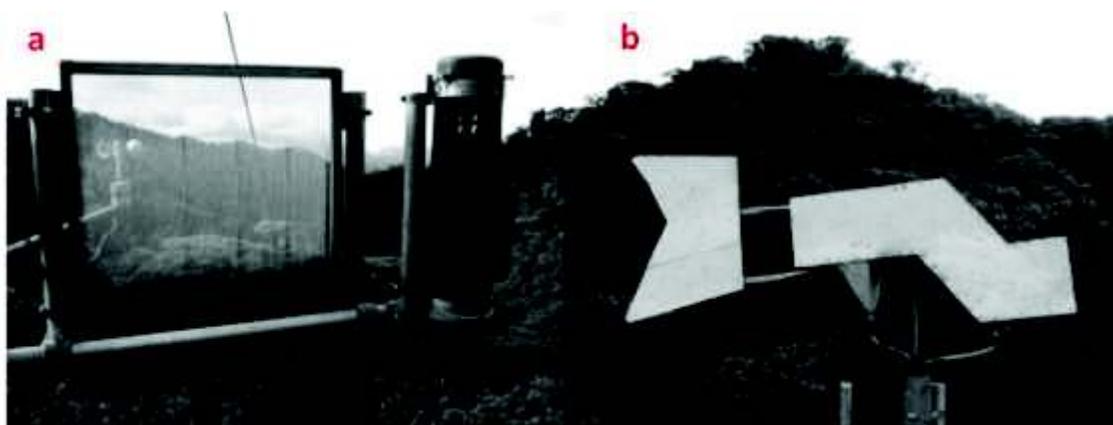
- Van Schoor collector (MvS)
- University of Pretoria collector (UP)
- CSIR collector
- Falconer & Falconer

Existen otros diseños de colectores de neblina, los cuales son utilizados para la investigación, mas no para el aprovechamiento del recurso; entre éstos se puede mencionar al Juvik-type fog gauge, que fue utilizado por Frumau et al. (2011), es una pantalla cilíndrica de aluminio tipo persiana de 40.5 cm de altura y área transversal de 540 cm². Los autores Frumau et al. (2011), efectuaron una modificación a este diseño, que consiste en la incorporación de un embudo en la parte superior del colector para medir separadamente los flujos verticales y horizontales.

Otro tipo de colector de neblina es el Wire Harp (WH) screen, que consiste en una red de hilos cilíndricos de nylon, separados 2 mm (Frumau et al., 2011). Esta

estructura ha sido utilizada tanto bidimensional como cilíndrica (Frumau et al., 2011; Regalado & Ritter, 2017). Por otra parte, el colector two-stage tunnel gauge (TTG, tipo Daube) separa la precipitación real de la neblina, en la primera etapa se colecta la lluvia por impacto en una rampa de 45°, la niebla pasa a la segunda etapa, donde impacta en una superficie de doble malla (WH) de nylon, con un ángulo que facilita el drenaje de las gotas por el arrastre del viento a lo largo de las cuerdas (Frumau et al., 2011).

FIGURA 2.13 A) WIRE HARP SCREEN Y JUVIK-TYPE FOG GAUGE MODIFICADO Y B) DAUBE-TYPE TUNNEL GAUGE



Fuente: Frumau et al. (2011)

2.2.2 COLECTOR DE NIEBLA ESTÁNDAR (STANDARD FOG COLLECTOR SFC)

El diseño se basa en el modelo propuesto por Schemenauer & Cereceda (1994) que consiste en un panel de superficie de recolección de 1m², sostenido por un marco, idealmente metálico galvanizado, de 1 cm de ancho o diámetro. La superficie de colección es colocada a 2 m sobre la superficie del suelo, esta distancia se estandariza ya que la colección de niebla puede variar con la altura (Schemenauer & Cereceda, 1994a).

Debajo de la malla se coloca una canaleta para recolectar el agua, ésta debe tener una pequeña inclinación para que el agua se desplace con facilidad hacia un extremo y pueda ser almacenada en un tanque hermético por medio de una

manguera, la cual debe ser de plástico y con un diámetro entre 7 y 10 mm, no es recomendable usar mangueras con diámetros pequeños para evitar taponamientos. El contenedor también es plástico, con el volumen necesario para el agua que se atrapa y que pueda ser medida. También en modo de estudio el agua interceptada de la niebla puede ser medida constantemente (Schemenauer & Cereceda, 1994a).

La canaleta puede ser semicircular, triangular o cuadrada, de 1.04 m de longitud y 15 cm de ancho, la profundidad de la misma debe ser igual o menor a 10 cm. La canaleta debe estar posicionada de tal manera que existan 2 cm antes del marco y 12 cm detrás, esto con el fin de que se colecten más gotas que caigan con cierto ángulo por vientos fuertes (Schemenauer & Cereceda, 1994a).

El soporte de las estructuras se lo realiza con dos postes ubicados a 1.01 m de distancia entre ellos y el marco se encuentra atornillado a los postes; los postes deben estar colocados en concreto en la base, de 30 a 50 cm sumergidos. La estructura debe ser tensada con dos cables a cada lado (Schemenauer & Cereceda, 1994a).

En cuanto a la malla, ésta es de polipropileno de 35% de coeficiente de sombra generalmente, ha sido usada exitosamente alrededor del mundo, el ancho de los filamentos es de 1 mm. La geometría del tejido de la malla es triangular, lo que beneficia el desplazamiento vertical por gravedad de las gotas que chocan contra ella; la distancia entre las fibras horizontales es de 1.3 cm. Este tipo de mallas, conocidas comúnmente como mallas Raschel, son resistentes a los rayos UV, de bajo costo y su tiempo de vida útil es de aproximadamente 10 años (Schemenauer & Cereceda, 1994a).

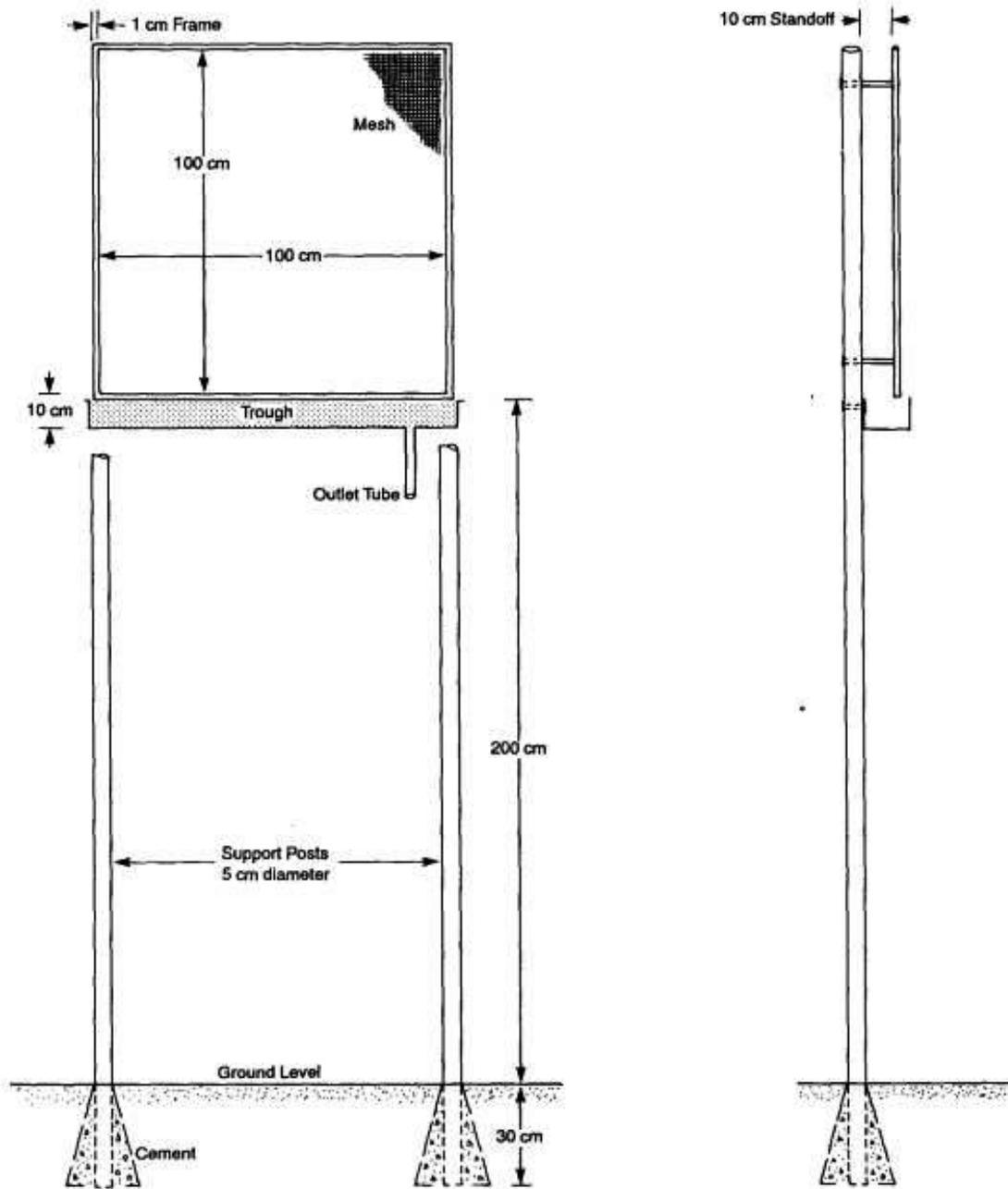
El coeficiente de sombra se refiere a la fracción en porcentaje del área cubierta por los filamentos de la malla. Las mallas más utilizadas para estos dispositivos son las Raschel y se distinguen según esta propiedad (Cereceda et al., 2014).

Para enmarcar la malla se requiere de un poco más de 1 m² de este material, se puede usar una o dos mallas para incrementar su eficiencia; la malla debe estar

correctamente tensada con el tejido triangular colocado verticalmente para favorecer el flujo del agua por gravedad (Schemenauer & Cereceda, 1994a).

De acuerdo a Schemenauer & Joe (1989) las fibras de la malla debe tener una alta eficiencia de recolección según el tamaño de la gota y la velocidad del viento, y al mismo tiempo tener una superficie que permita el paso de la nube a través de la malla, si ésta es muy tupida la malla actúa como un sólido y la captura de agua será poco efectiva ya que la nube pasará alrededor de la malla (Schemenauer & Cereceda, 1994a).

FIGURA 2.14 DIMENSIONES DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES DE UN COLECTOR ESTÁNDAR DE NIEBLA



Fuente: Schemenauer & Cereceda (1994a)

2.2.3 PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Las gotas de agua que son interceptadas por la malla se unen a otras formando gotas de mayor tamaño, desplazándose hacia abajo por gravedad para caer en la canaleta y ser llevadas al tanque de almacenamiento (Imteaz et al., 2011).

La eficiencia de colección de la malla depende de la eficiencia aerodinámica, la eficiencia de captura y la eficiencia de drenado.

La eficiencia aerodinámica es la fracción del flujo de agua que no ha sido perturbado e impactará en la malla (Rajaram, 2015), depende sobre todo del coeficiente de sombra de la malla. La malla representa una obstrucción para el flujo de la niebla, ésta pasa alrededor de la malla y la fracción que la atraviesa depende de la permeabilidad, el coeficiente de sombra (siendo inversos estos dos parámetros) y las características del tejido de la malla. La cantidad de gotas que choquen con las fibras de la malla dependen del porcentaje del coeficiente de sombra, si es muy grande atravesará muy poca niebla, y si es muy pequeña, pocas gotas chocarán con los filamentos. Por lo tanto, se debe escoger el diseño óptimo según las condiciones del sitio a implementar este dispositivo (Cereceda et al., 2014).

La eficiencia de captura depende de la deposición por intercepción y la deposición inercial. En la primera, las gotas de agua presentes en la niebla tienen a seguir las líneas de flujo del aire, cuando una gota pasa a una distancia menor que su diámetro de la superficie del filamento, se chocará contra éste. Por otra parte, la deposición inercial ocurre cuando las gotas son más densas que el aire, casi mil veces más densas, y tienen gran velocidad y tamaño en comparación con la curvatura de la línea de flujo en la que se encuentran inicialmente, por lo que tienden a seguir una trayectoria más recta y chocan con el filamento de la red (Cereceda et al., 2014).

La eficiencia de drenado se refiere a la relación que existe entre la cantidad de agua en el tanque de almacenamiento y el agua depositada en la malla. Suelen

ocurrir pérdidas de agua en la malla por arrastre del viento y no llega a la canaleta de recolección (Cereceda et al., 2014).

RESUMEN

San Cristóbal es considerada una isla vieja (2.3 Ma), en donde los procesos climáticos y erosivos han permitido que se forme una capa gruesa de suelo y una red de drenaje desarrollada, y también por las condiciones geológicas existen acuíferos colgados, originados en capas impermeables de basalto, que alimentan las fuentes permanentes de agua en la isla. A diferencia de San Cristóbal, en las demás islas el suelo no es tan desarrollado y la capacidad de almacenamiento de agua en las formaciones geológicas es débil, así como también lo es el gradiente hidráulico, por lo que el agua de precipitación se pierde rápidamente en el océano por infiltración.

En San Cristóbal, las suaves pendientes en la parte alta permiten la acumulación de agua que luego pasa a la red de drenaje en la parte media de la isla, donde también se encuentran los acuíferos colgados, entre 200 y 500 msnm. A partir de los 400 msnm se identifica una capa de neblina persistente en San Cristóbal y en otras islas del archipiélago.

En San Cristóbal no existe déficit de agua para consumo doméstico en la actualidad pero sí para riego. En este proyecto se evalúa la factibilidad de la neblina como una alternativa de suministro de agua, y dado que la dirección del viento es prácticamente constante y que las condiciones climáticas son adecuadas, se han utilizado colectores estándar de neblina para la investigación.

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

INTRODUCCIÓN

La isla San Cristóbal se encuentra al este del archipiélago, el sitio de estudio se encuentra en el barlovento de la isla, dentro de la zona agrícola, la vegetación se compone de helechos y arbustos de *Miconia Robinsoniana*. El monitoreo de las variables climáticas se llevó a cabo con la estación climática ubicada a 600 msnm, con intervalos de 15 minutos.

Para medir la intercepción de neblina se utilizó un colector cilíndrico y dos colectores estándar de neblina, estos últimos se construyeron de material PVC debido a la sensibilidad del ecosistema de Galápagos y los costos de construcción y transporte de los dispositivos.

En este capítulo se describen las herramientas estadísticas y los métodos que se desarrollaron para analizar el clima de la isla y la determinación de la influencia de las variables climáticas en la captura de neblina, así como también el modelo de separación de lluvia y neblina para obtener la cantidad de neblina neta capturada con los dispositivos. La estimación de la demanda de agua para consumo doméstico y ganadería se realizó por medio del método de cuotas mientras que la demanda de agua para agricultura se llevó a cabo por medio de un balance hidrológico para un año promedio y un año seco, a partir de los gradientes orográficos de la precipitación, evapotranspiración e intercepción de neblina, este balance se realizó por rangos de elevación cada 100 m, anual y mensualmente. Posterior a esto, se calculó el déficit hídrico en la zona rural de San Cristóbal y también en cada rango de elevación, y se determinaron las zonas y los meses con más escasez de agua. Adicionalmente, se estimó el área y el número de colectores que podrían cubrir el 25% y 15% de este déficit en un año promedio y un año seco, respectivamente.

3.1 SITIO DE ESTUDIO

3.1.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

El archipiélago de Galápagos tiene un clima característico debido a su posición ecuatorial, con dos estaciones bien diferenciadas al año (invierno y garúa). En la estación de garúa la temperatura del agua del océano y el aire es baja, están presentes lluvias orográficas y también una capa semipermanente de neblina en la parte alta de las islas. En la temporada de invierno la temperatura del aire y el océano es más alta y existen lluvias convectivas (Pryet et al., 2011; Trueman & d'Ozouville, 2010; Violette et al., 2014).

De acuerdo al registro histórico (1965-2015) de variables climáticas obtenido con la estación operada por la Fundación Charles Darwin en la costa de Santa Cruz a 6 msnm, la precipitación media es 278 mm y la temperatura media es 24°C (Domínguez, 2016).

La isla San Cristóbal se localiza al este del archipiélago (figura 3.1) y es la única que cuenta con fuentes permanentes de agua superficial, que se encuentran en el barlovento de la isla (Domínguez, 2016).

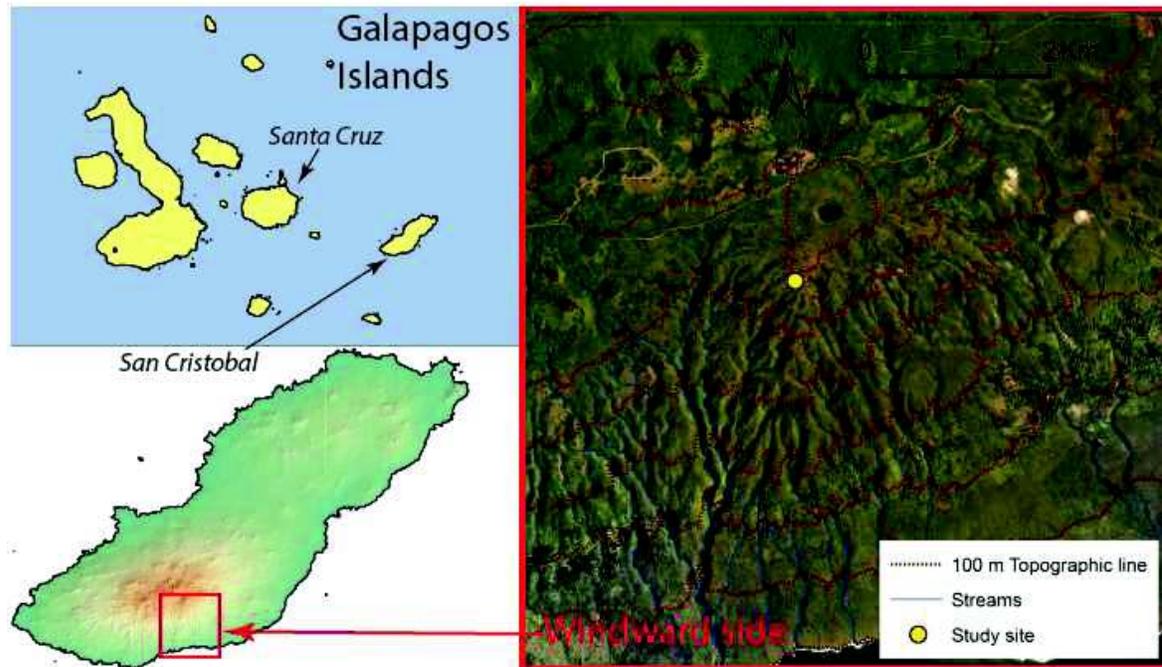
En la parte alta las pendientes suaves favorecen el encharcamiento de agua de precipitación, en la parte media la red de drenaje se encuentra bien desarrollada, y se observan riachuelos secos y otros que son alimentados por fuentes permanentes, y en la parte baja se producen pérdidas de agua por infiltración (d'Ozouville, 2007; Pryet, et al., 2012., Violette, 2014).

3.1.2 VEGETACIÓN DE LA PARTE ALTA DE SAN CRISTÓBAL Y ÁREA DE INVESTIGACIÓN

La zona de estudio se encuentra a 600 msnm en el sur del barlovento de San Cristóbal, está ubicada en la zona agrícola, que va desde la parte media de la isla hasta la cumbre (Domínguez, 2016). La parte alta está cubierta de helechos y bosque endémico de arbustos de *Miconia Robinsoniana*, que fue clasificado por Pryet et al. (2012) como bosque enano húmedo de baja elevación (figura 3.2). A

pesar de que el incremento de la actividad agrícola ha hecho que parte de este bosque sea reemplazado por pastos y bosque secundario, todavía existe una gran superficie de la vegetación original en la parte alta de la isla, por lo que el sitio de estudio es representativo del bosque endémico de *Miconia* (Domínguez, 2016).

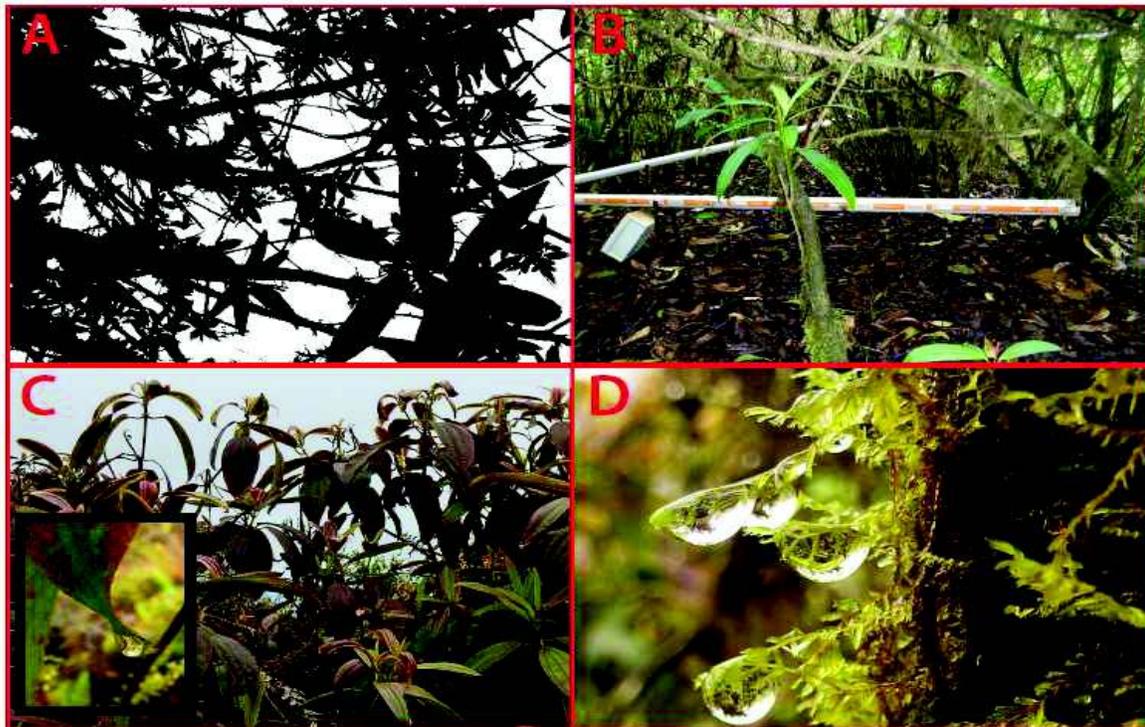
FIGURA 3.1 LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO USADA PARA EL MONITOREO CLIMÁTICO EN EL BARLOVENTO DE LA ISLA SAN CRISTÓBAL



Fuente: Domínguez (2016)

El sitio de estudio se caracteriza por estar cubierto de *Miconias*, aunque también se encuentran secciones dispersas de helechos. A pesar de que la altura de los arbustos de *Miconia* es homogénea, el diámetro de los tallos es diferente, así como la inclinación de las ramas, a las cuales se adhiere una gran cantidad de epífitas. Estos arbustos tienen ramificaciones que nacen desde el fondo de la planta y las hojas tienen forma elíptica alargada con bordes cónicos e inclinación hacia el suelo (Domínguez, 2016).

FIGURA 3.2 ARBUSTOS DE MICONIA EN LA ZONA DE ESTUDIO EN LA PARTE ALTA DEL BARLOVENTO DE LA ISLA SAN CRISTÓBAL: A) DOSEL, B) ÁNGULO DE LAS RAMAS, C) FORMA DE LAS HOJAS Y ORIENTACIÓN, D) OBSTRUCCIONES DE FLUJO: EPÍFITAS



Fuente: Domínguez (2016)

3.1.3 MONITOREO DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS

Las variables meteorológicas fueron medidas en la estación climática a 600 m de elevación (figura 3.3) con intervalos de 15 minutos. Esta estación tiene registros desde junio de 2013, con los años hidrológicos 2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016, y el período de estudio en los meses de junio y julio de 2016. Se registran datos de presión atmosférica, radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa, dirección del viento, velocidad del viento y precipitación; adicionalmente se mide la interceptación de neblina con un colector cilíndrico y dos colectores estándar (Domínguez, 2016).

La presión atmosférica se mide independientemente con un sensor de presión; la radiación solar, humedad relativa, temperatura del aire, dirección y velocidad del viento se miden a 2 m sobre la superficie del suelo; la precipitación es medida con

un pluviómetro a 1.5 m sobre la superficie del suelo (Domínguez, 2016). Finalmente, la interceptación de neblina se mide por medio de una red cilíndrica de 40 cm de alto y 12 cm de diámetro, la cual está construida con una malla plástica de 1 mm, y está posicionada a 2 m sobre la superficie del suelo (Domínguez, 2016); y mediante dos colectores de niebla estándar de 1 m², de malla de polietileno de 35% y 50% de coeficiente de sombra, colocados a 2 m sobre la superficie del suelo.

FIGURA 3.3 ESTACIÓN CLIMÁTICA A 600 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL



Elaboración: Echeverría Paola

En la Tabla 3.1 a continuación se mencionan las especificaciones de los instrumentos utilizados para las mediciones de los datos climáticos.

TABLA 3.1 EQUIPO DE LA ESTACIÓN CLIMÁTICA A 600 M DE ELEVACIÓN EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL

	Equipo	Marca	Modelo
Estación SC 600 Norte: - 0.901932 Este: -89.483088 Altura: 615 msnm	Registrador de datos (x2)	Campbell	CR1000
	Pluviómetro*	Texas	TE525MM
	Pluviómetro (x2)**	Précis Mécanique	R307A0
	Pluviómetro***	Campbell	ARG100
	Sensor de temperatura y humedad relativa	Campbell	CS215
	Anemómetro	Young	03002-5
	Piranómetro	Campbell	CS300
Sensor de presión	Schlumberger	Baro	

*Precipitación, ** Intercepción de Neblina (50-SFC y CFN), *** Intercepción de neblina (35-SFC)

Fuente: Domínguez (2016)

Elaboración: Echeverría Paola

3.2 CONSTRUCCIÓN DE UN COLECTOR ESTÁNDAR DE NIEBLA (SFC) EN SAN CRISTÓBAL

Se ha optado por la construcción de dos Colectores Estándar de Niebla (Standard Fog Collector SFC), con el mismo diseño pero diferentes mallas, los que han sido comparados entre sí con el fin de determinar cuál es el dispositivo más eficiente. Uno fue construido con malla de polietileno de 35% de coeficiente de sombra mientras que para el segundo atrapanieblas se utilizó una malla de polietileno de 50% de coeficiente de sombra.

Se ha utilizado polietileno como material para la superficie de intercepción porque es de bajo costo y de fácil acceso, ya que es usada para invernaderos y fines agrícolas.

Debido a la sensibilidad del ecosistema de Galápagos, no es posible introducir materiales orgánicos a las islas, por lo que se descartó la opción de realizar una estructura de madera o caña guadúa, y también debido a que los materiales tendrían que ser transportados desde el continente se descartó el uso de acero galvanizado para la construcción de los atrapanieblas, además de que los costos de construcción y transporte serían significativamente mayores.

Por lo mencionado anteriormente se utilizó tuberías PVC para la construcción de los dispositivos. La estructura de soporte de cada atrapanieblas se construyó con 3 tuberías PVC de 3", 2 codos de 3", 4 tee con reducción de 3" x 2", 2 uniones de 3"; para el marco de cada malla se utilizó una tubería de agua potable de 1/2", 4 codos cachimba curva MH de 1/2", 4 neplos 6 cm de 1/2", 4 tee de 1/2" y 4 uniones reductoras de 3/4" x 1/2". La canaleta de recolección se construyó con una tubería PVC de 6" con una longitud de 1.10 m.

Las mallas de ambos atrapanieblas son de polietileno de 35% y 50% respectivamente, éstas fueron cosidas al marco y tensadas con cuerda de nylon. El agua que se impregna en cada malla, se desplaza por gravedad hacia la canaleta de recolección que tiene un ángulo de inclinación y posteriormente pasa a un pluviómetro modificado en donde se registra la cantidad de neblina interceptada cada 15 minutos.

FIGURA 3.4 A) SUPERFICIE COLECTORA DE NEBLINA, B) ACCESORIOS PVC, C Y D) COLECTORES ESTÁNDAR DE NEBLINA INSTALADOS EN LA ESTACIÓN CLIMÁTICA A 600 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL



Elaboración: Echeverría Paola

3.3 CARACTERIZACIÓN METEOROLÓGICA

Se examinaron los patrones de variación temporal de la precipitación, temperatura, radiación solar, velocidad del viento, dirección del viento, humedad relativa e intercepción de neblina, a nivel diario, mensual, anual, estacional, y en el período de estudio, en el barlovento de la isla San Cristóbal a 300 msnm y 600 msnm, a partir de la información obtenida con las estaciones climáticas del proyecto GIIWS, mediante el análisis estadístico que se describe a continuación. Esto se realizó con el fin de determinar la relación que existe entre el período de estudio y los demás años hidrológicos, además del comportamiento de las variables y cómo puede influir en el proceso de captura de neblina.

3.3.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Con el fin de examinar las variables climáticas registradas en la estación y su influencia en el proceso de captura de neblina se han utilizado varias herramientas estadísticas, las mismas que se describen a continuación.

3.3.1.1 Boxplot

Un boxplot es un diagrama en el que se presentan cinco cuartiles: “el mínimo, $x_{(1)}$, el cuartil más bajo, $q_{0.25}$, la mediana, $q_{0.50}$, el cuartil más alto, $q_{0.75}$, y el máximo, $x_{(n)}$ ” (Wilks, 2011). Este tipo de gráfico brinda información sobre la distribución de los datos (Wilks, 2011).

Los cuartiles son valores que dividen una serie de datos en cuatro partes iguales, cada una de éstas contiene el 25% de los datos (Galindo, 2006).

3.3.1.2 Correlación

Es la medida de asociación entre dos variables, indica la proporción y la dirección de la relación lineal que existe entre éstas (Wilks, 2011).

3.3.1.3 Coeficiente de correlación

Es una medida de la relación lineal que existe entre dos variables. Se la expresa como la relación entre la covarianza de la muestra de las dos variables y el producto de la desviación estándar de cada variable (Wilks, 2011).

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2}} \quad (3.1)$$

Este coeficiente varía entre -1 y 1, es decir $-1 \leq r_{xy} \leq 1$. El cuadrado del coeficiente de correlación, es decir, r_{xy}^2 , determina la variabilidad de una de las dos variables que está descrita por la otra (Wilks, 2011).

3.3.2 REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

La regresión lineal múltiple se caracteriza por tener una sola variable dependiente o predicando y varias variables independientes o predictores, en este caso, los predictores son las variables climáticas.

La expresión matemática para este tipo de análisis se define de la siguiente manera (Wilks, 2011):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \quad (3.2)$$

En la ecuación se incluye la constante de regresión o intercepto b_0 , y cada predictor tiene su coeficiente de regresión b , éstos son llamados parámetros de regresión (Wilks, 2011).

3.3.3 ANÁLISIS DE CUANTÍA

Determina la importancia relativa de cada una de las variables climáticas en la recolección de neblina, este análisis se realizó a partir de una modificación de la metodología dada por (Sicart et al., 2008):

$$r(x_i, Fog) = \sum_i \frac{\sigma_{xi}}{\sigma_{Fog}} r(x_i) \quad (3.3)$$

donde:

σ_{xi} : Desviación estándar de la variable climática

σ_{Fog} : Desviación estándar de la niebla

$r(x_i)$: Coeficiente de regresión de la variable climática

3.4 MODELO DE SEPARACIÓN DE LLUVIA Y NIEBLA

El agua colectada por las tres redes de neblina comprende una porción de lluvia y otra de neblina; para poder determinar la cantidad correcta de neblina es necesario realizar la separación de estos componentes. Holwerda et al., (2006) utilizó una metodología para realizar esta separación que consiste en un modelo trigonométrico, en el que se determina el ángulo de inclinación de la lluvia para cada intervalo de tiempo, a partir de la intensidad de la lluvia, el diámetro de la gota, la velocidad de caída de la gota y la velocidad del viento (Holwerda et al., 2006).

Domínguez et al. (2017) utilizó la metodología de Holwerda et al. (2006) para separar la neblina de la precipitación en un colector cilíndrico, determinando el valor real de precipitación obtenida con un pluviómetro normal. Por medio del ángulo de caída de la gota, el área del colector de neblina y el valor real de precipitación, es posible obtener el volumen de precipitación captado por el dispositivo de recolección, y finalmente, por último se calcula el volumen de neblina, que corresponde a la diferencia del volumen medido en el pluviómetro y el volumen de la precipitación.

Domínguez et al. (2017) realizó una corrección del volumen de precipitación captado por el colector cilíndrico de neblina basada en eventos de precipitación sin neblina; dado que en el período de estudio se considera que la neblina es

permanente, esta corrección no se desarrolló; sin embargo, se aplicaron algunos factores en varios cálculos del modelo.

El modelo trigonométrico se describe a continuación:

La intensidad de la lluvia (mm/h) se obtiene a partir de los milímetros de precipitación en intervalos de 15 minutos.

El diámetro de la gota se obtiene a partir de la siguiente expresión (Domínguez et al., 2017; Holwerda et al., 2006; Laws & Parsons, 1943):

$$D = 2.23(0.03937R)^{0.102} \quad (3.4)$$

donde:

D = Diámetro de la gota (mm)

R = Intensidad de la lluvia (mm/h)

La velocidad de caída de la gota V (m/s) se obtiene a partir del diámetro D (mm) según la ecuación (Domínguez et al., 2017; Gunn & Kinzer, 1949; Holwerda et al., 2006):

$$V = 3.378 \ln(D) + 4.213 \quad (3.5)$$

La lluvia cae con un ángulo de inclinación debido a la influencia del viento, este ángulo se calcula por medio de:

$$\tan(b) = \frac{U}{V} \quad (3.6)$$

Donde b es el ángulo de inclinación de la lluvia y U es la velocidad del viento en cada intervalo (m/s) (Domínguez et al., 2017; Herwitz & Slye, 1995; Holwerda et al., 2006).

Una vez obtenido el ángulo es posible calcular la lluvia real para cada intervalo con las mediciones de lluvia registradas por el pluviómetro (Domínguez et al., 2017).

$$RF_{\alpha} = \frac{RF_v}{\cos(b)} \quad (3.7)$$

En la ecuación anterior, RF_{α} corresponde a la lluvia real y RF_v corresponde al volumen de agua medido en el pluviómetro (Domínguez et al., 2017).

La lluvia real también se puede determinar dividiendo el volumen de lluvia medida para la proyección de la superficie horizontal perpendicular a la dirección de la lluvia, tanto para los colectores estándar como para el colector cilíndrico (Domínguez et al., 2017).

El volumen de la lluvia real en el colector se obtiene mediante:

$$VF_r = RF_{\alpha} * S_g \quad (3.8)$$

donde VF_r representa el volumen de lluvia recolectado por el dispositivo y S_g es la proyección del área del colector perpendicular a la dirección de la lluvia real RF_{α} (Domínguez et al., 2017).

La altura de neblina captada por las tres redes se determina según:

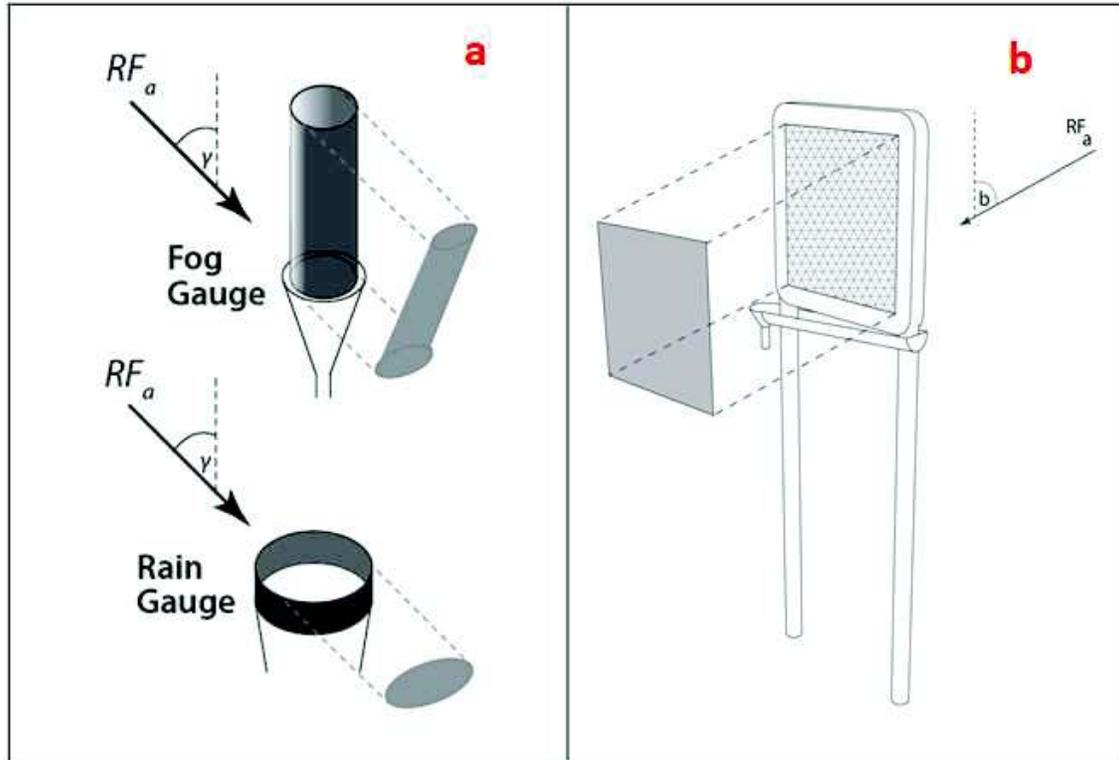
$$F = \frac{(VF_T - VF_r)}{A_c} \quad (3.9)$$

En la ecuación, la altura de neblina F se encuentra en mm, VF_T corresponde al volumen total de agua registrado por el pluviómetro conectado a la red de neblina, y A_c es el área del colector de neblina (Domínguez et al., 2017).

Se evaluó el potencial de neblina con los factores de corrección de 1.0, 1.1, 1.2 y 1.3, los cuales se obtuvieron comparando los volúmenes de agua del colector

cilíndrico y los volúmenes obtenidos por el pluviómetro, según Domínguez et al. (2017), y se determinó que la variación es mínima, por lo cual se ha utilizado el factor de 1.0 para los cálculos en los tres colectores.

FIGURA 3.5 VARIACIÓN EN LA SUPERFICIE DE INCIDENCIA DE LA LLUVIA CON RESPECTO A SU INCLINACIÓN A) COLECTOR CILÍNDRICO Y B) COLECTORES ESTÁNDAR DE NEBLINA



Fuente: Domínguez (2016)

3.5 ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA EN LA ZONA RURAL DE LA ISLA SAN CRISTÓBAL

Con el fin de estimar la demanda de agua se delimitó la zona rural a la cual se pretende beneficiar (figura 3.6), a partir del Catastro Predial Rural de la Isla San Cristóbal (2016), proporcionado por el Municipio de San Cristóbal y un Modelo Digital de Elevación (DEM) obtenido del Instituto Geográfico Militar (2014).

En San Cristóbal, el 99.6% de la demanda total de agua corresponde a la actividad agrícola, el 0.3% a consumo doméstico, y el 0.07% a ganadería (Echeverría et al., 2017).

FIGURA 3.6 ZONA DE ESTUDIO DE LA DEMANDA DE AGUA EN SAN CRISTÓBAL



Elaboración: Echeverría Paola

3.6 AGUA SUPERFICIAL

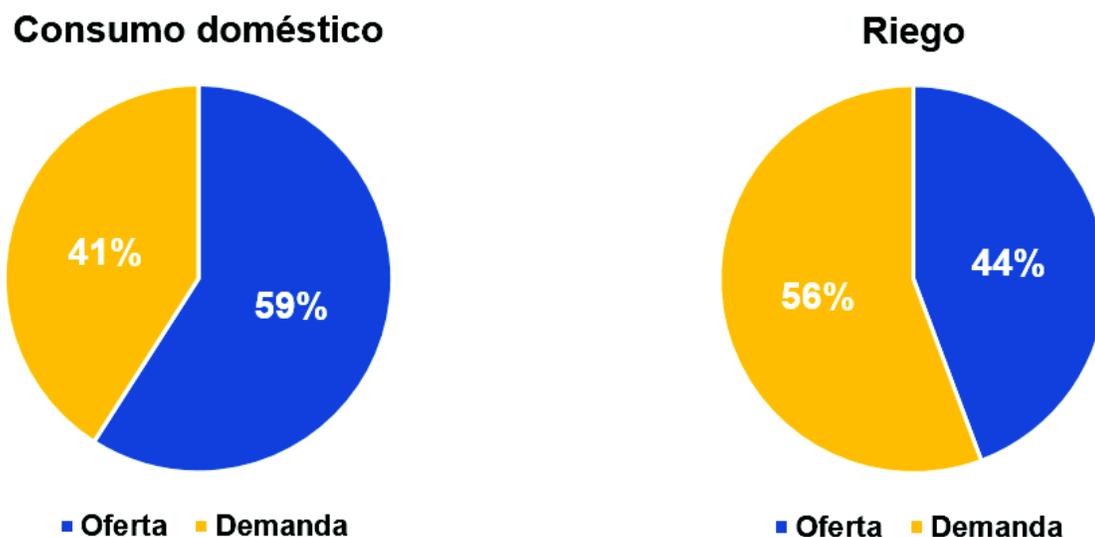
3.6.1 CAPACIDAD DE SUMINISTRO DE AGUA

La isla San Cristóbal es la única del archipiélago que posee fuentes superficiales de agua; la capacidad total de suministro de agua es de 105 L/s según CISPDR (2015). El agua de Cerro Gato y Los Americanos está destinada principalmente para consumo doméstico con 43 L/s, mientras que Plátano, Policía, La Honda y El Chino se destinan a riego con 62 L/s (CISPDR, 2015).

3.6.2 SUMINISTRO DE AGUA

En San Cristóbal, la capacidad de suministro de las fuentes de agua al 2010 es de 49 L/s, la oferta de agua para consumo doméstico es de 23 L/s. La demanda de agua para uso doméstico es de 15.94 L/s, por lo tanto, el suministro existente es de 15.94 L/s (figura 3.7) (CISPDR, 2015).

FIGURA 3.7 OFERTA Y DEMANDA DE AGUA EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL



Elaboración: Echeverría Paola

En Galápagos existen 755 Unidades de Producción Agropecuaria (UPA), en Santa Cruz se encuentran la mayoría, con un porcentaje de 47%, en San Cristóbal el 34%, el 17% en Isabela y el 2% en Floreana (CGREG, 2014).

La superficie agrícola de Galápagos es de 19,010 hectáreas, los cultivos permanentes solos son los que predominan en el uso del suelo de las islas y cada vez más UPA están practicando este modo de cultivo. El café es el principal monocultivo de Galápagos y corresponde al 73.5% de los cultivos permanentes solos en el archipiélago (CGREG, 2014).

Por otra parte, San Cristóbal cuenta con una superficie agrícola de 5,577 hectáreas, la mayoría de sus plantaciones son cultivos permanentes solos y el café corresponde al 89.9% de los cultivos de ellos (CGREG, 2014).

La demanda anual de agua de riego calculada en San Cristóbal es de 2.22 hm³, la capacidad de suministro es de 56 L/s, es decir 1.77 hm³ al año, el suministro es menor que la demanda, por lo tanto, existe escasez de agua en la isla para la actividad agropecuaria (figura 3.7) (CISPDR, 2015).

3.7 DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA EN LA ZONA RURAL

3.7.1 DEMANDA DE USO DOMÉSTICO

La demanda se calcula con el método de cuotas para los habitantes de la zona rural de San Cristóbal (ec. 3.10), como se propone en La Planificación de Los Recursos Hídricos de las Islas Galápagos (CISPDR, 2015).

Según un estudio de sitio, la cuota de agua doméstica en la zona rural de Galápagos es de 70 L/hab/día. Se toma el valor de 0.7 como coeficiente de utilización de agua (CISPDR, 2015).

La demanda de agua para consumo doméstico rural en San Cristóbal se calculó de acuerdo al método de cuotas, según la siguiente expresión (CISPDR, 2015):

$$W_i = \frac{P_r * Q_r}{n_r} \quad (3.10)$$

donde:

W_i es la demanda de agua doméstica de los habitantes

P_r es la población rural (hab)

Q_r es la cuota de agua para uso doméstico en la zona rural (L/hab/día)

n_r es el coeficiente de utilización de agua en la zona rural

En esta investigación además se planteó como escenario que en cada finca habita una familia de 4 personas, que es el tamaño de hogar promedio en el área rural según INEC (2012); en la isla existen 798 fincas, de acuerdo a la información

de los predios catastrales del año 2016 proporcionada por el Municipio de San Cristóbal, y tomando como criterio de restricción que el área mínima de una finca es 800 m². Con estos datos y la ecuación 3.10 se calculó la cantidad de agua requerida para satisfacer las necesidades de una finca en la zona rural de San Cristóbal.

3.7.2 DEMANDA DE AGUA PARA GANADERÍA

El ganado se divide en ganado menor y mayor. En San Cristóbal el ganado menor comprende 1462 cabezas de ganado bovino, 1217 de ganado porcino, 49 de ganado caprino, 54 cuyes, 7867 aves de corral, 21 pavos y 328 patos (CGREG, 2014).

EL ganado mayor en la isla está compuesto por 195 cabezas de ganado vacuno, 65 de ganado asnal, 211 de ganado caballo y 15 de ganado mular (CGREG, 2014).

Según La Planificación de los Recursos Hídricos de las Islas Galápagos, con base en el Manual Técnico de Procedimiento para la Elaboración de Informes Técnicos de Sustentación para las Resoluciones de Autorización del Derecho de Uso y Aprovechamiento del Agua, 2012.10, se adopta una cuota de agua para el ganado mayor de 35 L/cab/día y para el ganado menor de 15 L/cab/día para los animales más grandes y 0.15 L/cab/día para los más pequeños como aves (CISPDR, 2015).

El agua consumida por la ganadería generalmente proviene de la red de suministro de las zonas rurales, por lo que tiene el mismo coeficiente de utilización la demanda de consumo doméstico.

La demanda de agua para ganadería se calculó por el método de cuotas a partir de la siguiente ecuación (CISPDR, 2015):

$$W_g = \frac{P_g Q_g + P_g Q_g}{n_c} \quad (3.11)$$

donde,

W es la demanda de agua de la ganadería (L)

P_g y P_p es el número de ganado mayor y menor, respectivamente

Q_g y Q_p es la cuota de agua del ganado mayor y menor, respectivamente (L/cab/día).

n_c es el coeficiente de utilización del agua en la zona rural

TABLA 3.2 CLASIFICACIÓN DEL GANADO EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL

Clasificación	Cuota de agua	Animal	Número
Ganado menor	0,15 L/cab/día	Cuyes	54
		Aves de corral	7867
		Pavos	21
		Patos	328
Ganado menor	15 L/cab/día	Bovino	1462
		Porcino	1217
		Caprino	49
Ganado mayor	35 L/cab/día	Vacuno	195
		Asnal	65
		Caballar	211
		Mular	15

Elaboración: Echeverría Paola

Adicional a esto se calculó la demanda de agua en cada finca (W_{gf}) a partir de la demanda de agua de ganadería (W_g), la elevación de la finca (y), su área (A_f) y su porcentaje con respecto al área total de los predios de la zona rural (X_{Af}). El proceso es el siguiente:

Cálculo del porcentaje de área de cada finca con respecto al total:

$$X_{Af} = \frac{A_f * 100}{A_T} \quad (3.12)$$

donde,

A_T es el área total de los predios en la zona rural de San Cristóbal

$$W_{gf} = X_{Af} * W_g \quad (3.13)$$

3.7.3 DEMANDA DE USO AGRÍCOLA

Se realizó un balance hidrológico para calcular la demanda de riego.

$$Q_s = P - ET_p * K_c \quad (3.14)$$

donde,

Q_s es el agua disponible

P es la precipitación

ET_p es la evapotranspiración potencial del cultivo de referencia propuesto por FAO (2006) (referencia);

K_c es el coeficiente de cultivo

Con el fin de determinar la cantidad de agua requerida para la actividad agrícola se realizó un balance hidrológico a partir de la precipitación y la evapotranspiración potencial, incluyendo el coeficiente de cultivo del café, que es el cultivo predominante en las islas (74% del total de cultivos permanentes solos), se planteó un escenario para un año promedio, correspondiente al año 2013-2014, y otro escenario para un año seco, el cual fue estimado a partir de registros históricos, utilizando un factor obtenido con los datos del primer decil de la precipitación más baja; éstos fueron comparados y se propuso un sistema para satisfacer las necesidades de agua.

3.7.3.1 Balance hidrológico

El balance hidrológico se realizó para cada finca, a nivel anual y mensual, tomando en cuenta los datos del año promedio y el año seco. El balance se desarrolló a partir de los gradientes orográficos de la precipitación (P), la evapotranspiración (ETP) y la intercepción de neblina (CWI), que se obtienen de los datos de estas variables registrados en la estación a 300 m y 600 m en San Cristóbal; el proceso se describe en la figura 3.8, y se aplica para ambos años.

El balance consiste en determinar la cantidad de precipitación y evapotranspiración en cada mes del año, desde junio de 2013 hasta mayo de 2014, utilizando los gradientes orográficos respectivos y la elevación de cada finca; una vez que se obtienen estos valores se determina la disponibilidad o déficit de agua para todo el año mediante la ecuación 3.14 y también para cada mes. La neblina mensual y anual también se calcula con el gradiente orográfico y la elevación de cada finca, no obstante, esta variable se considera para satisfacer el déficit de agua que exista luego de aplicar la ecuación 3.14.

3.7.3.2 Coeficiente único de cultivo

El coeficiente único de cultivo K_c se refiere a los efectos de la transpiración de un cultivo y la evaporación del suelo en el tiempo, tomando en cuenta las características del cultivo (FAO, 2006).

Se siguió la metodología propuesta por la FAO (2006) para la estimación del coeficiente de cultivo en etapa media de temporada $K_{c\ med}$, misma que fue ajustada de acuerdo a las condiciones de humedad relativa y velocidad del viento de San Cristóbal.

Se corrigió la humedad relativa HR_{min} según la fórmula:

$$K_{c\ med} = K_{c\ med\ (Cua)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(HR_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (3.15)$$

donde:

$K_{c\ msd\ (CuA)}$ es el valor de $K_{c\ msd}$ obtenido por FAO (2006)

u_2 es el valor medio diario de la velocidad del viento a 2 m de altura sobre pasto para la etapa de mediados de temporada (m/s), con $1\ \text{m/s} \leq u_2 \leq 6\ \text{m/s}$

HR_{min} es el valor medio diario de humedad relativa mínima durante la etapa de mediados de temporada (%), para $20\% \leq HR_{min} \leq 80\%$,

h es la altura media de las plantas durante la etapa de mediados de temporada (m) para $0.1\ \text{m} < h < 10\ \text{m}$.

El valor de HR_{min} se calcula mediante:

$$HR_{min} = \frac{e^{\circ}(T_{min})}{e^{\circ}(T_{max})} 100 \quad (3.16)$$

Tomando en cuenta que en condiciones normales:

- La temperatura mínima T_{min} se aproxima a la temperatura de rocío $T_{rocío}$, donde la humedad relativa máxima HR_{max} es aproximadamente 100%.
- El valor del déficit de presión de vapor (presión de vapor de saturación menos presión de vapor real) es $[(100 - HR_{min})/200]e^{\circ}(T_{max})$, donde $e^{\circ}(T_{max})$ es la presión de vapor de saturación a temperatura máxima diaria del aire.

3.7.3.3 Determinación del déficit de agua

Luego de realizar el balance hidrológico se obtiene la cantidad de agua disponible o faltante de precipitación y neblina, en cada mes, y por ende, en todo el año.

El déficit de agua en San Cristóbal se analizó por franjas de elevación, cada una de 100 m, en donde se determinó cuáles son los meses más secos y también las elevaciones más carentes del recurso.

Una vez identificadas estas zonas se calcula el área y número de colectores que podrían cubrir el 25% del déficit de agua para agricultura en el año promedio, y el 15% en el año seco. Estos porcentajes se establecieron a modo de experimentación, con el fin de observar la capacidad para satisfacer el déficit hídrico y la factibilidad de su instalación a gran escala respecto al área de las fincas y la Isla (figura 3.9).

DEMANDA DE AGUA PARA OTROS USOS

Otros usos del agua pueden ser considerados dentro de la explotación de las minas y canteras, la industria de manufactura, el suministro de electricidad y la industria de la construcción. En Galápagos, el porcentaje de consumo de agua de dichas actividades es despreciable en comparación con el consumo doméstico y el uso de agua en la agricultura. Por lo tanto, el agua utilizada para estas actividades no se considera en el cálculo de la demanda.

RESUMEN

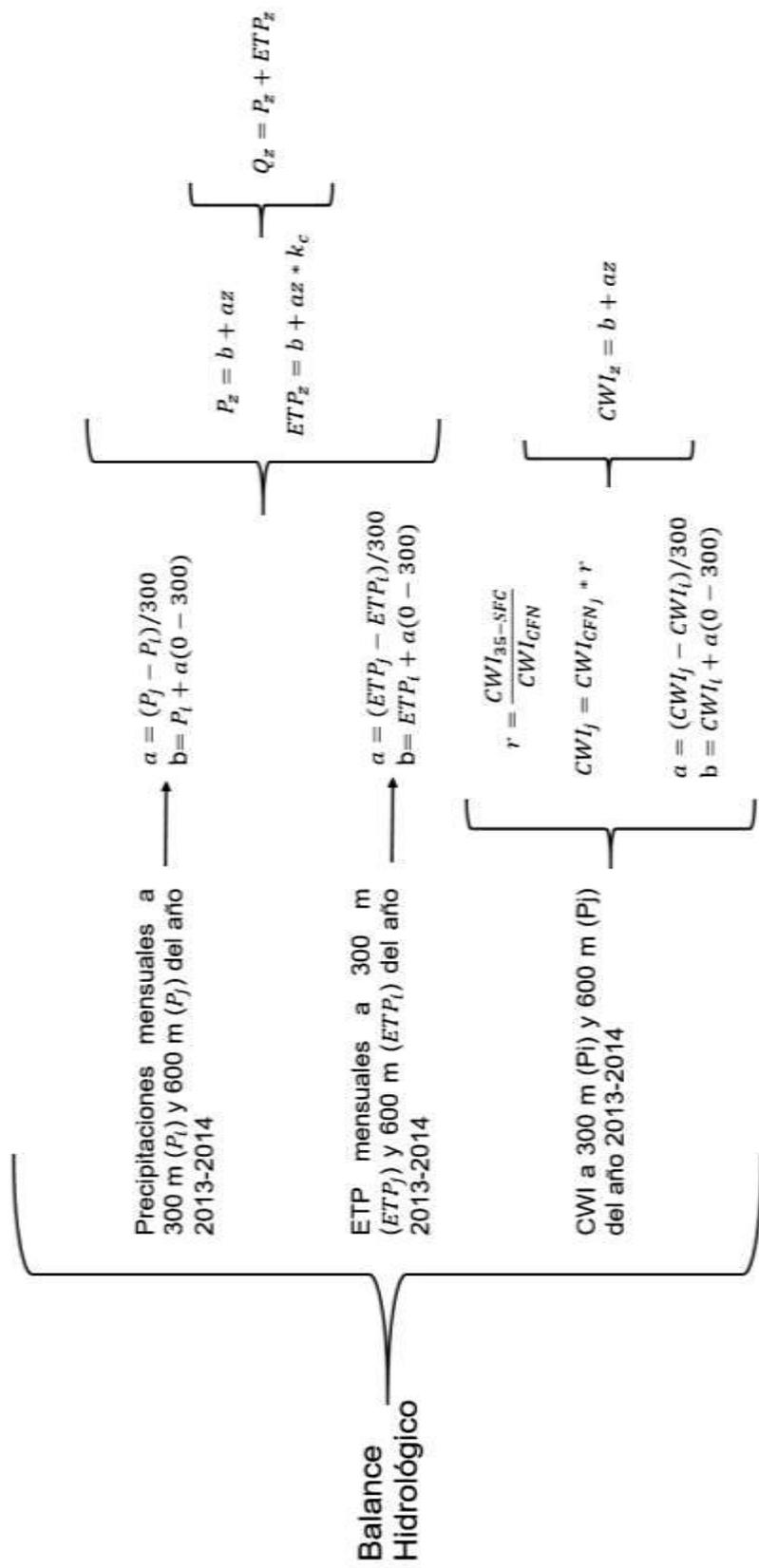
El sitio de estudio se encuentra de la zona agrícola de San Cristóbal, por lo que es un lugar representativo para esta investigación. A partir de la información obtenida en la estación climática a 600 msnm y el análisis estadístico, se identificaron los patrones de variación temporal de las variables climáticas y su comportamiento, además del porcentaje de contribución que tiene cada variable en el proceso de captura de neblina.

Luego de aplicar el modelo de separación de lluvia y de neblina se observó que la cantidad de neblina recolectada es significativa y que puede ser utilizada en beneficio de la población.

En el cálculo de la demanda de agua en la zona rural de la isla se evidenció que el sector agrícola corresponde al 99.6% de la demanda total, y que el café es el

cultivo predominante en las islas, siendo el 74% de todos los cultivos permanentes solos de Galápagos. También se determinó que sí existe un déficit considerable de agua, principalmente para la actividad agrícola, y que un porcentaje de éste puede ser satisfactoriamente cubierto con el uso de estos dispositivos.

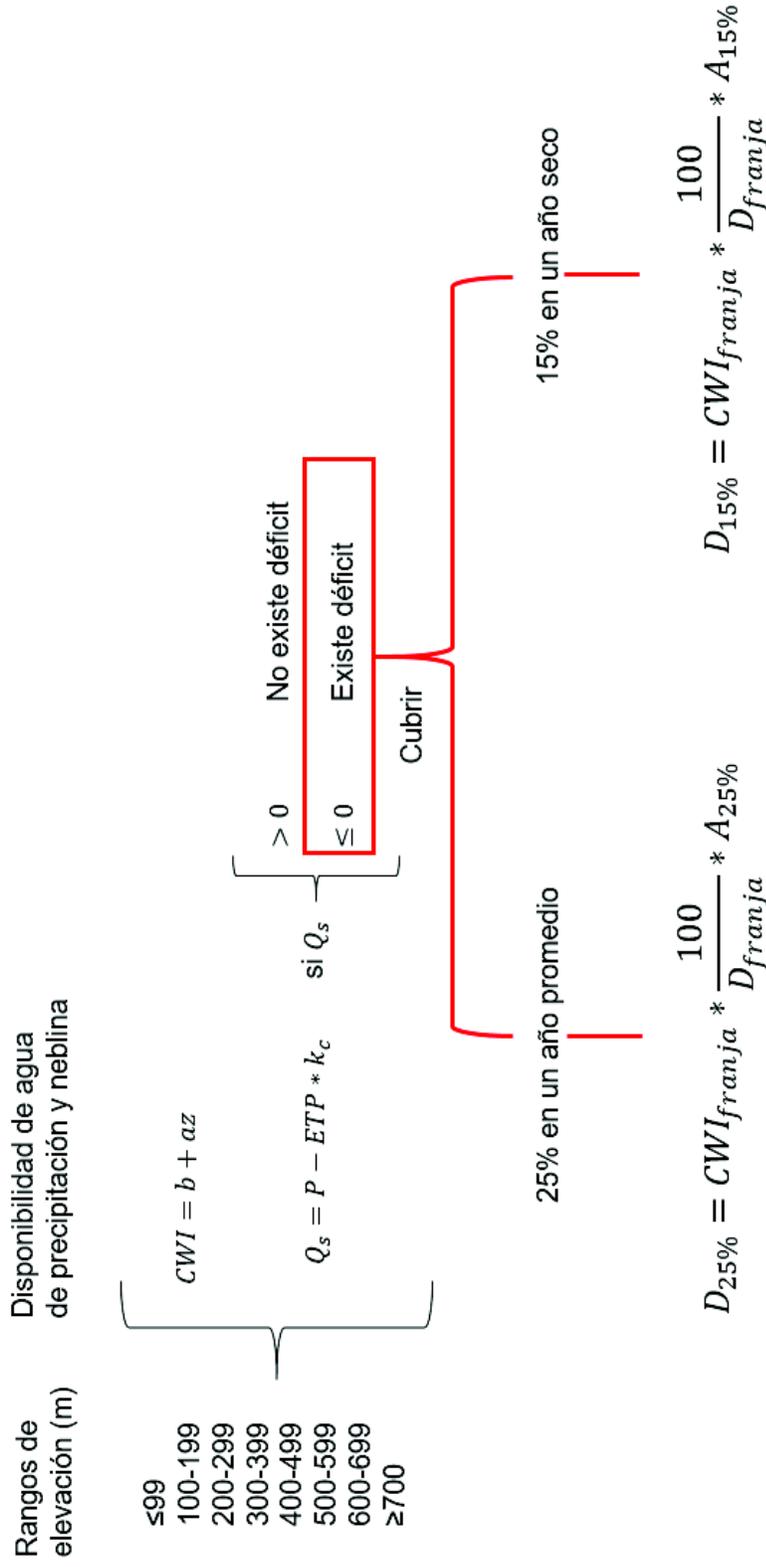
FIGURA 3.8 PROCESO DE REALIZACIÓN DEL BALANCE HIDROLÓGICO



z es la elevación de cada finca, k_c es el coeficiente único de cultivo, CWI_{35-SFC} es la intercepción de neblina en el periodo de estudio con 35-SFC, CWI_{cfn} es la intercepción de neblina con la red cilíndrica en el año promedio, r factor de corrección

Elaboración: Echeverría Paola

FIGURA 3.9 CÁLCULO DEL DÉFICIT DE AGUA POR RANGOS DE ELEVACIÓN



Elaboración: Echeverría Paola

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

INTRODUCCIÓN

Este proyecto de investigación se realizó con la finalidad de proponer una alternativa viable frente a la falta de agua en Galápagos y mejorar la calidad de vida de la población y las actividades productivas.

En este capítulo se explican los resultados obtenidos de la investigación en las secciones previas. Las condiciones climáticas se analizaron con información de tres años hidrológicos (2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016) y fueron comparadas con el período de estudio. Se evaluó el comportamiento de estas variables y se determinó la relación que existe entre ellas. Se comparó la cantidad de neblina obtenida en San Cristóbal con otros sitios y se determinaron los factores que pueden influir en estos resultados. Se muestran los sectores con mayor necesidad de agua en la zona rural y el sistema de colectores respectivo que podría satisfacer el 25% del déficit en un año promedio y el 15% en un año seco.

4.1 RESULTADOS

4.1.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS

Durante los 48 días de investigación en la época de garúa, entre los meses de junio y julio de 2016, se obtuvo que la temperatura promedio fue 18.2°C, la velocidad del viento promedio fue 2.5 m/s y la dirección del viento más frecuente fue 200.6°. La precipitación neta alcanzó los 72 mm.

4.1.2 CARACTERIZACIÓN METEOROLÓGICA

4.1.2.1 Descripción de la precipitación y la temperatura en la isla Santa Cruz y la isla San Cristóbal en los tres años hidrológicos y el período de estudio

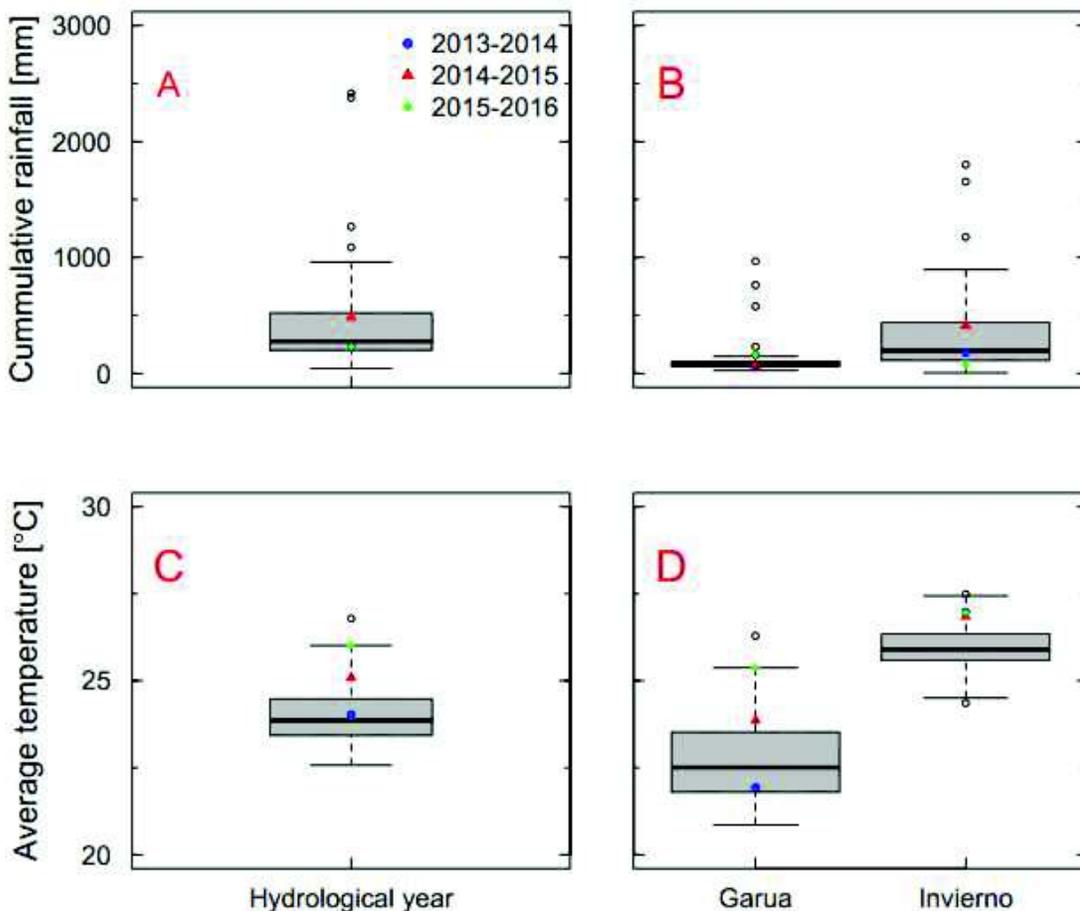
La precipitación se analizó para tres años hidrológicos (2013-2014, 2014-2015, 2015-2016) para Santa Cruz y San Cristóbal, al igual que la temperatura promedio.

En cuanto a la precipitación en Santa Cruz (figura 4.1), medida en la estación climática operada por la Fundación Charles Darwin a 6 m de elevación, los años hidrológicos 2013-2014 y 2015-2016 se encuentran entre el primer y segundo cuartil, y los valores de precipitación se encuentra entre 200 mm y 250 mm, aproximadamente; mientras que el año 2014-2015 sobrepasa la mediana o segundo cuartil, que es donde se concentra el 50% de los datos; en este año el 75% de los datos de precipitación se encuentran entre 250 mm y 500 mm, la precipitación representativa corresponde a 500 mm aproximadamente. En la estación de garúa la precipitación es muy baja, sin embargo, es mayor en el año 2015-2016, ubicándose en el extremo más alto, correspondiente a 200 mm aproximadamente, y los años 2013-2014 y 2014-2015 no sobrepasan los 100 mm. En la temporada de invierno la precipitación excede los 400 mm en el año 2014-2015, el año 2013-2014 se ubica en la mediana con 200 mm aproximadamente, y el año 2015-2016 es el más seco, con alrededor de 100 mm.

La temperatura promedio anual (figura 4.1) es mayor en el año 2015-2016, con un valor atípico de 26°C aproximadamente, el año 2014-2015 también presenta una alta temperatura promedio cercana a 25°C, y el año 2013-2014 se ubica por encima de la mediana, con 24°C aproximadamente. Esta misma tendencia se observa en la temporada de garúa, donde la temperatura es 25.5°C en el 2015-2016, 24°C en el 2014-2015 y 22°C en el 2013-2014. En invierno, la temperatura en los tres años es similar, presentando un valor alto de 26.5°C, aproximadamente.

La precipitación en San Cristóbal (figura 4.2) en los tres años hidrológicos se encuentra en el primer cuartil, es decir que los datos se concentran en 200 mm, aproximadamente. En la época de garúa, la precipitación de estos años se ubica en valores cercanos, de 50 mm aproximadamente; en la época de invierno, la precipitación es mayor en el año 2015-2016, los datos se concentran alrededor de 100 mm, cerca de la mediana; mientras que en los otros dos años hidrológicos la precipitación es menor y se ubica en el primer cuartil con 70 mm, aproximadamente.

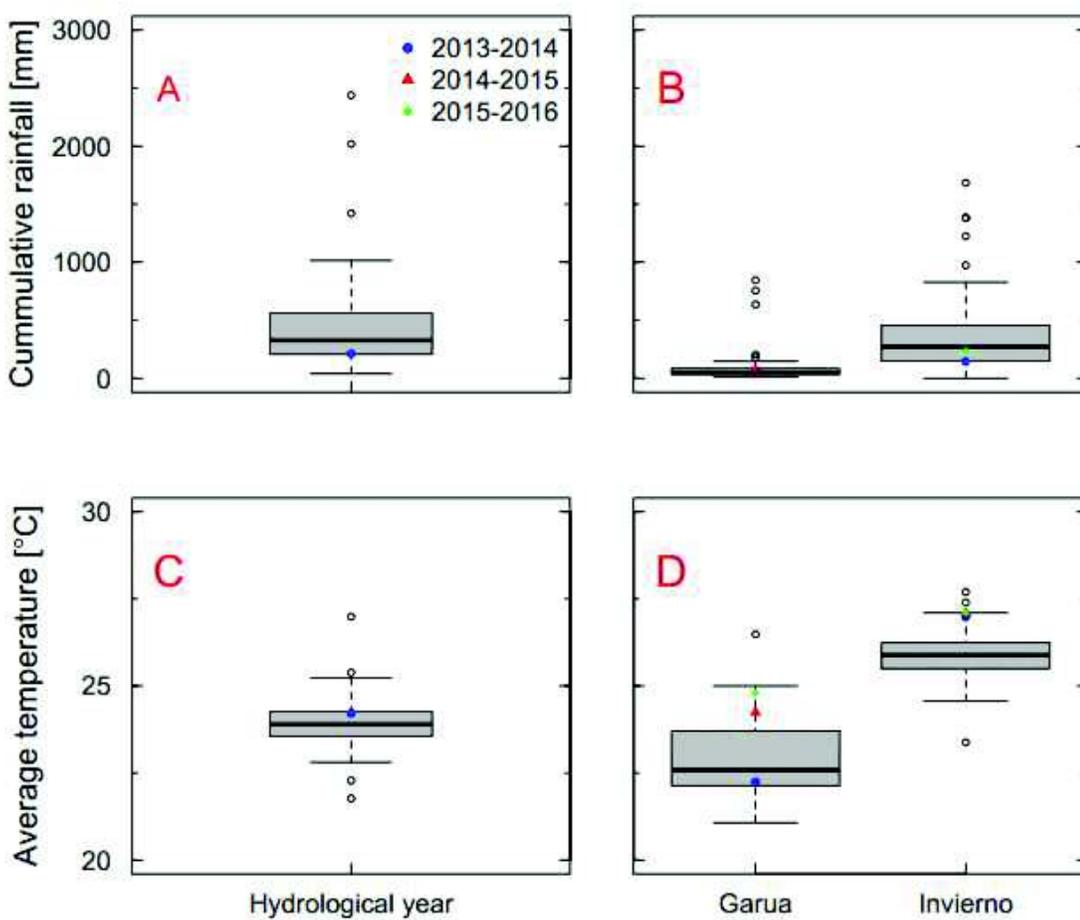
FIGURA 4.1 PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA DE LA ISLA SANTA CRUZ, A) PRECIPITACIÓN ANUAL, B) PRECIPITACIÓN POR TEMPORADA, C) TEMPERATURA ANUAL, D) TEMPERATURA POR TEMPORADA



Elaboración: Domínguez Christian

La temperatura promedio (figura 4.2) de los tres años hidrológicos se encuentra en el tercer cuartil con un valor cercano a 24°C. En la temporada de garúa la temperatura sí varía, y es mayor en el año 2015-2016, encontrándose en el extremo de la distribución de datos, con un valor aproximado de 24.5°C, seguido del año 2014-2015, cuya temperatura está por encima del tercer cuartil y es de 24°C aproximadamente. El primer año hidrológico presenta una baja temperatura, ubicada en el primer cuartil de los datos y corresponde a 22°C aproximadamente. En invierno, la temperatura es alta y muy similar en los tres años, cerca de 27°C (figura 4.2).

FIGURA 4.2 PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA DE LA ISLA SAN CRISTÓBAL, A) PRECIPITACIÓN ANUAL, B) PRECIPITACIÓN POR TEMPORADA, C) TEMPERATURA ANUAL, D) TEMPERATURA POR TEMPORADA

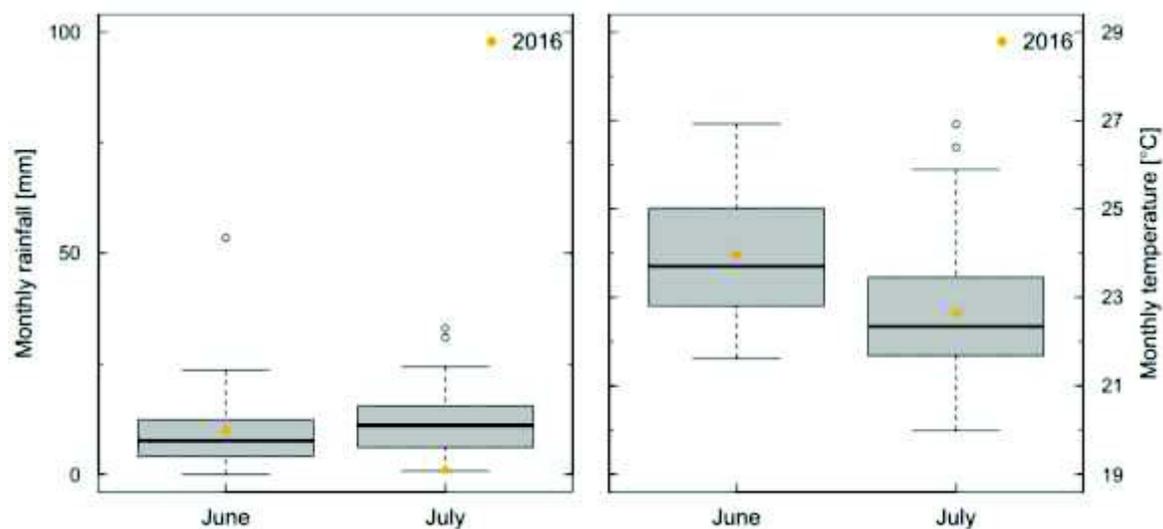


Elaboración: Domínguez Christian

En el período de estudio entre junio y julio de 2016, los datos obtenidos a 600 m de elevación, de la distribución de precipitación mensual son ligeramente más altos en el mes de julio, y tienen una mediana correspondiente a 12.5 mm, aproximadamente; sin embargo, la mayoría de datos indican que no ha habido gran precipitación. En el mes de junio, los valores de precipitación exceden la mediana que es de 8 mm, y se concentran en 11 mm (figura 4.3).

La temperatura a 600 m, es alta en junio y mayor que en el mes de julio, y la temperatura más frecuente es 24°C. En el último mes de estudio la temperatura disminuye, y el valor más frecuente es de 22.5 °C (figura 4.3).

FIGURA 4.3 PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN EL PERÍODO DE ESTUDIO EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL



Elaboración: Domínguez Christian

4.1.2.2 Variabilidad diaria de las variables climáticas a 300 msnm y 600 msnm

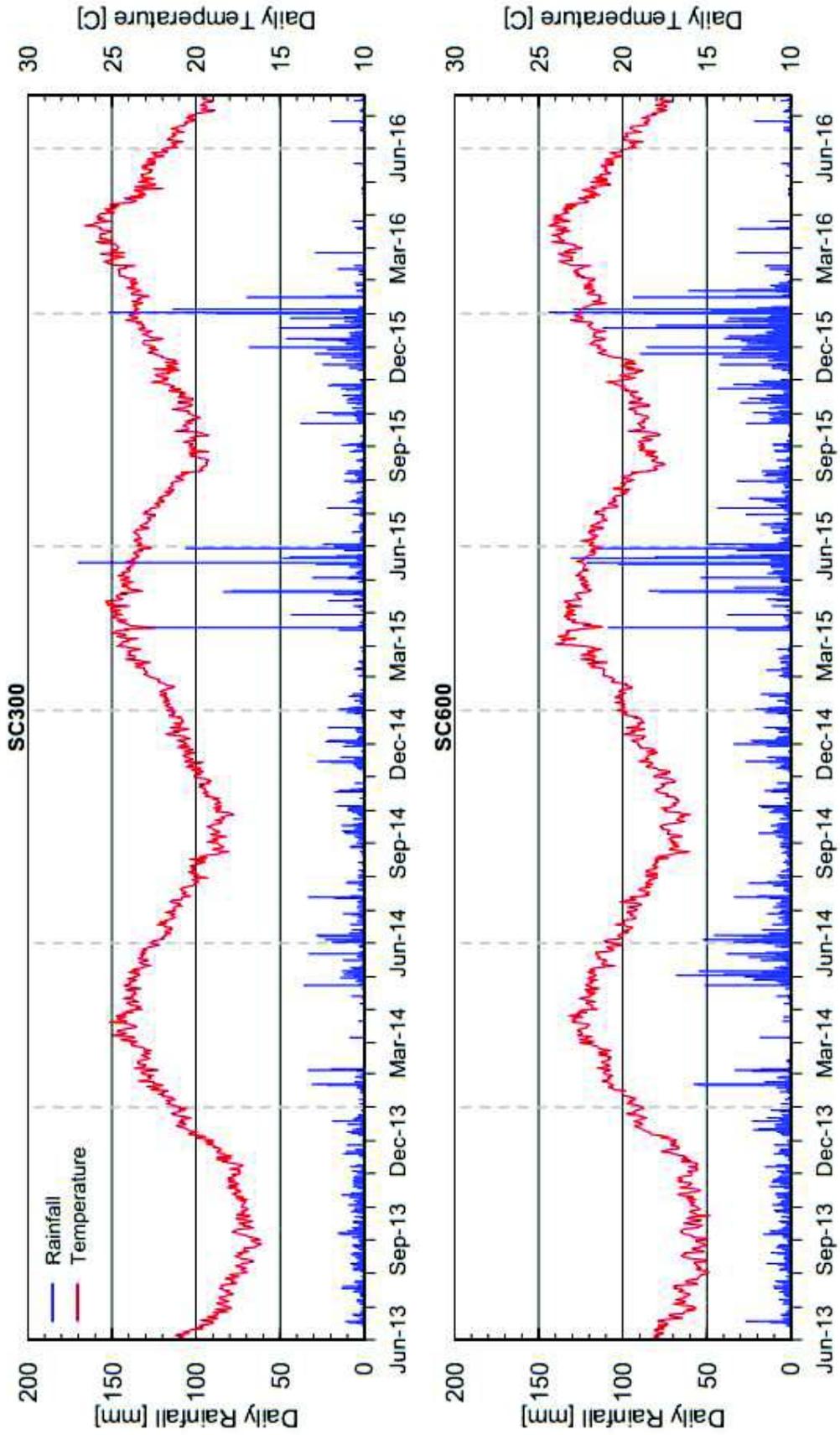
En San Cristóbal, la variación diaria de la precipitación y la temperatura a 300 msnm y a 600 msnm es similar (figura 4.4). Durante la época de garúa las temperaturas son menores y se presentan lluvias orográficas que tienen larga duración pero baja intensidad, mientras que en la época de invierno, con altas temperaturas, existen lluvias convectivas de corta duración y alta intensidad. Las cantidades de precipitación son similares en las dos temporadas. La temperatura

tiende a aumentar cada año en ambas elevaciones. A 300 m en el año hidrológico 2013-2014, la temperatura diaria mínima fue de 16°C en septiembre, y la máxima fue de 25.2°C aproximadamente, en abril. En el 2014-2015, la temperatura diaria mínima fue alrededor de 17.8°C en octubre y la máxima cerca de 25.5°C en mayo. En el año 2015-2016, la temperatura mínima fue 19.2°C en octubre y la máxima fue 26.7°C en abril, aproximadamente (figura 4.4).

En cuanto a la precipitación, en ambas elevaciones, es mayor en la época de invierno. Existe un desfase de la precipitación en el año 2015; se observa que la temporada de invierno tiene inicio en el mes de diciembre, con picos de precipitación diaria alrededor de 150 mm. En el año 2016, la precipitación es muy baja en junio y julio, comparada con otros años promedio (figura 4.4).

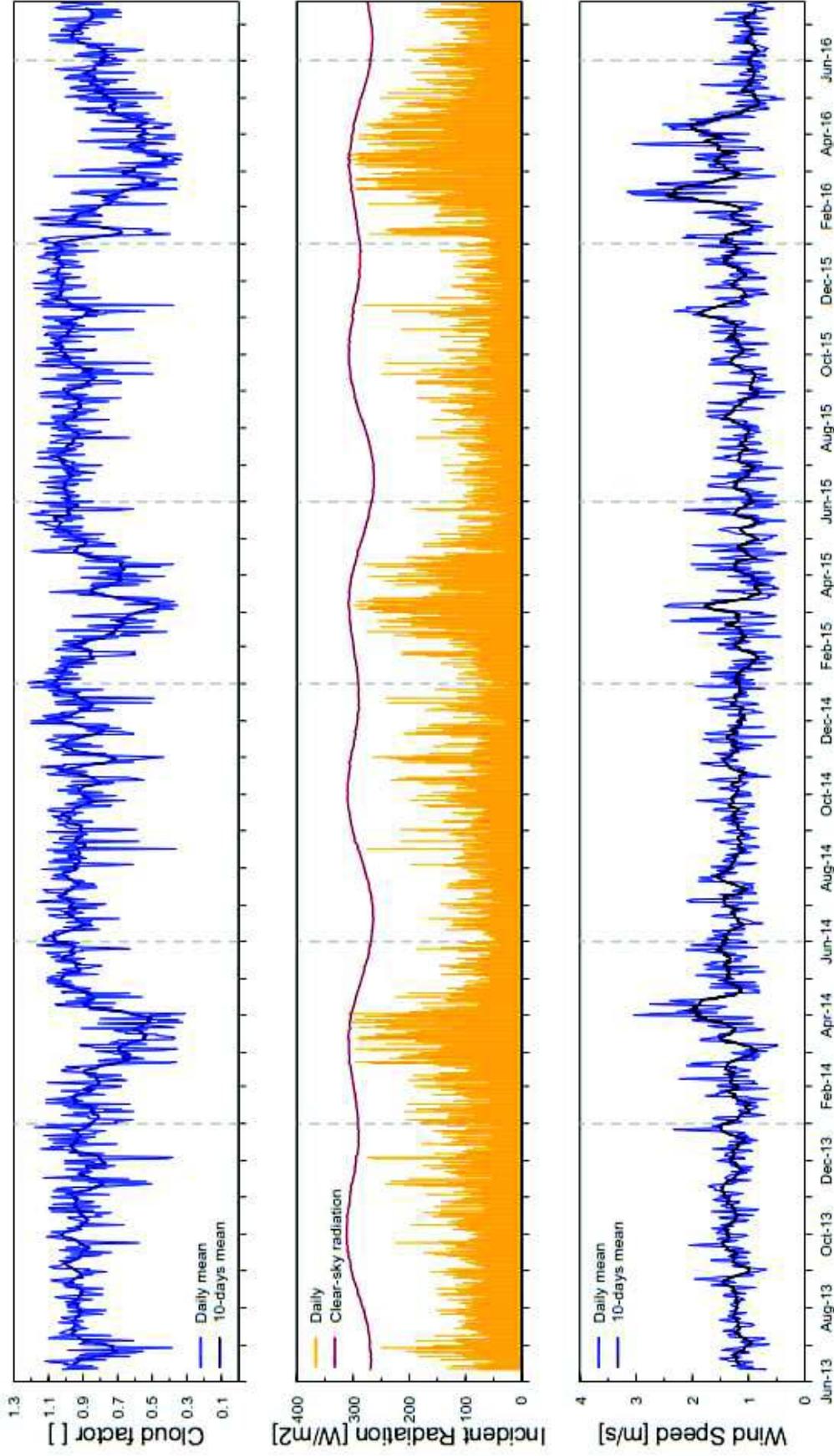
En las figuras 4.5, 4.6 y 4.7, se observa que a 300 m y 600 m de elevación la radiación solar diaria es más fuerte en la temporada de invierno, entre marzo y mayo, este período coincide con el de menor nubosidad. La velocidad del viento diaria también es mayor cuando hay más insolación, sin embargo, a 600 m, se observan mayores velocidades del viento que a 300 m, y también es menos uniforme que a menor elevación. En la figura 4.7, se evidencia la presencia de neblina cuando la radiación solar es menor, y se diferencian claramente las dos temporadas. En general, en invierno se dan las precipitaciones más intensas, coincidiendo con registros de radiación solar más bajos.

FIGURA 4.4 PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA DIARIA A A) 300 MSNM Y B) 600 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL



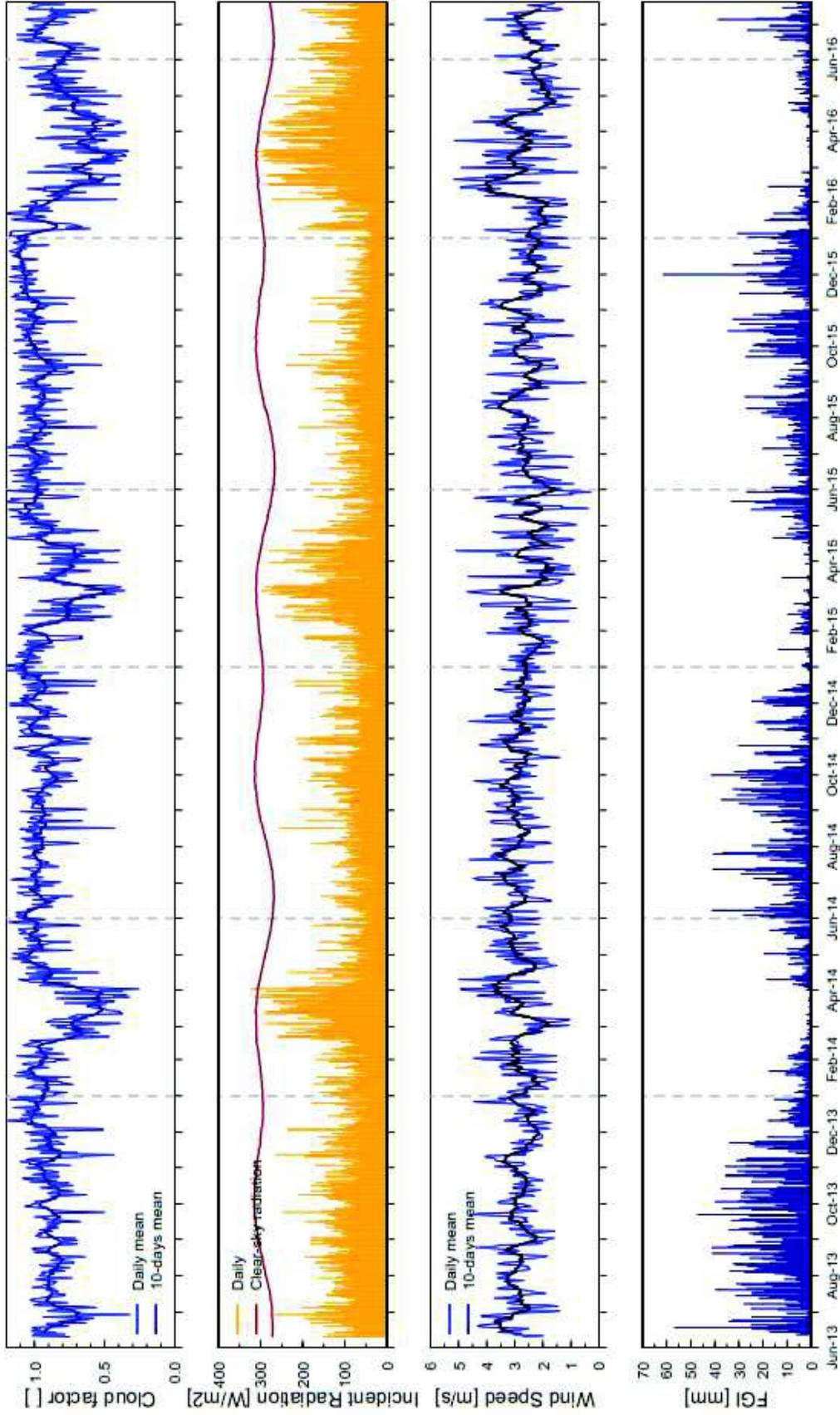
Elaboración: Domínguez Christian

FIGURA 4.5 VARIACIÓN DIARIA DE A) FACTOR DE NUBOSIDAD (MEDIA DIARIA Y PROMEDIO DE 10 DÍAS), B) RADIACIÓN SOLAR (DIARIA Y CIELO DESPEJADO) Y C) VELOCIDAD DEL VIENTO (MEDIA DIARIA Y PROMEDIO DE 10 DÍAS) A 300 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL



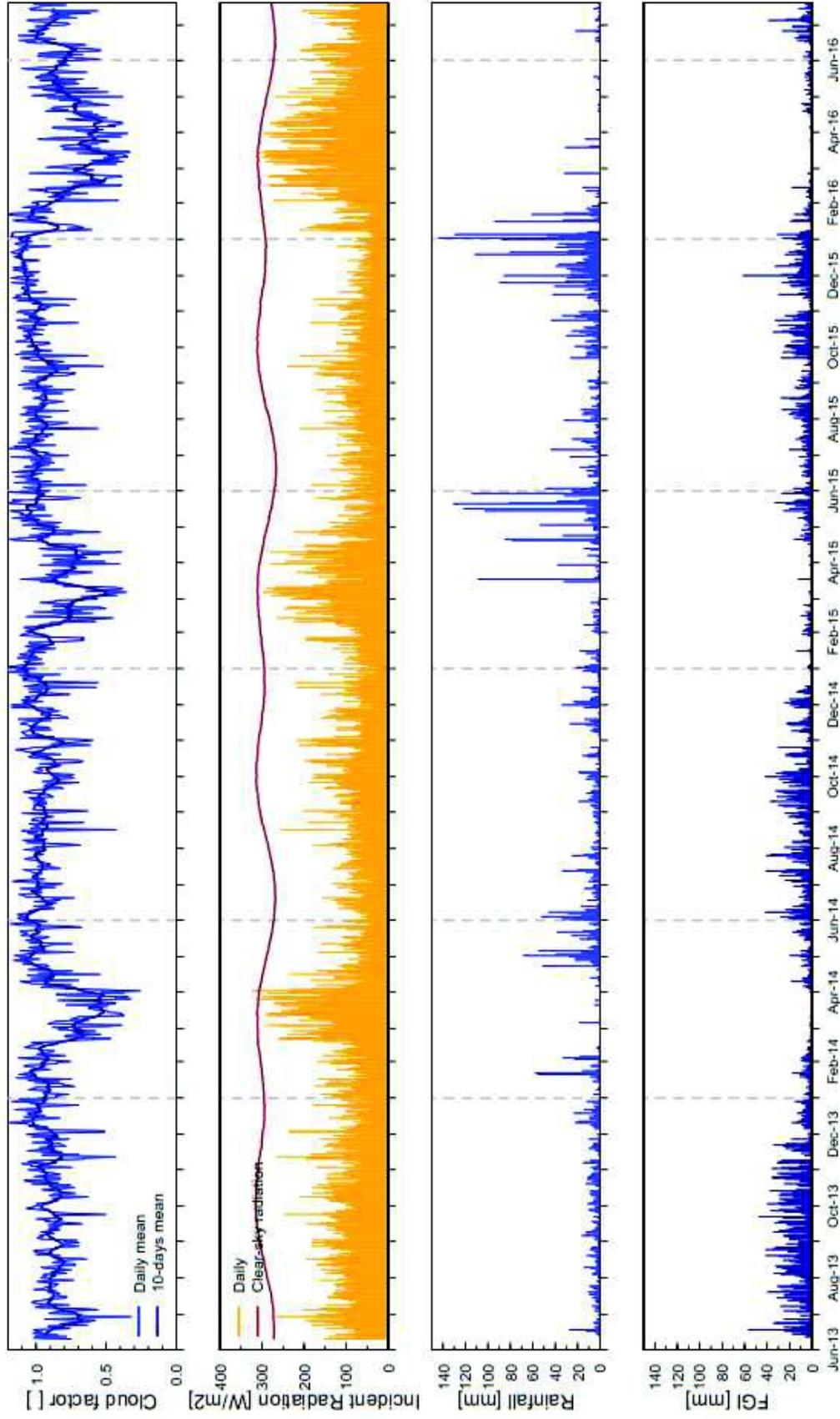
Elaboración: Domínguez Christian

FIGURA 4.6 VARIACIÓN DIARIA DE A) FACTOR DE NUBOSIDAD (MEDIA DIARIA Y PROMEDIO DE 10 DÍAS), B) RADIACIÓN SOLAR (DIARIA Y CIELO DESPEJADO), C) VELOCIDAD DEL VIENTO (MEDIA DIARIA Y PROMEDIO DE 10 DÍAS) Y D) ALTURA DE NEBLINA A 600 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL



Elaboración: Domínguez Christian

FIGURA 4.7 VARIACIÓN DIARIA DE A) FACTOR DE NUBOSIDAD (MEDIA DIARIA Y PROMEDIO DE 10 DÍAS), B) RADIACIÓN SOLAR (DIARIA Y CIELO DESPEJADO), C) PRECIPITACIÓN Y D) ALTURA DE NEBLINA A 600 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL



Elaboración: Domínguez Christian

4.1.2.3 Variabilidad mensual a 300 msnm y 600 msnm en San Cristóbal y el período de estudio

La mayor cantidad de neblina se registra en agosto del año 2013-2014, con 680 mm, aproximadamente. En el año 2014-2015, la mayor cantidad de neblina se obtuvo en septiembre con 510 mm, en el 2015-2016 se dio en octubre y fue de 460 mm, y en el período de estudio se obtuvo más neblina en junio, correspondiente a 180 mm (figura 4.8).

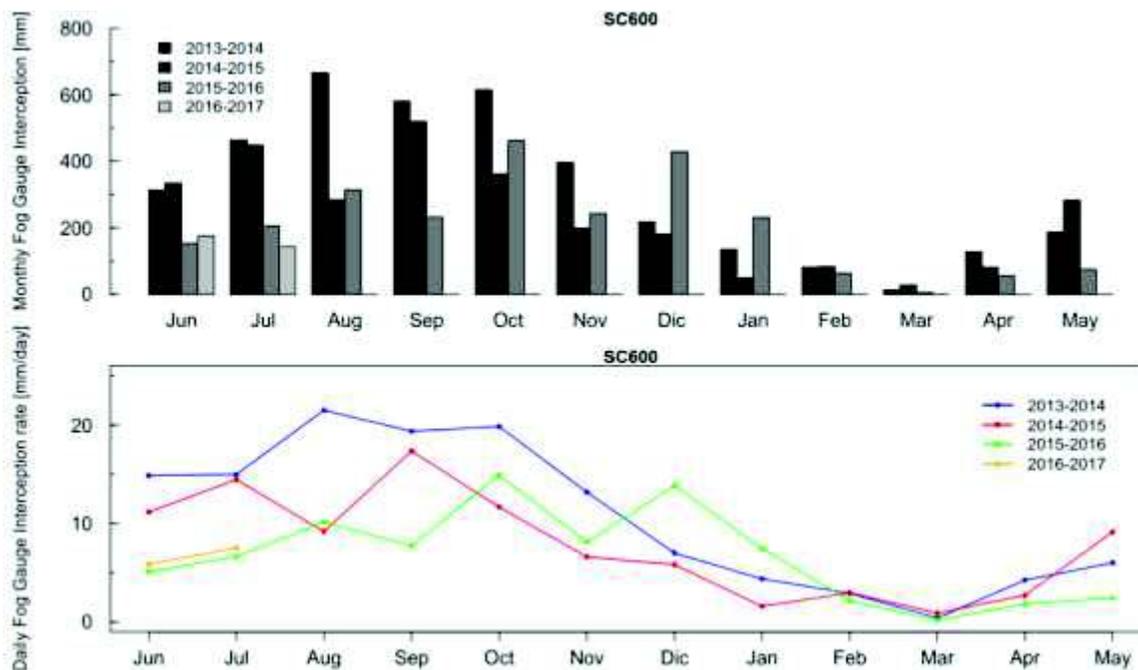
A 300 m de elevación, la precipitación mensual no supera los 200 mm en la temporada de garúa en los tres años hidrológicos; no obstante, en el año 2015-2016, esta variable alcanza valores altos en diciembre y enero, siendo de 400 mm y 500 mm, respectivamente. Los meses más secos son febrero y marzo en invierno, y mayo es el mes más húmedo (figura 4.9).

La precipitación mensual es mayor conforme aumenta la altura; en la parte alta de San Cristóbal, en la temporada de garúa, en el último año hidrológico, la precipitación alcanza 800 mm y 750 mm, en diciembre y enero, respectivamente. Los meses más secos corresponden a febrero marzo y abril en la época de invierno, y mayo es el mes más húmedo (figura 4.9).

En el año 2015-2016 se evidencia un desfase en la precipitación, que indica el inicio de la temporada de invierno en el mes de diciembre tanto a 300 m como 600 m de elevación (figura 4.9).

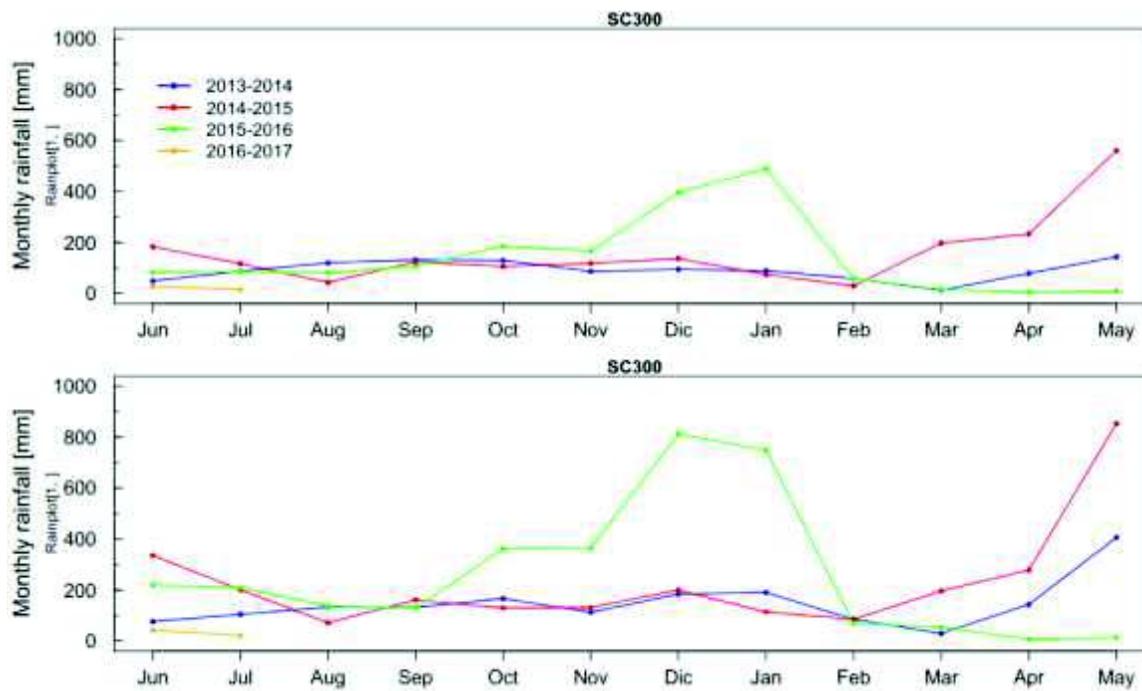
El comportamiento de la temperatura mensual es el mismo a 300 m y 600 m, pero su magnitud es menor en la elevación más alta, también es menor en la temporada de garúa cada año. En el período de estudio, esta variable tiene un comportamiento normal. La temperatura ha ido aumentando año tras año, en general (figura 4.10).

FIGURA 4.8 ALTURA DE NEBLINA MENSUAL E INTENSIDAD DE NEBLINA MENSUAL EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL



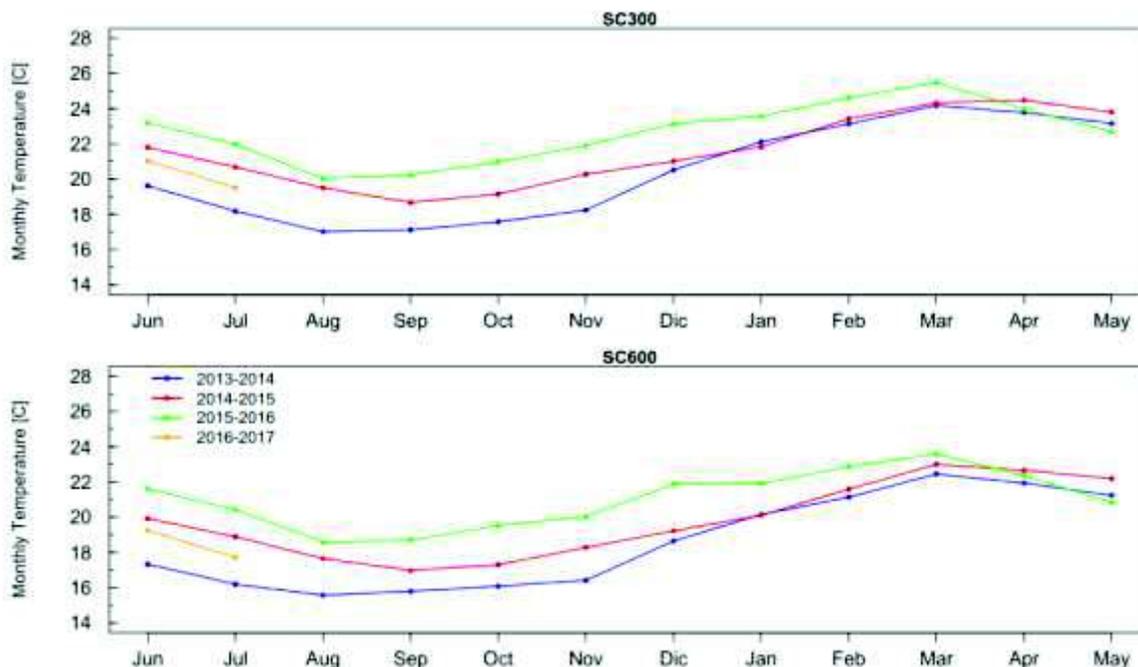
Elaboración: Domínguez Christian

FIGURA 4.9 PRECIPITACIÓN MENSUAL A 300 Y 600 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL



Elaboración: Domínguez Christian

FIGURA 4.10 TEMPERATURA MENSUAL A 300 Y 600 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL



Elaboración: Domínguez Christian

En la figura 4.11 a 300 m de elevación, la velocidad del viento media mensual permanece relativamente constante entre junio y diciembre, entre 1.0 m/s y 1.3 m/s, aproximadamente, en los tres años hidrológicos y el período de estudio, y se mantiene así en el año 2014-2015. En enero la velocidad del viento aumenta ligeramente en el 2013-2014 y 2015-2016, y alcanza 1.6 m/s en abril y 1.8 m/s en febrero, respectivamente (figura 4.11).

En esta elevación, la dirección del viento media mensual mantiene un ángulo de 180° aproximadamente desde junio hasta octubre, en los tres años, es decir, en la época de garúa el ángulo de la dirección del viento es constante; luego empieza a incrementar, y llega a 250°, 210° y 260°, en el mes de marzo, en el año 2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016, respectivamente (figura 4.11).

En la estación a 300 msnm se observó que la humedad relativa media mensual permanece cerca de la saturación, es decir, cerca del 100%, entre junio y enero, cuando empieza a decrecer y es mínima en marzo en los tres años hidrológicos,

con 91%, 92% y 90%, en el año 2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016, respectivamente (figura 4.11).

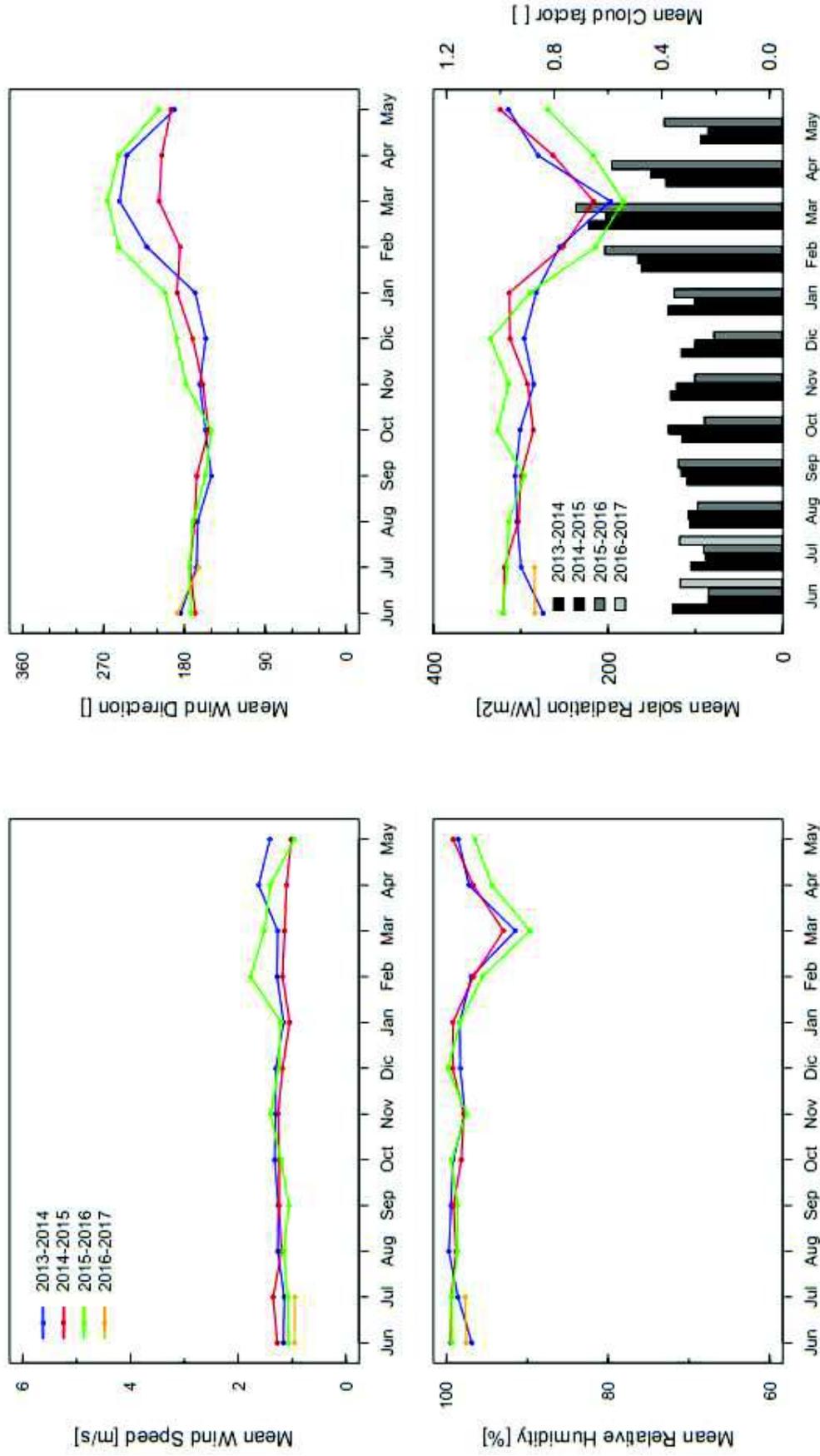
A 300 msnm, la radiación solar media mensual se muestra relativamente uniforme desde junio hasta diciembre en todos los años, siendo de 300 W/m² aproximadamente; disminuyendo a partir de este mes y siendo menor en el mes de marzo, con 190 W/m², 210 W/m² y 180 W/m² en el 2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016, respectivamente (figura 4.11).

La dirección del viento media mensual a 600 m de elevación es similar que a 300 m, y se mantiene relativamente invariable entre junio y diciembre, con alrededor de 200°, luego el ángulo comienza a incrementar y alcanza su máximo en marzo, con 240° en el año 2013-2014, 220° en el 2014-2015 y 265° en el 2015-2016 (figura 4.12).

La humedad relativa media mensual a esta altura es muy próxima a la saturación desde junio hasta enero, y es incluso mayor que a 300 m. A partir de enero, ésta desciende y es mínima en marzo, con 93%, 95% y 92% en el año 2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016, respectivamente (figura 4.12).

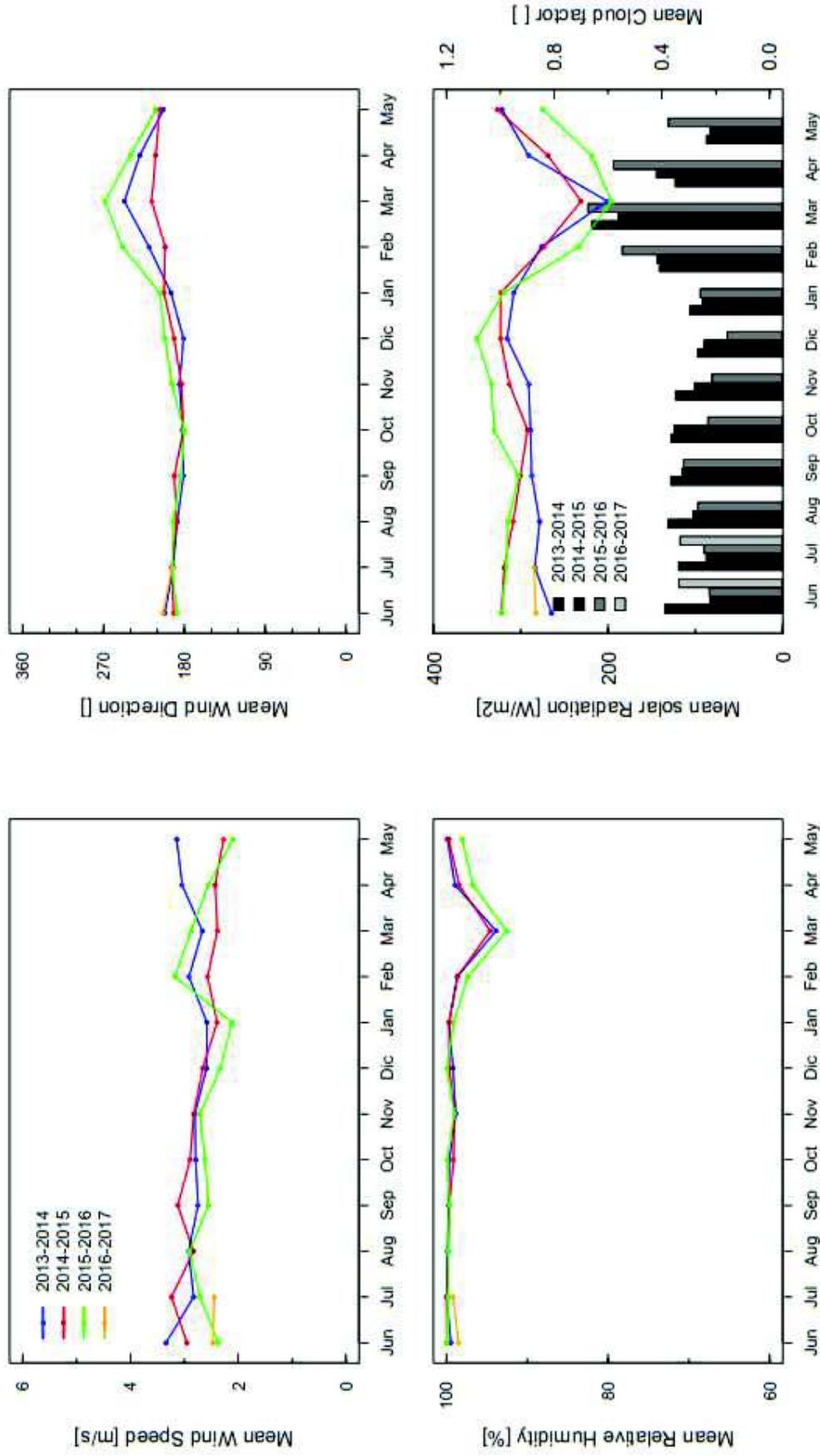
A 600 msnm la radiación se mantiene entre 270 W/m² y 350 W/m², desde junio hasta diciembre, siendo mayor en los dos últimos años. Desde enero la radiación disminuye, siendo la mínima en marzo, con 200 W/m², 220 W/m² y 200 W/m², en el año 2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016, respectivamente. La nubosidad media mensual va desde 0.18 hasta 0.4, entre junio y diciembre. En el mes de marzo los niveles de nubosidad son los más altos y tienen un factor de 0.62, 0.58 y 0.68, en el año 2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016, respectivamente (figura 4.12).

FIGURA 4.11 VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO PROMEDIO, HUMEDAD RELATIVA MEDIA Y RADIACIÓN SOLAR MEDIA A 300 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL



Elaboración: Domínguez Christian

FIGURA 4.12 VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO PROMEDIO, HUMEDAD RELATIVA MEDIA Y RADIACIÓN SOLAR MEDIA A 600 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL



Elaboración: Domínguez Christian

4.1.2.4 Variabilidad diaria mensual a 300 msnm y 600 msnm

En cuanto a los ciclos diurnos mensuales, a 300 m de elevación se observó que la radiación solar, la velocidad del viento, la temperatura y la evapotranspiración potencial, llegan a su máximo al medio día. En el caso de la humedad relativa ocurre lo contrario; en ese momento, esta variable alcanza los mínimos valores.

La radiación solar, la temperatura, la velocidad del viento y la tasa de evapotranspiración potencial incrementan desde las 6:00, alcanzan su pico a las 12:00 y a partir de ese momento decrecen, llegando de nuevo a los valores más bajos a las 18:00 y manteniéndose así hasta la mañana del día siguiente. Este evento es más evidente en los meses de marzo, abril y mayo, es decir, los picos son más altos; y en los meses correspondientes a la temporada de garúa son más bajos y más estables (figura 4.13).

Por otra parte, a esta misma altura, el ángulo de la dirección del viento varía ligeramente más en la mañana, entre las 6:00 y las 12:00. Este ángulo es mayor en invierno, y disminuye en los meses de garúa. La intensidad de precipitación es mayor entre las 0:00 y 6:00, en general; sin embargo, es mayor entre las 6:00 y 18:00 en los meses de marzo, abril y mayo. Las precipitaciones son más intensas y tienen más variabilidad en la temporada de invierno, mientras que en la época de garúa, éstas son más bajas y con poca variabilidad (figura 4.13).

En la parte alta de la isla, la variación temporal de estos parámetros mensuales es similar, sin embargo su intensidad difiere con respecto a la zona de transición. La radiación solar, la temperatura y la tasa de evapotranspiración potencial son mayores a 300 msnm, y la humedad relativa llega a valores más bajos que en la parte alta de San Cristóbal. La velocidad del viento es mayor a 600 msnm, y la dirección del viento es más uniforme que a 300 msnm. La intensidad de precipitación en la parte alta de San Cristóbal es mayor entre las 0:00 y 12:00 en los meses de invierno y los meses de transición entre temporada, la intensidad de lluvia es mayor también con respecto a 300 m de elevación; y es muy baja en la temporada de garúa (figura 4.14).

La intercepción de neblina se da por encima de los 300 msnm, por lo que solo se han obtenido registros en la parte alta de la isla. Existe mayor tasa de intercepción de neblina entre las 0:00 y las 12:00, alcanzando los picos a las 6:00 am. La tasa de intercepción disminuye considerablemente al medio día e incrementa nuevamente a partir de las 14:00 pm. Los meses en los que se captura más neblina son julio, agosto, septiembre y octubre, a lo largo del día, es decir, en la época de garúa; sin embargo, la cantidad de neblina es menor en los meses de transición, que son junio, noviembre y diciembre; y los meses en los que la captura de neblina es poco significativa son enero, febrero y marzo, de hecho, en éste último, se puede decir que la intercepción de neblina es nula (figura 4.14).

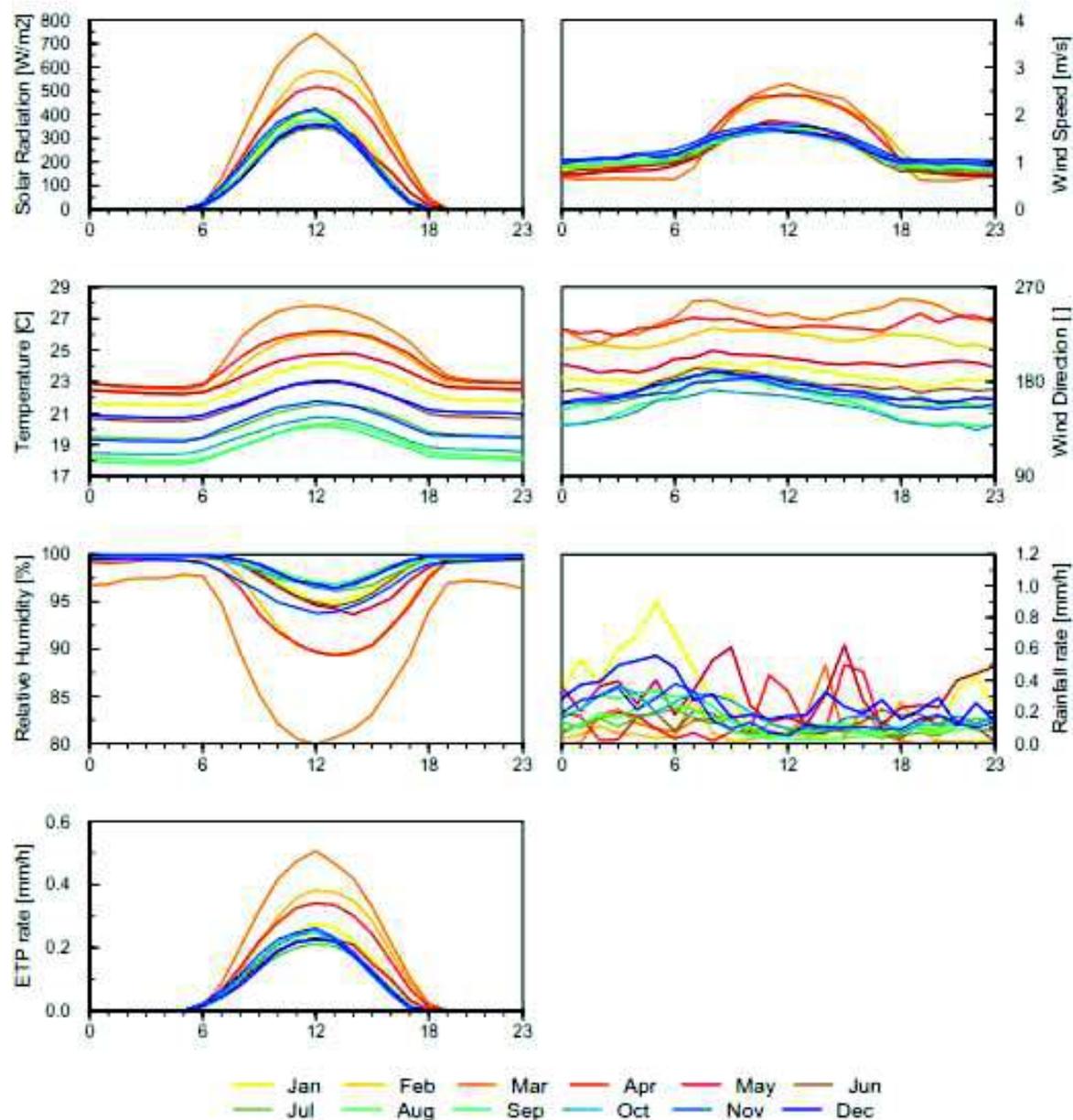
4.1.2.5 Variabilidad entre años hidrológicos y en el período de estudio

De una comparación entre los años hidrológicos 2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016 (figura 4.15), en la estación a 300 m, se obtuvo que la radiación solar, la velocidad del viento, el ángulo de dirección del viento y la tasa de evapotranspiración, se encuentran muy próximos entre sí, sin embargo, el último año hidrológico es ligeramente mayor al resto. El año 2015-2016 sobrepasa la temperatura media y supera a los otros años, seguido del año 2014-2015 y luego del 2013-2014. La humedad relativa del último año hidrológico es menor que la humedad relativa media y menor que los demás años, siendo mayor el año 2013-2014 y por encima el año 2014-2015. La intensidad de lluvia del año 2014-2015 es mayor que en los otros años, que además tienen un comportamiento parecido entre sí (figura 4.15).

En la parte alta de la isla se realizó la misma comparación de las variables climáticas entre los tres años hidrológicos, y se observó que los valores de la radiación solar, la velocidad del viento, el ángulo de la dirección del viento y la tasa de evapotranspiración son muy similares entre ellos y cercanos a la media. En el caso de la temperatura el año 2015-2016 es mayor que los demás años, seguido del año 2014-2015 y finalmente por el año 2013-2014. Aunque existe diferencia entre la intensidad de precipitación de los años hidrológicos, todos siguen la misma tendencia; el año 2015-2016 presenta mayores valores con

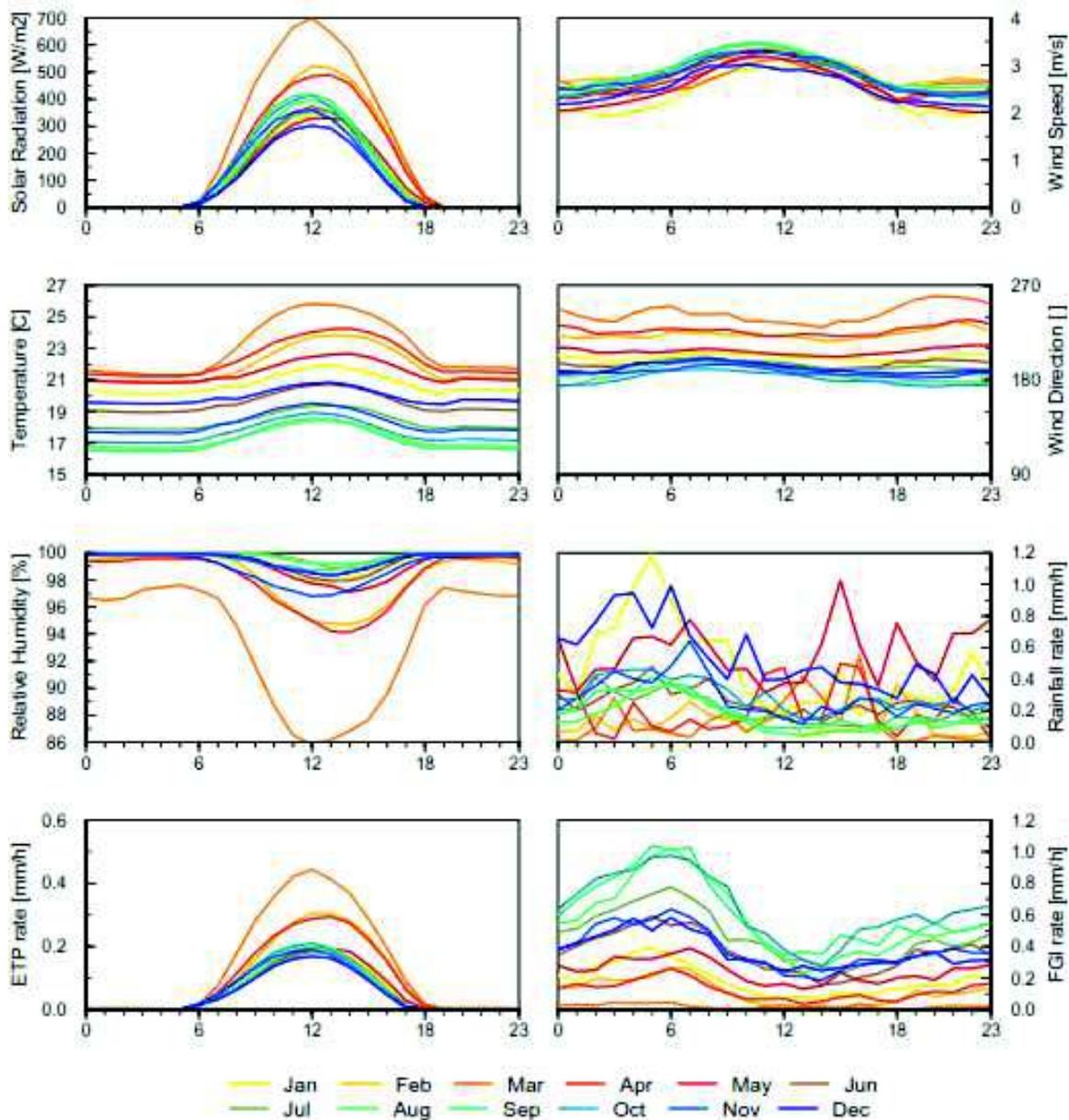
respecto a los años anteriores, y el año 2013-2014 es el que presenta la intensidad de precipitación más baja (figura 4.16).

FIGURA 4.13 CICLO DIARIO MENSUAL DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS A 300 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL



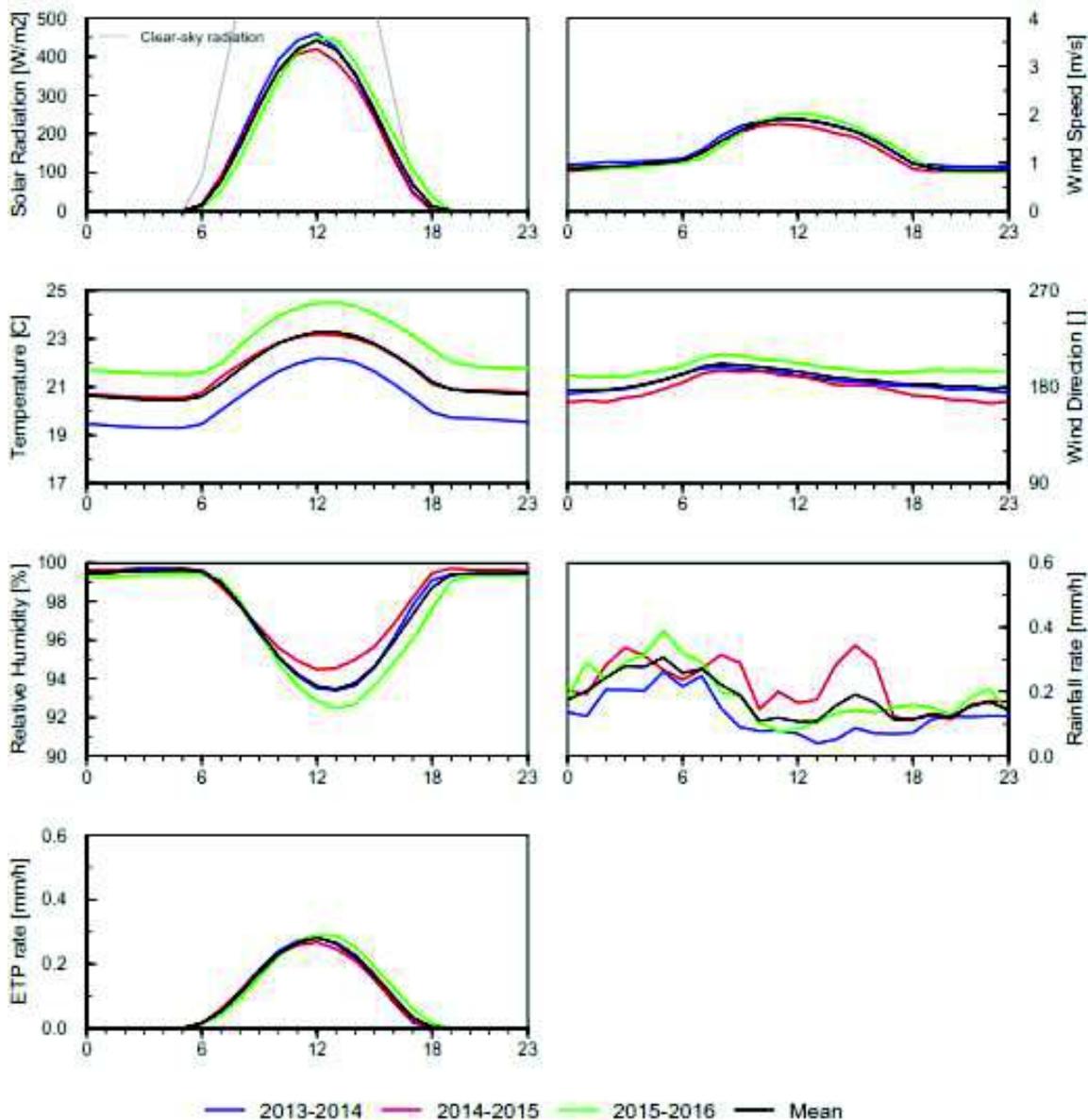
Elaboración: Domínguez Christian

FIGURA 4.14 CICLO DIARIO MENSUAL DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS A 600 MSNM EN LA ISLA SAN CRISTÓBAL



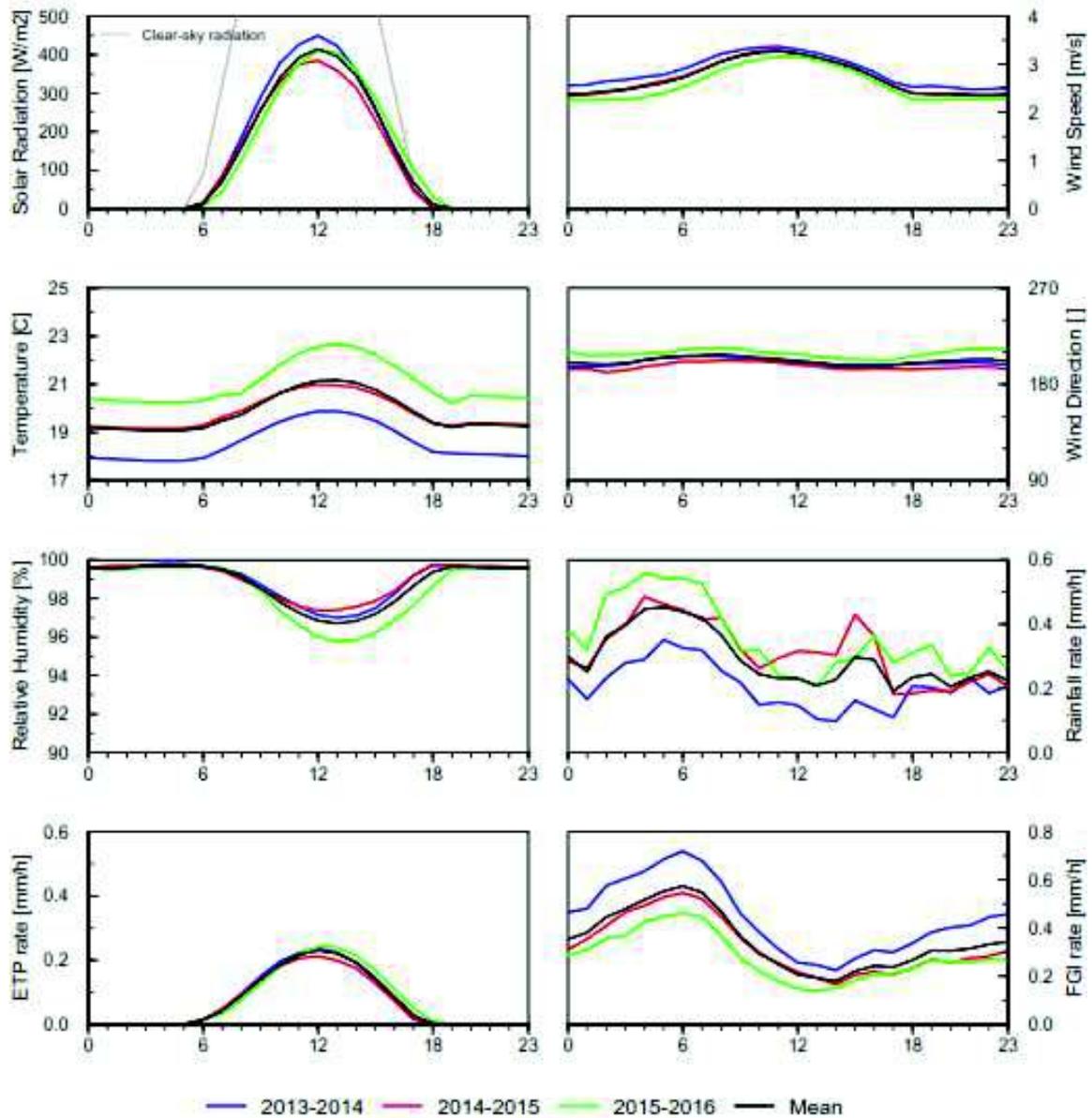
Elaboración: Domínguez Christian

FIGURA 4.15 COMPARACIÓN DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS ENTRE LOS AÑOS HIDROLÓGICOS 2013-2014, 2014-2015, 2015-2016 Y LA MEDIA A 300 MSNM



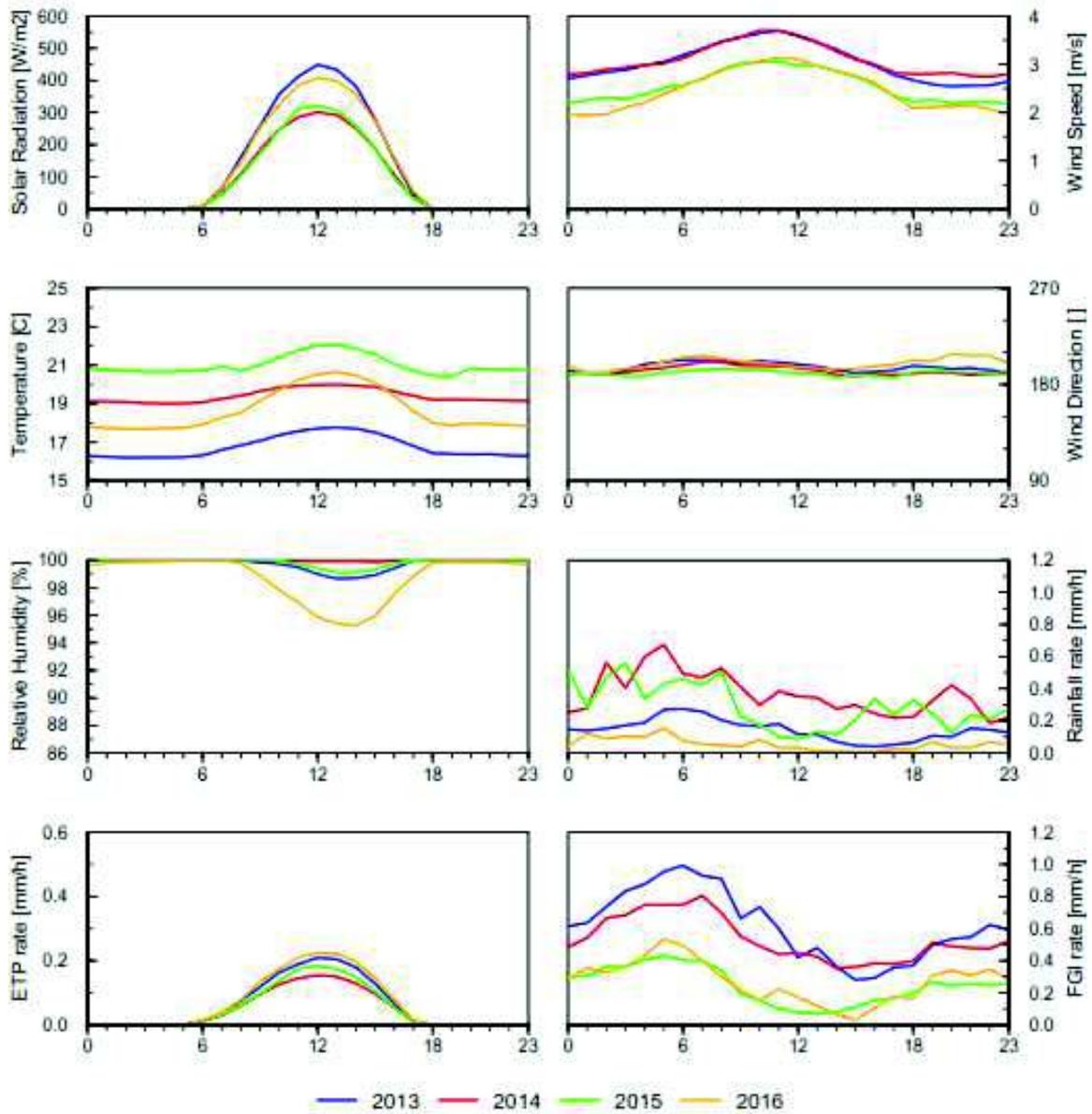
Elaboración: Domínguez Christian

FIGURA 4.16 COMPARACIÓN DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS ENTRE LOS AÑOS HIDROLÓGICOS 2013-2014, 2014-2015, 2015-2016 Y LA MEDIA A 600 MSNM



Elaboración: Domínguez Christian

FIGURA 4.17 COMPARACIÓN DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS ENTRE EL PERÍODO DE ESTUDIO EN EL 2016 Y EL MISMO PERÍODO DE TIEMPO EN EL 2013, 2014 Y 2015 A 600 MSNM



Elaboración: Domínguez Christian

La intensidad de precipitación es más baja en el período de estudio que en los demás años, siendo mayor en la madrugada, con alrededor de 0.1 mm/h. El 2013, 2015 y 2014, han tenido precipitaciones más intensas, y en ese orden (figura 4.17).

Por otra parte, la tasa de evapotranspiración fue mayor en el 2016 que en los demás años, con alrededor de 2.2 mm/h aproximadamente, y fue de 2.1 mm/h, 1.8 mm/h y 1.5 mm/h, en el 2013, 2015 y 2014, respectivamente (figura 4.17).

En todos los años se observa mayor intensidad de neblina en la madrugada y las primeras horas de la mañana. El año 2013 supera a los otros años con respecto a esta variable, seguido por el año 2014, y finalmente el 2015 y el período de estudio en el 2016, los que son muy similares. En el período de estudio de obtuvieron 0.5 mm/h a las 6:00, 0 mm/h a las 15:00 y alrededor de 0.3 mm/h entre las 18:00 y las 23:00 (figura 4.17).

4.1.3 CUANTIFICACIÓN DE LA NEBLINA

Luego de aplicar el modelo en los 48 días de investigación se obtuvo que la neblina recolectada por el colector estándar de 50% de coeficiente de sombra (50-SFC), el de 35% de coeficiente de sombra (35-SFC) y el colector cilíndrico (CFN) es de 352 mm, 284 mm y 165 mm respectivamente, es decir, 7.9 mm/día, 5.92 mm/día y 3.43 mm/día. Adicional a esto, se identificaron los eventos en los que existe únicamente precipitación (sin neblina) para tener mayor certeza en el cálculo de la cantidad de neblina, y se obtuvieron intensidades de 0.26 mm/h, 0.25 mm/h y 0.08 mm/h para 50-SFC, 35-SFC y CFN, respectivamente. La neblina diaria recolectada por los tres colectores se muestra en la figura 4.19.

La neblina presenta un alto porcentaje con respecto a la lluvia en el período de estudio (72 mm), siendo de 229% en CFN, 394.4% en 35-SFC y 489.5% en 50-SFC.

El 55% del período de estudio existió intercepción de neblina, y el 36% del tiempo se presentó neblina sin precipitación.

La correlación entre las tres redes de neblina, tanto para el volumen de agua como para la neblina es alta, como se puede ver en las tablas 4.1 y 4.2 y en la figura 4.18.

Los colectores estándar tienen mayor correlación entre sí con respecto al volumen medido y también con respecto a la cantidad de neblina recolectada; sin embargo, la red cilíndrica de neblina también presenta una alta correlación con los SFC.

TABLA 4.1 VOLUMEN DE AGUA EN LOS TRES COLECTORES

Volumen	CFN	50-SFC	35-SFC
CFN	1	0.90	0.81
50-SFC		1	0.94
35-SFC			1

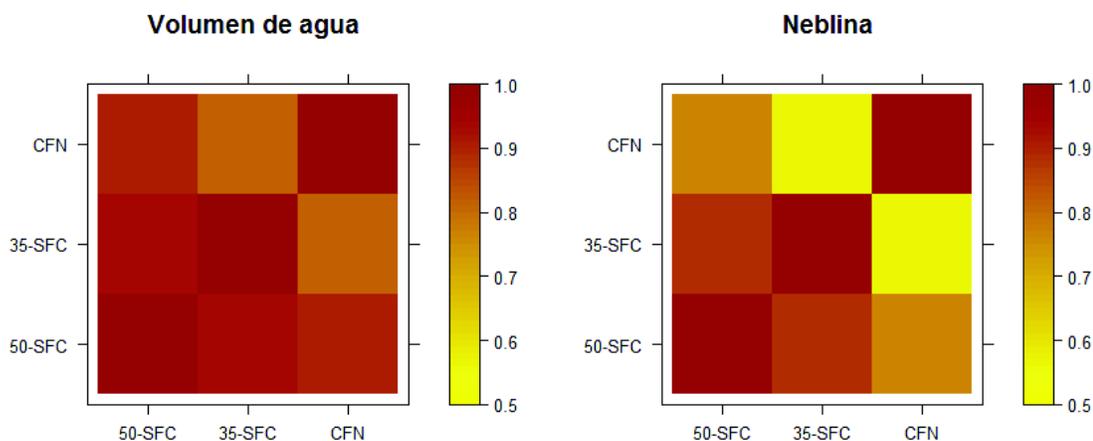
Elaboración: Echeverría Paola

TABLA 4.2 NEBLINA EN LOS TRES COLECTORES

Neblina	CFN	50-SFC	35-SFC
CFN	1	0.76	0.57
50-SFC		1	0.88
35-SFC			1

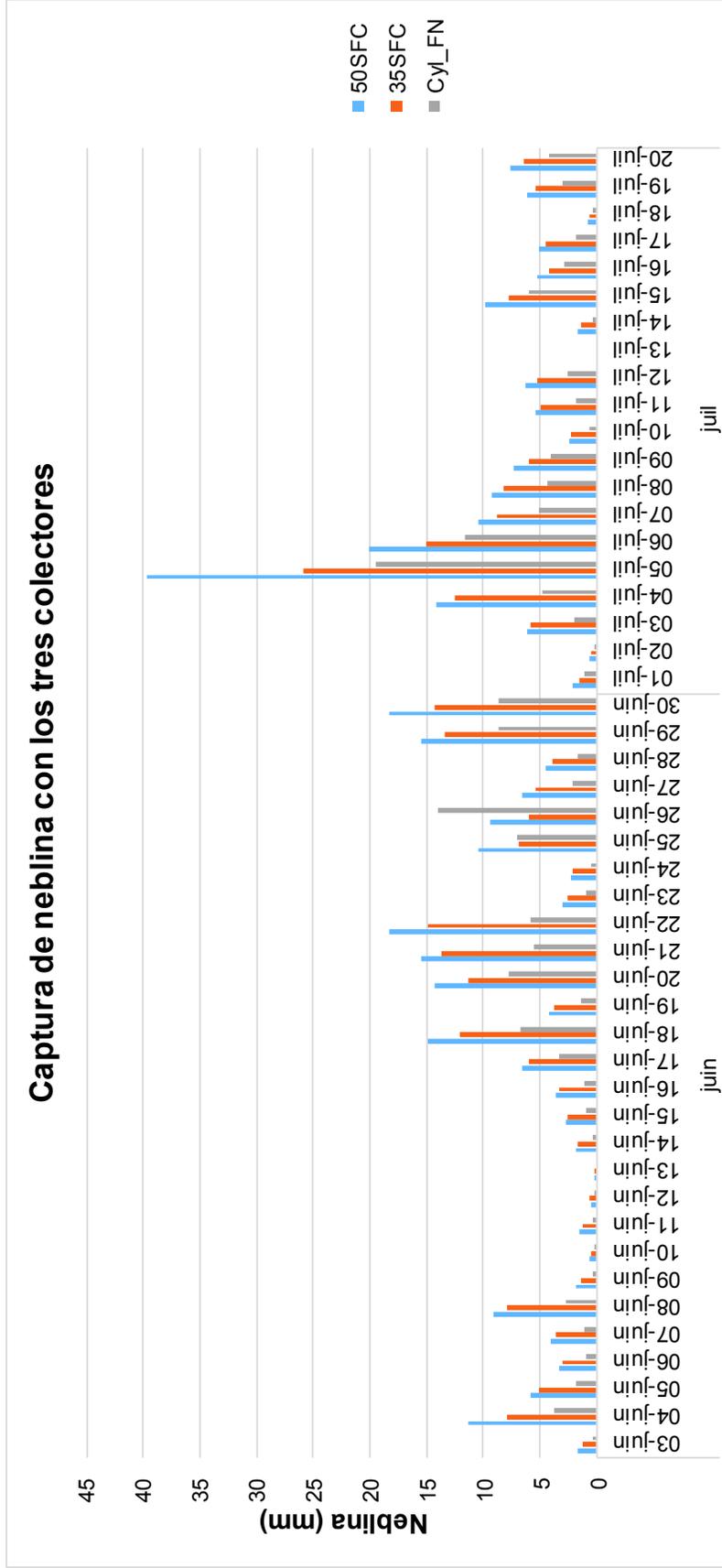
Elaboración: Echeverría Paola

FIGURA 4.18 MATRIZ DE CORRELACIÓN DEL A) VOLUMEN DE AGUA Y B) NEBLINA EN LOS TRES COLECTORES DE NEBLINA



Elaboración: Echeverría Paola

FIGURA 4.19 CANTIDAD DE NEBLINA INTERCEPTADA POR EL 35-SFC, 50-SFC Y CFN EN MM



Elaboración: Echeverría Paola

4.1.4 INFLUENCIA DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA RECOLECCIÓN DE NEBLINA

Como resultado del análisis de cuantía, se obtuvo que la velocidad del viento es la variable que más influye en la captura de neblina, se evidenció que cuando la velocidad del viento es mayor existe más intercepción de neblina.

La cantidad de neblina capturada en la red cilíndrica es mínima hasta los 4 m/s, a partir de esta velocidad empieza a ser considerable, no existe una variación significativa en la cantidad de neblina entre los 4 m/s y 6 m/s, los datos se concentran entre 0.15 mm y 0.2 mm, siendo 0.15 mm el valor de la mediana (figura 4.20).

En los colectores estándar, la neblina es despreciable con velocidades del viento menores a 4 m/s, aumentando a partir de este valor y siendo máxima entre los 5 m/s y 6 m/s, en donde, en el caso de 50-SFC, se registran valores de neblina entre 0.4 y 0.6 mm y la mediana se ubica en 0.55 mm, mientras que en 35-SFC, los valores oscilan entre 0.42 y 0.25 mm, y la mediana se encuentra en 0.35 mm (figura 4.20).

Este comportamiento entre la velocidad del viento y la neblina, puede deberse a que a velocidades relativamente altas, la deposición de las gotas de agua es mejor y el contenido de humedad es el adecuado, sin embargo, si la velocidad del viento es demasiado alta, las mallas tendrán menos resistencia y las gotas de agua no serán interceptadas debido al movimiento.

Los colectores estándar atrapan más neblina que la red cilíndrica, incluso a bajas velocidades del viento.

En el proceso de estimación del porcentaje de contribución de las variables climáticas a partir del análisis multivariante se obtuvieron los siguientes modelos lineales para cada colector:

Colector cilíndrico CFN:

$$y = 2.550e^{-1} - 1.277e^{-4} SlrW + 2.849e^{-2} WS + 1.906e^{-5} WD \\ - 2.242e^{-3} AirTC - 2.481e^{-3} RH + 6.025e^{-1} Rain$$

Colector 50-SFC:

$$y = 5.563e^{-1} - 3.907e^{-4} SlrW + 7.345e^{-2} WS + 1.387e^{-4} WD \\ - 1.191e^{-4} AirTC - 6.434e^{-3} RH + 2.516e^{-1} Rain$$

Colector 35-SFC:

$$y = 3.546e^{-1} - 2.974e^{-4} SlrW + 5.041e^{-2} WS + 1.539e^{-4} WD \\ + 1.725e^{-3} AirTC - 4.490e^{-3} RH + 3.027e^{-2} Rain$$

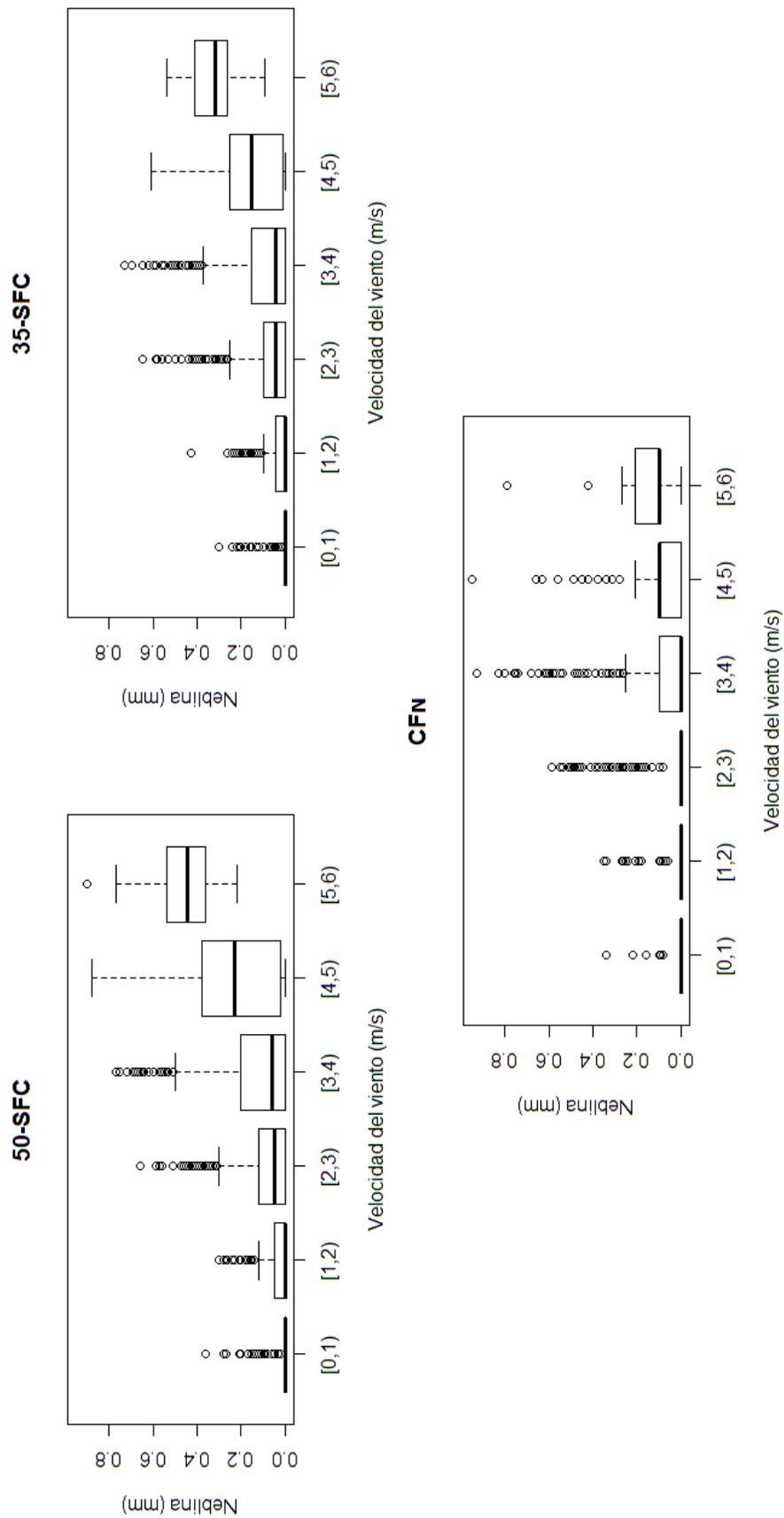
TABLA 4.3 VALORES DE SIGNIFICANCIA ESTADÍSTICA

Colector	Datos	R ²	Valor p
CFN		0,48	<2.2e-16
50-SFC	4479	0,38	<2.2e-16
35-SFC		0,33	<2.2e-16

Elaboración: Echeverría Paola

Posterior al análisis de cuantía se estableció que la variable de mayor influencia sobre la cantidad de neblina recolectada es la velocidad del viento en los tres colectores. La contribución de la precipitación en la captura de neblina también es importante y es de 59% y 16% con CFN y 50-SFC, respectivamente. La velocidad del viento influye en 31%, 53% y 51% con CFN, 50-SFC y 35-SFC, respectivamente. La influencia de la radiación sobre la neblina es de -25%, -52% y -55% en CFN, 50-SFC y 35-SFC, respectivamente (tabla 4.4).

FIGURA 4.20 CLASIFICACIÓN DE LA NEBLINA POR INTERVALOS DE VELOCIDAD DEL VIENTO



Elaboración: Echeverría Paola

TABLA 4.4 INFLUENCIA DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA CAPTURA DE NEBLINA

Variable climática	Coeficientes				Desviación estándar				Contribución		
	CFN	50-SFC	35-SFC	CFN	50-SFC	35-SFC	Variables climáticas	CFN	50-SFC	35-SFC	
Intercepto	0.26	0.56	0.35				-	-	-	-	
Radiación solar	0.00	0.00	0.00			174.55		-0.25	-0.52	-0.55	
Velocidad del viento	0.03	0.07	0.05			0.94		0.31	0.53	0.51	
Dirección del viento	0.00	0.00	0.00	0.09	0.13	0.09	28.77	0.01	0.03	0.05	
Temperatura del aire	0.00	0.00	0.00			1.26		-0.03	0.00	0.02	
Humedad relativa	0.00	0.00	0.00			3.06		-0.09	-0.15	-0.15	
Precipitación	0.60	0.25	0.0.1			0.09		0.59	0.16	0.03	

En la tabla se resume el cálculo de la influencia de variables climáticas en la captura de neblina, los coeficientes se obtienen a partir de los modelos lineales de cada colector, se calcula la desviación estándar de cada colector y de cada variable, posteriormente se utiliza el análisis de cuantía propuesto por Sicart et al. (2008). El ejemplo de cálculo se encuentra detallado en el anexo 2.

Elaboración: Echeverría Paola

4.1.5 ANÁLISIS DE LA OFERTA Y DEMANDA DE AGUA

Desde una perspectiva climática, el déficit de agua es significativo en los sitios de menor elevación, siendo éste más drástico entre los 0 y 100 m de elevación, tanto para el año promedio como el año seco. Los meses que presentan mayor déficit de agua en estas elevaciones son junio, y desde diciembre hasta mayo, para ambos años (tabla 4.5 y 4.6).

En el año promedio, solamente el mes de marzo presenta un déficit de agua en todas las elevaciones (tabla 4.5), mientras que en el año seco, éste se extiende desde marzo hasta mayo en todas las elevaciones (tabla 4.6). En ambos escenarios, marzo corresponde al mes más seco en términos de precipitación.

Dadas las condiciones climáticas del archipiélago de Galápagos, la neblina se presenta a lo largo de 7 meses al año, y los meses que cuentan con mayor potencial de colección de neblina son agosto, septiembre y octubre, tanto en el año seco como en el año promedio.

4.1.6 CONSUMO DOMÉSTICO

Luego del cálculo de la demanda se ha obtenido que en la zona rural de San Cristóbal la demanda de agua para consumo doméstico es 80.3 m³/día. De acuerdo al escenario planteado para estimar la demanda de agua para consumo doméstico en cada finca, se obtuvo que se requieren 0.4 m³/finca-día.

4.1.7 GANADERÍA

El sector ganadero necesita 1.24 m³/día para el ganado que corresponde principalmente a aves de corral y cuyes, 40.92 m³/día para el ganado menor, y 17.01 m³/día para el ganado mayor. La demanda total de agua para la ganadería es 84.53 m³/día.

TABLA 4.5 DÉFICIT HÍDRICO ANUAL Y MENSUAL POR RANGOS DE ELEVACIÓN

Elevación	DÉFICIT DE AGUA (m ³)									
	0-99	100-199	200-299	300-399	400-499	500-599	600-700	>700		
Jun	-1790,97	407,07	570,29	846,59	3220,40	5799,62	10872,29	2403,20		
Jul	27163,22	2986,08	2444,83	2596,94	8056,24	12492,32	21730,69	4475,54		
Ago	56806,15	5425,72	4120,87	4050,66	11760,31	17143,03	28757,90	5700,42		
Sep	73758,11	6605,48	4818,45	4518,98	12540,49	17440,31	28387,69	5438,50		
Oct	45408,15	5092,27	4208,69	4510,61	14091,72	21985,27	38374,34	7930,67		
Nov	15176,51	2243,55	2062,61	2420,28	8074,02	13287,44	23860,21	5070,31		
Dic	-20704,24	774,58	1831,30	3161,66	12808,98	23933,00	45590,68	10218,00		
Ene	-38072,43	-393,43	1165,89	2750,44	12262,49	24074,81	46799,29	10668,21		
Feb	-18625,41	-600,43	76,26	658,03	3464,82	7303,74	14582,84	3396,35		
Mar	-66825,46	-5209,00	-3426,16	-2787,12	-6543,88	-7295,22	-9916,88	-1462,09		
Abr	-18693,47	245,95	1104,31	2090,50	8748,59	16636,41	31925,26	7199,97		
May	-84579,72	-516,77	3022,79	6712,31	29460,90	57401,26	111245,79	25296,07		
TOTAL	-249291,70	-6719,63	-3426,16	-2787,12	-6543,88	-7295,22	-9916,88	-1462,09		

Los valores positivos corresponden a la disponibilidad de agua y los valores negativos corresponden al déficit de agua

Elaboración: Echeverría Paola

TABLA 4.6 INTERCEPCIÓN DE NEBLINA ANUAL Y MENSUAL POR RANGOS DE ELEVACIÓN

Elevación	INTERCEPCIÓN DE NEBLINA (m ³)										
	0-99	100-199	200-299	300-399	400-499	500-599	600-700	>700			
Jun	-0,25	-0,13	-0,05	0,04	0,15	0,24	0,33	0,42			
Jul	-0,54	-0,28	-0,11	0,09	0,32	0,52	0,72	0,92			
Ago	-0,76	-0,40	-0,16	0,13	0,45	0,74	1,02	1,31			
Sep	-0,67	-0,35	-0,14	0,12	0,40	0,65	0,89	1,15			
Oct	-0,73	-0,38	-0,15	0,13	0,43	0,71	0,97	1,25			
Nov	-0,47	-0,24	-0,10	0,08	0,28	0,46	0,63	0,81			
Dic	-0,32	-0,16	-0,06	0,06	0,19	0,31	0,42	0,55			
Ene	-0,23	-0,12	-0,05	0,04	0,14	0,23	0,31	0,40			
Feb	-0,12	-0,06	-0,02	0,02	0,07	0,12	0,16	0,20			
Mar	-0,02	-0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04			
Abr	-0,20	-0,10	-0,04	0,03	0,12	0,19	0,27	0,34			
May	-0,42	-0,22	-0,09	0,07	0,25	0,41	0,56	0,72			
CWI TOTAL	-4,73	-2,45	-0,96	0,82	2,79	4,59	6,31	8,12			

Elaboración: Echeverría Paola

4.1.8 AGRICULTURA

La demanda total de agua calculada para San Cristóbal es 44,775,448.34 m³/año, y la demanda de agua para agricultura, que se obtuvo del balance hidrológico es 44,598,960.15 m³/año; por lo tanto, el agua requerida para la actividad agrícola corresponde al 99.6% de la demanda total de agua, por esta razón solo este sector se tomó en cuenta para estimar un sistema de colectores estándar de neblina que satisfaga cierta porción del déficit de agua.

La cantidad total del déficit de agua para agricultura fue 287,443 m³ y 328,075 m³, en el año promedio y el año seco, respectivamente. La cantidad total de agua de neblina colectada con un 1 m² en el año con el colector 50-SFC fue de 22.6 m³. Los cálculos se realizan con los datos de este colector porque es el más eficiente con respecto a la captura de neblina en San Cristóbal.

Dado que el déficit es bastante alto y la recolección de neblina no podría suplirlo por completo, se optó por cubrir el 25% y el 15% del déficit de agua para la actividad agrícola, en el año promedio y en el año seco, respectivamente, adicionalmente se calculó la superficie colectora requerida en m² para cada rango de elevación. Los resultados se muestran en las tablas 4.7 y 4.8.

TABLA 4.7 PORCENTAJE DE DÉFICIT DE AGUA CUBIERTO EN UN AÑO PROMEDIO CON COLECTORES 50-SFC

Elevación (m)	Área promedio finca (m ²)	Déficit de agua (m ³)	Intercepción de neblina (m ³)	Superficie colectora (m ²)	Déficit cubierto (%)	Número de 35-SFC	Superficie de 35-SFC
300-399	65710.99	2787.12	1.22	850	25.16	22	10x4
400-499	180231.24	6543.88	4.12	590	25.18	15	10x4
500-599	247434.03	7295.22	6.78	400	25.16	10	10x4
600-700	399261.68	9916.88	9.32	395	25.13	10	10x4
>700	75710.25	1462.09	11.99	45	25.00	4	6x2

Elaboración: Echeverría Paola

TABLA 4.8 PORCENTAJE DE DÉFICIT DE AGUA CUBIERTO EN UN AÑO SECO CON COLECTORES 50-SFC

Elevación (m)	Área promedio finca (m ²)	Déficit de agua (m ³)	Intercepción de neblina (m ³)	Superficie colectora (m ²)	Déficit cubierto (%)	Número de 35-SFC	Superficie de 35-SFC
300-399	65710.99	6454.99	1.22	1175	15.01	30	10x4
400-499	180231.24	15710.12	4.12	845	15.02	22	10x4
500-599	247434.03	19017.49	6.77	625	15.08	16	10x4
600-700	399261.68	27885.53	9.31	665	15.05	17	10x4
>700	75710.25	4655.88	11.98	86	15.00	8	6x2

Elaboración: Echeverría Paola

4.2 DISCUSIÓN

4.2.1 COMPARACIÓN DE LOS PATRONES TEMPORALES DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS DE SAN CRISTÓBAL CON OTROS SITIOS

En la costa oeste de Sudáfrica, también se analizó el comportamiento de la neblina en tres estaciones, Alexander Bay, Port Nolloth y Cape Columbine, en este último existe una capa semi-permanente de neblina (Olivier, 2002), al igual que en San Cristóbal.

La costa oeste de Sudáfrica recibe lluvias durante el invierno y primavera, y neblina en verano y otoño (Olivier, 2002), al igual que el archipiélago de Galápagos, en donde estos fenómenos se presentan en la temporada de invierno y garúa, respectivamente.

Los meses en los que la neblina es más frecuente en Cape Columbine son marzo, abril y mayo; y en Alexander Bay son abril, mayo y julio (Olivier, 2002), mientras que en San Cristóbal son los más secos y no existe neblina.

En la costa oeste de Sudáfrica, la neblina inicia pasada la madrugada y aumenta hasta las 9:00, luego decrece (Olivier, 2002). En San Cristóbal es similar, la neblina comienza a incrementar desde las 0:00 llegando a su máximo a las 6:00, generalmente. Esto puede deberse a que existen brisas durante la noche y esto limita el movimiento de masas de aire hacia la isla (Olivier, 2002).

En la isla La Gomera, en el Parque Nacional Garajonay de las Islas Canarias también se evaluó el potencial de la contribución en la neblina en árboles de *Erica arbórea* L. y se observó que la neblina es significativa en las elevaciones más altas; y que la precipitación muestra estacionalidad entre una temporada lluviosa y otra temporada seca, pero la neblina se distribuye igualitariamente a lo largo del año (Ritter et al., 2008). También se observó que existe una reducción del 58% de la radiación solar bajo condiciones de neblina y una disminución de la temperatura entre 3°C y -6°C en promedio en comparación con períodos libres de neblina (Ritter et al., 2008); en San Cristóbal igualmente se observa que la temperatura y

la radiación son más bajas cuando hay neblina, esta reducción puede deberse a que la niebla y las nubes impiden el paso de los rayos solares hacia la superficie.

En las Islas Canarias, al igual que en San Cristóbal, existe una capa de inversión casi permanente de niebla, llamado “mar de nubes”, la cual se forma debido a que los vientos alisios del noreste golpean con el perfil de las islas, y suben causando enfriamiento y por ende condensación. Este fenómeno ocurre entre los 900 m y 1500 m (Ritter et al., 2008). Además se evidencia que la evapotranspiración es más baja en períodos de neblina (Ritter et al., 2008).

El sitio de estudio en el Parque Nacional Garajonay se encuentra entre 1090 msnm y 1300 msnm. La precipitación en este sitio se mantiene invariable entre los sitios de medición, con intensidades menores a 2 mm/h; la velocidad del viento en general no supera los 2 m/s, excepto en la elevación más alta, donde se alcanzan 12 m/s; y la intensidad de neblina que se obtuvo fue menor a 0.25 mm/h (Ritter et al., 2008). El valor de estos parámetros es comparable con los obtenidos en San Cristóbal, donde la velocidad del viento es 2.5 m/s, la intensidad de precipitación promedio es 0.24 mm/h y las intensidades de neblina se encuentran entre 0.08 y 0.26 mm/h.

En la Isla La Gomera, la temporada lluviosa se da entre octubre y mayo, mientras que la temporada seca se da entre junio y septiembre (Ritter et al., 2008), esta estacionalidad es similar a la de San Cristóbal. Con respecto a la variabilidad horaria de los factores climáticos, en las Islas Canarias se observó que la neblina ocurre principalmente entre la noche y las primeras horas de la mañana, y en las últimas horas de la tarde (Ritter et al., 2008), así como ocurre en San Cristóbal; y también existen mayores velocidades del viento bajo condiciones de neblina.

Tanto en Galápagos como en las Islas Canarias, la temperatura y la humedad relativa también varían durante el día, desde temprano en la mañana, hasta las últimas horas de la tarde. Existe más neblina cuando la humedad relativa está más cerca de la saturación y la temperatura del aire es menor (Ritter et al., 2008).

En San Cristóbal esto ocurre a las 6 de la mañana, que es cuando hay mayor interceptación de neblina.

En Hawaii, se estudiaron dos sitios a 1000 msnm en la isla Hawai'i. Se observó que existe neblina en las tardes a lo largo del año y las variaciones de los factores climáticos son pequeñas. En verano, entre junio y octubre, existen fuertes precipitaciones, la temperatura máxima fue 20.7°C y la mínima fue 13.4°C, mientras que en invierno la temperatura máxima fue 19.1°C y la mínima 10.7°C. La humedad relativa media diaria fue 99% a lo largo del año, sin embargo, es ligeramente menor en invierno. La velocidad del viento es baja, 1.0 m/s en promedio, y la media máxima fue 2.1 m/s. La insolación diaria promedio fue 145 W/m² en verano y 132 W/m² en invierno (Brauman et al., 2010). Estos datos son comparables con los medidos en el archipiélago de Galápagos, ya que se diferencia una estacionalidad, existe una disminución de la temperatura en la época de garúa, la humedad relativa es muy próxima a la saturación; sin embargo, en San Cristóbal las velocidades del viento son mayores, al igual que la radiación solar, tanto en la temporada de invierno, como de garúa. A pesar de estas similitudes, la interceptación de neblina en Hawaii es menor (0.1mm/día-3mm/día) que en San Cristóbal (6.24 mm/día), esta diferencia podría estar relacionada a la velocidad del viento, aunque la elevación en Hawaii sea mayor, la velocidad del viento en los sitios donde se realizó el estudio es baja.

4.2.2 INFLUENCIA DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS

La recolección de agua que comprende a la lluvia y a la neblina, es importante con los tres colectores, siendo mayor con 50-SFC, seguido de 35-SFC y finalmente de CFN, lo mismo ocurre al considerar solamente la neblina. Sin embargo, ésta difiere más entre colectores. La configuración de la malla de los colectores estándar facilita el drenaje en comparación con la malla cilíndrica (Frumau et al., 2011), que puede bloquear los agujeros, impidiendo la captura de neblina (Cereceda et al., 2014). La velocidad del viento es la variable más influyente en la recolección de agua de neblina (Ritter et al., 2008; Schemenauer

& Joe, 1989), en rangos de velocidades del viento más altas, la recolección es más eficiente (Schemenauer & Cereceda, 1994b).

La influencia que tiene la dirección del viento sobre la captura de neblina es despreciable en los tres colectores, incluso en los colectores estándar, ya que reciben la neblina prácticamente en una sola dirección. Esto se debe a que en Galápagos, las masas de aire se desplazan en un solo sentido por la presencia de los vientos alisios del sudeste, y más aún en la época de garúa, donde se observó que el ángulo de la dirección del viento es constante (Domínguez, 2016).

Según la literatura, la presencia de neblina reduce la radiación solar, como es el caso del lado sotavento de Hawaii, en el cual la neblina redujo en 36% la insolación, en Puerto Rico el 48% y en las Islas Canarias el 58% (Eugster et al., 2006; Giambelluca et al., 1991; Ritter et al., 2008).

En San Cristóbal la contribución de la radiación solar en la recolección de neblina es negativa en los tres colectores, lo que significa que mientras menor sea ésta, el contenido de agua capturado se incrementa.

La precipitación influye directamente en la captura de neblina. De acuerdo a (Brauman et al., 2010) las nubes de lluvia bloquean más radiación solar que la niebla, como es el caso del sotavento de Hawaii, en el que la neblina presenta 50% menos radiación que en cielo despejado, y cuando existen nubes de lluvia, la radiación es de 20% a 40% de la del cielo despejado (Brauman et al., 2010), en San Cristóbal es similar, como se observó en la figura 4.6.

Esta relación entre la precipitación y la radiación explican los altos porcentajes de contribución de la lluvia con respecto a la captura de neblina.

4.2.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CON OTROS ESTUDIOS Y APLICABILIDAD

En San Cristóbal se obtuvieron 7.9 L/m²/día en promedio, respecto a la captura de neblina, valor comparable con otros sitios alrededor del mundo (tabla 4.9). Se han reportado 3 L/m²/día, 9 L/m²/día y 30 L/m²/día, en Chile, Perú y Oman,

respectivamente, en la época de neblina (Schemenauer & Cereceda, 1994). La recolección de neblina ha sido relevante en otros sitios como la costa oeste de Sudáfrica, donde se han recolectado 0.4 L/m²/día y 1.3 L/m²/día, en Brand se Baai y Kalkbaken se Kop, respectivamente. En éste último, la recolección de neblina es mayor y se atribuye a que se encuentra a más altura y además la velocidad del viento es mayor, siendo de 5.2 m/s, mientras que en Brand se Baai es de 4.3 m/s (Olivier, 2002). En Cape Columbine el promedio de recolección de agua es de 0.7 L/m²/día, y en cuanto a la neblina el promedio es de 2.4 L/m²/día (Olivier, 2002). De acuerdo al estudio realizado por Ritter et al. (2008), en la isla La Gomera, la recolección de neblina varía entre 0.2 a 5.0 L/m²/día de febrero a julio, y entre 0.1 a 2.1 L/m²/día de agosto a enero, además se menciona que la recolección en Mauna Loa en Hawaii, a 2530 y 1580 msnm, es de 1.9 y 2.1 L/m²/día (Juvik & Ekern, 1978), en Sierra Madre, México, se registran valores entre 0.4 y 1.6 L/m²/día a elevaciones de 1330 a 1900 msnm (Vogelmann, 1973), en Venezuela, en El Zumbador (3100 msnm), Cerro Copey (987 msnm), Cerro Santa Ana (815 msnm), y en Colombia en Maguira (865 msnm), la neblina varía entre 0.2 y 2.2 L/m²/día (Cavelier & Goldstein, 1989).

TABLA 4.9 COMPARACIÓN DE LA NEBLINA RECOLECTADA EN SAN CRISTÓBAL CON OTROS SITIOS

Sitio	Neblina (L/m ² /día)
San Cristóbal	7.9
Chile	3
Perú	9
Omán	30
Brand se Baai- Sudáfrica	0,4
Kalkbaken se Kop-Sudáfrica	1,3
Capa Columbine- Sudáfrica	2,4
Islas canarias (feb-jul)	2,6
Islas canarias (ago-ene)	1,1
Manua Loa-Hawaii (2530 m)	1,9
Mauna Loa-Hawaii (1580 m)	2,1
Sierra Madre-México (1330 m)	0,4
Sierra Madre-México (1900 m)	1,6
*Venezuela	1,2

Elaboración: Echeverría Paola

La captura de neblina en Galápagos está por encima del promedio, encontrándose entre los sitios con mayor potencial de captura de neblina.

La dotación de agua doméstica rural sugerida es de 200 L/hab-día, si se instalaran 5 colectores (50-SFC) de 24 m² cada uno, se cubriría el 100% de la dotación para una finca de 4 habitantes. El déficit de agua para riego en San Cristóbal es de 9.1 L/s y 10.4 L/s, en el año promedio y en el año seco, respectivamente; con la implementación de 67 colectores (50-SFC) de 48 m² en un año promedio, y 76 colectores (50-SFC) de 48 m² en un año seco, el 25% de déficit de agua para agricultura sería cubierto. La disponibilidad de espacio no es una limitación en la zona rural de la isla, además, la configuración del sistema dependerá de las necesidades de cada finca, así como también lo hará el tanque de almacenamiento de agua.

4.2.4 SATISFACCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA EN LA ZONA RURAL DE SAN CRISTÓBAL CON DISPOSITIVOS DE CAPTURA DE NEBLINA

De acuerdo a los resultados obtenidos con el balance hidrológico, se considera que la neblina sí puede ser usada como una alternativa para satisfacer las necesidades de la población.

Con respecto a la demanda de uso agrícola, que es el 99.6% del total de la demanda de agua, el resultado de los cálculos no tendrá una variación significativa si se usan otros cultivos para la determinación del coeficiente único de cultivo, ya que el porcentaje de todos los demás cultivos permanentes solos es el 26%, en Galápagos el café es el cultivo de mayor magnitud.

Los gradientes orográficos de precipitación, evapotranspiración y neblina se obtienen por medio de la información de un año promedio, en las dos estaciones climáticas, a 300 y 600 m de elevación, por lo que describen el comportamiento normal de las variables y es confiable usarlo en este estudio.

El cálculo del ganado, el área cultivada por finca, entre otros, se realizó con la información disponible del CGREG (2014). Estos cálculos son sencillos y con la

información existente es suficiente para dar una estimación confiable de la demanda y el déficit cubierto con la implementación de colectores de neblina.

La cantidad de colectores necesarios para cubrir el 25% y 15% del déficit hídrico en un año promedio y en un año seco, respectivamente, es relativamente pequeña, por lo que se podría satisfacer aún más el déficit de agua en la isla y por franja de elevación, con el aumento del número de colectores. La técnica de captura de neblina es de bajo costo de construcción y mantenimiento, por lo que es factible implementarla a gran escala en la zona rural de San Cristóbal.

La falta de agua en Galápagos es una gran limitación para el desarrollo de actividades productivas, la recolección de neblina es una alternativa viable que podría ayudar también a las fincas ubicadas en zonas costeras, que son pocas ya que la mayoría de terreno pertenece al Parque Nacional Galápagos, y donde no existe neblina, mediante el almacenamiento en tanques del agua recolectada en la parte alta y un sistema de distribución hacia las zonas costeras.

Es posible replicar esta metodología en las otras islas del archipiélago para abastecer de agua a los habitantes y mejorar la producción en el sector agrícola y ganadero, y también en otros sitios con abundante neblina.

RESUMEN

En el período de estudio se obtuvo que la precipitación fue 72 mm, la temperatura fue 18.2°C, la velocidad del viento promedio fue 2.5 m/s y la dirección del viento se mantuvo constante.

Usualmente la precipitación es mayor en la temporada de invierno y la temperatura es mayor en la época de garúa; sin embargo, se observó que esta última tiende a aumentar cada año a 300 y 600 m de elevación. La radiación solar es mayor en invierno, entre marzo y mayo, cuando existe menos nubosidad; y también se registra menos radiación cuando existe neblina. Generalmente, la precipitación es de mayor intensidad en invierno, cuando la radiación solar es más

baja. Este fenómeno ocurre también en otros lugares, como la isla La Gomera, en las islas Canarias (Ritter et al., 2008).

La dirección del viento es constante en la época de garúa en ambas elevaciones, y la velocidad del viento es mayor a 600 msnm. La radiación solar, velocidad del viento, temperatura y evapotranspiración potencial llegan a su máximo durante el medio día; mientras que a esta hora la humedad relativa es mínima. La mayor tasa de intercepción de neblina ocurre entre las 0:00 y 12:00 horas, alcanzando su pico a las 6:00.

En el período de estudio se capturaron 382 mm, 284 mm y 165 mm de neblina con 35-SFC, 50-SFC y la red cilíndrica, respectivamente.

La variable con mayor influencia en la captura de neblina es la velocidad del viento, se recolecta más neblina entre los 5 y 6 m/s en los SFC y entre los 4 y 6 m/s en la red cilíndrica. El porcentaje de contribución es 31%, 53% y 51% en el CFN, 50-SFC y 35-SFC, respectivamente. Esta relación entre la velocidad del viento y la intercepción de neblina se ha encontrado en otros lugares como la costa oeste de Sudáfrica (Olivier, 2002).

Con respecto a la demanda de agua en la zona rural de San Cristóbal, las elevaciones entre 0 y 100 m son las más carentes del recurso; el déficit es mayor en junio, diciembre, enero, febrero, marzo, abril y mayo. El mes más seco en el año promedio es marzo, y en el año seco son marzo, abril y mayo. Existe mayor potencial de captura de neblina en los meses de agosto, septiembre y octubre en el año seco y el año promedio.

La demanda total de agua para consumo humano es 80.3 m³/día, para ganadería es 84.53 m³/día y, para agricultura es 44,598,960.15 m³/año. El déficit de agua de riego es 287,443 m³ y 328,075 m³ en el año promedio y año seco, respectivamente. El colector de neblina más eficiente es el 50-SFC y se estimó que la cantidad de neblina recolectada con 1 m² de este colector es 22.6 m³.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este proyecto de investigación propone el uso de colectores estándar de neblina para mejorar la dotación de agua en la zona rural de San Cristóbal. Se han instalado dos colectores en la estación climática a 600 m de elevación en el barlovento de San Cristóbal, donde se miden las variables climáticas en intervalos de 15 minutos. Esto se ha realizado para cuantificar la neblina capturada por estos dispositivos y determinar los factores y condiciones que favorecen su recolección. Se ha estimado también la disponibilidad de agua y el déficit que existe en la isla, y con base en los resultados obtenidos de la cantidad de neblina recolectada, se ha propuesto un sistema de colectores de 50% de coeficiente de sombra para cubrir un porcentaje de este déficit.

Las conclusiones y recomendaciones del desarrollo de este proyecto se describen a continuación.

5.1 CONCLUSIONES

- Se comprobó que tanto los colectores estándar como la red cilíndrica son propicios para la captura de neblina en el archipiélago, dado que la dirección del viento no sufre variaciones drásticas durante la temporada de garúa.
- Se determinó que existe un déficit de agua en San Cristóbal, principalmente en el sector agrícola, tanto para un año promedio como para un año seco, y es mayor en la zona baja de la isla. Este déficit puede ser cubierto con la implementación de colectores de neblina, ya que el área requerida para la instalación del sistema es pequeña con respecto al tamaño de la finca, o la isla, y además será posible almacenar el agua recolectada en la temporada de garúa para utilizarla en invierno.
- Del análisis meteorológico de tres años hidrológicos y el período de estudio, se comprobó que existen dos estaciones en el año, la temporada

de garúa y la temporada de invierno. Por lo general, la neblina se presenta entre junio y diciembre; es mayor en julio, agosto, septiembre y octubre, y menor en enero, febrero y marzo. La intensidad de neblina es mayor entre las 0:00 y las 12:00, con su máximo a las 6:00. De este análisis también se observó que la cantidad de neblina ha ido decreciendo año tras año, y que la intensidad de neblina del período de estudio es bastante similar al mismo período del año 2015. La velocidad del viento es la variable más influyente en la captura de neblina, mientras mayor, más neblina será capturada, el rango de velocidad del viento más favorable es entre 5 m/s y 6 m/s en los colectores estándar y entre 4 m/s y 6 m/s en el colector cilíndrico.

- El colector 50-SFC es el más eficiente con respecto a la captura de neblina, recolecta 7.9 mm/día; cada finca podría instalar un sistema de colectores de neblina de acuerdo a sus necesidades, como se demostró en este estudio, se puede satisfacer el 25% del déficit de agua con el uso de 67 50-SFC de 48 m² cada uno en un año promedio, y en un año seco es posible satisfacer el 25% de este déficit con la instalación de 76 35-SFC de 48 m² cada uno.
- De esta investigación y con base en los resultados obtenidos, se ha constatado que el uso de estos dispositivos puede contribuir al suministro de agua y mejorar las actividades productivas en Galápagos, gracias a las condiciones climáticas existentes, incluso si están presentes solamente siete meses al año en la época de garúa, ya que el recurso es utilizado en los lugares que no tienen acceso a la red de abastecimiento de agua.
- Adicionalmente, es posible aplicar esta alternativa en las demás islas habitadas del archipiélago, que son Santa Cruz, Isabela y Floreana, donde la escasez de agua es aún peor, sobre todo en las dos primeras, dado que no existen fuentes superficiales de agua permanentes.

5.2 RECOMENDACIONES

- Debe existir un esfuerzo conjunto entre investigadores y las entidades pertinentes, con el fin de que la información sea accesible, y los resultados y avances de las investigaciones sean aplicados para mejorar la situación de la población y su entorno.
- Dada la fragilidad del ecosistema en cuestión, se deben tomar medidas para que la intervención, tanto técnica como social, no ocasione problemas futuros y sea un beneficio integral para los habitantes.
- Se debe socializar el proyecto y realizar capacitaciones sobre el funcionamiento y mantenimiento del sistema de recolección de agua con dispositivos de intercepción de neblina a la comunidad, con el fin de que sea un proyecto autosustentable y los habitantes sean capaces de gestionarlo para su beneficio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- > *Adelinet, M., Fortin, J., d'Ozouville, N., & Violette, S. (2008). The relationship between hydrodynamic properties and weathering of soils derived from volcanic rocks, Galapagos Islands (Ecuador). Environmental Geology, 56(1), 45–58. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-1138-3>*
- > *Alpert, L. (1946). Notes on the weather and climate of Seymour Island, Galapagos Archipelago. Bull Am Met Soc, 27, 200–209.*
- > *Aránguiz, G., Morales, F., Nieto, J., & Silva, G. (2009). Diseño generativo aplicación en sistemas de atrapanieblas en el norte de Chile. Seminario de Diseño Computacional II. Escuela de Diseño, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile.*
- > *Brauman, K. A., Freyberg, D. L., & Daily, G. C. (2010). Forest structure influences on rainfall partitioning and cloud interception: A comparison of native forest sites in Kona, Hawai'i. Agricultural and Forest Meteorology, 150(2), 265–275.*
- > *Cavelier, J., & Goldstein, G. (1989). Mist and fog interception in elfin cloud forests in Colombia and Venezuela. Journal of Tropical Ecology, 5(3), 309–322. <https://doi.org/10.1017/S0266467400003709>*
- > *CEPROEC-SENPLADES. (2014). Diagnóstico y análisis biofísico para evaluación y formulación de escenarios de desarrollo en el Archipiélago de Galápagos. Quito, Ecuador: Informe Técnico CEPROEC IT20014_01.*
- > *Cereceda, P., Hernández, P., Leiva, J., & Rivera, J (2014). Agua de Niebla. Santiago: Pontificia Universidad Católica.*
- > *Consejo de Gobierno del Régimen Especial de Galápagos (CGREG) (2014). Censo de Unidades de Producción Agropecuaria de Galápagos.*
- > *Consejo de Gobierno del Régimen Especial de Galápagos (CGREG) (2014). Principales Características Demográficas de Galápagos Resultados del CENSO 2010. Galápagos: CGREG.*
- > *Changjiang Institute of Survey, Planning, Desining and Research (CISPDR) (2015). La Planificación de los Recursos Hídricos de las Islas Galápagos.*

- > Corell, D., Estrela, M., Valiente, J., Barceló, S., Capel, J. (2014). *Captación de Agua de Niebla en determinados enclaves del Sudeste de la Península Ibérica.*
- > Domínguez, C. (2016). *Integrated hydrogeological study of San Cristobal Island (Galápagos).* Ph.D.Université Pierre et Marie Curie, París.
- > Domínguez, C. G., García Vera, M. F., Chaumont, C., Tournebize, J., Villacís, M., d'Ozouville, N., & Violette, S. (2017). *Quantification of cloud water interception in the canopy vegetation from fog gauge measurements.* *Hydrological Processes*, 31(18), 3191–3205. <https://doi.org/10.1002/hyp.11228>
- > d'Ozouville, N. (2007). *Etude du Fonctionnement Hydrologique Dans les Iles Galápagos: caractérisation d'un milieu volcanique insulaire et préalable à la gestion de la ressource.* Ph.D. Paris: Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
- > Echeverría, P., Domínguez, C., Villacís, M., Violette, S. (2017). *Potencial de la captura de niebla para uso doméstico rural y riego en la isla San Cristóbal, Galápagos, Ecuador.* *International Seminar: Water Harvesting Techniques and Aquifer Recharge. Santiago-Chile*
- > Eugster, W., Burkard, R., Holwerda, F., Scatena, F. N., & Bruijnzeel, L. S. (2006). *Characteristics of fog and fogwater fluxes in a Puerto Rican elfin cloud forest.* *Agricultural and Forest Meteorology*, 139(3), 288–306.
- > Frumau, K. F., Burkard, R., Schmid, S., Bruijnzeel, L. A., Tobón, C., & Calvo-Alvarado, J. C. (2011). *A comparison of the performance of three types of passive fog gauges under conditions of wind-driven fog and precipitation.* *Hydrological Processes*, 25(3), 374–383.
- > Gabriel, G., & Jauze, L. (2008). *Fog water interception by Sophora denudata trees in a Reunion upper-montane forest, Indian Ocean.* *Third International Conference on Fog, Fog Collection and Dew* *Third International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, 87(3–4), 338–351. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2007.11.014>
- > Galindo, E. (2006). *Estadística métodos y aplicaciones.* Prociencia Editores.
- > GIIWS. (2016). *Galápagos Islands Integrated Water Studies.* Paris, Francia.: ENS, UMC.8538 - Laboratoire de Géologie. Recuperado de: <http://www.galapagos-hydrology.fr/>

- > Giambelluca, T. W., & Nullet, D. (1991). *Influence of the trade-wind inversion on the climate of a leeward mountain slope in Hawaii*. *Clim. Res*, 1(3), 207–216.
- > Gischler, C., & Gischler, C. (1991). *The missing link in a production chain: vertical obstacles to catch Camanchaca.se*.
- > Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón San Cristóbal (2012). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2012-2016*.
- > González Iñiguez, A. A. (2013). *Cálculo del balance hídrico a nivel del suelo en la zona agrícola de la cuenca Pelikanbay en la isla Santa Cruz-Galápagos, Ecuador*. Quito.
- > Hernández, P. (12 de Abril de 2011). *Atrapanieblas. Integrado 2011 Atrapanieblas*.
- > Holwerda, F., Burkard, R., Eugster, W., Scatena, F. N., Meesters, A., & Bruijnzeel, L. A. (2006). *Estimating fog deposition at a Puerto Rican elfin cloud forest site: comparison of the water budget and eddy covariance methods*. *Hydrological Processes*, 20(13), 2669–2692.
- > Imteaz, M. A., Al-Hassan, G., Shanableh, A., & Naser, J. (2011). *Development of a mathematical model for the quantification of fog-collection*. *Resources, Conservation and Recycling*, 57, 10–14.
- > Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2010). *Censo 2010*.
- > Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2012). *Principales Resultados: Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos (ENIGHUR) 2011-2012. Ecuador*
- > Ingraham, N. L., & Matthews, R. A. (1988). *Fog drip as a source of groundwater recharge in northern Kenya*. *Water Resources Research*, 24(8), 1406–1410.
- > Juvik, J. O., & Ekern, P. C. (1978). *A climatology of mountain fog on Mauna Loa, Hawaii Island*. Available from the National Technical Information Service, Springfield VA 22161 as PB 80-118805. Price Codes: A 04 in paper copy, A 01 in microfiche. *Technical Report*, (118).
- > Laws, J. O., & Parsons, D. A. (1943). *The relation of raindrop-size to intensity*. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 24(2), 452–460.

- > Molina, J. M., & Escobar, C. M. (s/f). LA NEBLINA COMO FUENTE DE AGUA: Evaluación de su colección en el sur de los Andes colombianos usando mallas de polipropileno. *Avances en Recursos Hidráulicos*, (12), 33–41.
- > Olivier, J. (2002). Fog-water harvesting along the West Coast of South Africa: A feasibility study. *Water SA*, 28(4), 349–360.
- > Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma.
- > Pascual, J. A., Naranjo, M. F., Payano, R., & Medrano, O. (2011). *Tecnología para la recolección de Agua de Niebla*. IV Simposio Internacional Tecnohistoria, Chiapas, México.
- > Pryet, A. (2011). *Hydrogéologie des milieux volcaniques insulaires: apports d'une étude intégrée aux îles Galapagos*. PhD thesis. Paris: Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
- > Pryet, A., Dominguez, C., Tomai, P. F., Chaumont, C., d'Ozouville, N., Villacís, M., & Violette, S. (2012). Quantification of cloud water interception along the windward slope of Santa Cruz Island, Galapagos (Ecuador). *Agricultural and Forest Meteorology*, 161, 94–106.
- > Pryet, A., Ramm, J., Chilès, J.-P., Auken, E., Deffontaines, B., & Violette, S. (2011b). 3D resistivity gridding of large AEM datasets: a step toward enhanced geological interpretation. *Journal of Applied Geophysics*, 75(2), 277–283.
- > Rajaram, M. (2015). *Enhancement of Fog-collection Efficiency of a Raschel Mesh Using Surface Coatings and Geometric Changes*. University of Texas at Arlington.
- > Regalado, C. M., & Ritter, A. (2017). The performance of three fog gauges under field conditions and its relationship with meteorological variables in an exposed site in Tenerife (Canary Islands). *Agricultural and Forest Meteorology*, 233, 80–91.
- > Ritter, A., Regalado, C. M., & Aschan, G. (2008). *Fog Water Collection in a Subtropical Elfin Laurel Forest of the Garajonay National Park (Canary Islands): A Combined Approach Using Artificial Fog Catchers and a Physically Based*

- Impaction Model. Journal of Hydrometeorology*, 9(5), 920–935.
<https://doi.org/10.1175/2008JHM992.1>
- > Robert S. Schemenauer, & Pilar Cereceda. (1991). *Fog-Water Collection in Arid Coastal Locations. Ambio*, 20(7), 303–308.
 - > Sachs, J. P., Sachse, D., Smittenberg, R. H., Zhang, Z., Battisti, D. S., & Golubic, S. (2009). *Southward movement of the Pacific intertropical convergence zone AD[thinsp]1400-1850. Nature Geosci*, 2(7), 519–525.
<https://doi.org/10.1038/ngeo554>
 - > Schemenauer, R. S., & Cereceda, P. (1991). *Fog-water collection in arid coastal locations. Ambio*, 303–308.
 - > Schemenauer, R. S., & Cereceda, P. (1994a). *A proposed standard fog collector for use in high-elevation regions. Journal of Applied Meteorology*, 33(11), 1313–1322.
 - > Schemenauer, R. S., & Cereceda, P. (1994b). *Fog collection's role in water planning for developing countries. En Natural Resources Forum (Vol. 18, pp. 91–100). Wiley Online Library.*
 - > Schemenauer, R. S., & Joe, P. I. (1989). *The collection efficiency of a massive fog collector. Atmospheric Research*, 24(1), 53–69.
 - > Shanyengana, E. S., Henschel, J. R., Seely, M. K., & Sanderson, R. D. (2002). *Exploring fog as a supplementary water source in Namibia. Atmospheric Research*, 64(1), 251–259.
 - > Sicart, J. E., Hock, R., & Six, D. (2008). *Glacier melt, air temperature, and energy balance in different climates: The Bolivian Tropics, the French Alps, and northern Sweden. Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D24).
 - > Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS). (2011). *Valoración de tierras rurales Cantón San Cristóbal Anexos: 1-2. Quito-Ecuador.*
 - > Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS). (2011). *Valoración de tierras rurales Cantón San Cristóbal Anexos: 3-6. Quito-Ecuador.*
 - > Struthers, M. (1997). *Water from fog study on the Cape West Coast. Progress Report: December 1995 to May 1997. CSIR Report ENV/S-1 97018.*

- > Trueman, M., & d'Ozouville, N. (2010). *Characterizing the Galapagos terrestrial climate in the face of global climate change. Galapagos Research, 67, 26–37.*
- > Uehara, Y., & Kume, A. (2012). *Canopy rainfall interception and fog capture by Pinus pumila Regal at Mt. Tateyama in the northern Japan Alps, Japan. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 44(1), 143–150.*
- > U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. (2002). "Harp" type Fog Collector. Reston, VA, USA. USGS. Recuperado de: https://water.usgs.gov/nrp/proj.bib/hawaii/harp_collector.htm
- > Violette, S., d'Ozouville, N., Pryet, A., Deffontaines, B., Fortin, J., & Adelinet, M. (2014). *Hydrogeology of the Galapagos Archipelago: an integrated and comparative approach between islands. The Galapagos: A Natural Laboratory for the Earth Sciences, 204, 167.*
- > Vogelmann, H. W. (1973). *Fog Precipitation in the Cloud Forests of Eastern Mexico. BioScience, 23(2), 96–100. https://doi.org/10.2307/1296569*
- > Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences. New York, USA: Academic press.*