

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA
TRASCOLACIÓN EN LA ISLA SANTA CRUZ**

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

CHRISTIAN GONZALO DOMÍNGUEZ GONZÁLEZ

(christian_dom_1986@hotmail.com)

DIRECTOR: MARCOS VILLACÍS ERAZO, Ph.D.

(marcos.villacis@epn.edu.ec)

Quito, Julio 2011

DECLARACIÓN

Yo Christian Gonzalo Domínguez González, 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.

CHRISTIAN GONZALO DOMÍNGUEZ GONZÁLEZ

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Christian Gonzalo Domínguez González, bajo mi supervisión.

MARCOS VILLACÍS ERAZO, Ph.D
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo, es el resultado del apoyo de varias personas que han participado directa o indirectamente, dándome consejos, ánimo, teniéndome paciencia o poniéndome las cosas más interesantes. A todas estas personas quiero dar un [Millón de Gracias]^{Millón}^{Millón}^{Millón}.

Agradezco a Sophie Violette, Noémi d'Ozouville y a Marcos Villacís, por darme la oportunidad de haber participado en el proyecto *G//WS* liderado por la UPMC de París. A Alexandre Pryet, por brindarme su conocimiento y orientarme hacia el desarrollo del tema de esta tesis. A Pilar, mi compañera de trabajo y de piso, por contagiarme su alegría y optimismo.

Gracias a mis amig@s, que siempre estuvieron presentes en todo momento, en especial en los más difíciles donde me levantaron el ánimo, les agradezco de todo corazón por ser mis amig@s. A Miguel, que me ayudó a realizar esta tesis en LaTeX, sin su ayuda probablemente no la hubiera acabado a tiempo. A Pato, le agradezco todo su apoyo y el darme un techo para escribir este trabajo.

Finalmente, quiero agradecer a mis padres, que me acompañaron durante este proceso de forma incondicional y que entendieron mis ausencias y mis malos momentos. A mis hermanos, que a pesar de la distancia siempre estuvieron atentos en la aventura que significó realizar esta tesis.

DEDICATORIA

Quisiera dedicar esta tesis a todas las personas que han sido una inspiración y un ejemplo a seguir, a es@s trabajador@s que nunca descansan, a es@s que son amig@s incondicionales, y a ellas que siempre contagian su alegría y juventud. Finalmente, este trabajo está dedicado especialmente para tí.

Christian

CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA	V
CONTENIDO	VI
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABLAS	XIV
SIMBOLOGIA	XV
RESUMEN	XVII
ABSTRACT	XVIII
PRESENTACIÓN	XIX
1. GENERALIDADES	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. CONTEXTO	1
1.3. ALCANCE	3
1.4. FINALIDAD	5
2. ZONA DE ESTUDIO	7
2.1. ARCHIPIÉLAGO DE GALÁPAGOS	7
2.1.1. ISLA SANTA CRUZ	8
2.2. GEOLOGÍA	8
2.3. CLIMA	10
2.3.1. REPORTE HISTÓRICO	10
2.3.2. CONDICIONES CLIMÁTICAS	10
2.3.3. VARIABLES METEOROLÓGICAS	12
2.4. SUELOS	15
2.5. VEGETACIÓN	16
2.6. HIDROLOGÍA	17
2.6.1. CUENCAS HIDROGRÁFICAS	17
2.6.2. SISTEMA HÍDRICO DE LA MICROCUENCA DE PELIKAN BAY	19
2.6.3. ELEMENTOS Y FUNCIONES EN EL SISTEMA HÍDRICO	22

3. BASE TEÓRICA	26
3.1. BALANCE HIDROLÓGICO	26
3.1.1. HIDROLOGÍA	26
3.1.2. CICLO HIDROLÓGICO	27
3.1.3. SISTEMA HIDROLÓGICO Y BALANCE HÍDRICO	30
3.2. ESTUDIO DEL THROUGHFALL	34
3.2.1. PRELIMINARES	34
3.2.2. CARACTERIZACIÓN	35
3.2.3. MUESTREO	37
3.2.4. DISEÑO EXPERIMENTAL DE MUESTREO	38
3.3. FUNDAMENTOS DE ESTADÍSTICA	41
3.3.1. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA	42
3.3.2. MUESTREO	45
3.3.3. PRUEBAS ESTADÍSTICAS	48
3.3.4. REGRESIÓN Y CORRELACIÓN	51
3.4. ELEMENTOS DE ESTADÍSTICA ESPACIAL	54
3.4.1. INTRODUCCIÓN	54
3.4.2. EXPLORACIÓN DE DATOS	54
3.4.3. CAMPOS ALEATORIOS	55
3.4.4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL	56
4. METODOLOGÍA	61
4.1. SITIO DE ESTUDIO	61
4.1.1. ZONA DE VILLACÍS	61
4.1.2. ZONA DE MEDIA LUNA	63
4.1.3. PARCELAS DE ESTUDIO	66
4.2. INSTRUMENTACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS	66
4.2.1. ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA	66
4.2.2. DATA LOGGER	66
4.2.3. THROUGHFALL	67
4.2.4. PARÁMETROS CLIMATOLÓGICOS	72
4.2.5. PRECIPITACIÓN	72
4.2.6. OTRAS MEDICIONES	73
4.3. TRATAMIENTO DE DATOS	74
4.3.1. UNIDADES DE THROUGHFALL	74
4.3.2. ERRORES DE LAS MEDICIONES	75
4.3.3. ANÁLISIS DE DATOS	77

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	87
5.1. TEMPORADA DE GARÚA 2010	87
5.2. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA	88
5.3. CLASIFICACIÓN DE LOS COLECTORES	92
5.4. COMPARACIÓN CANALES-COLECTORES	94
5.5. CUANTIFICACIÓN	95
5.6. REPRESENTATIVIDAD ESPACIAL	97
5.6.1. VILLACÍS	97
5.6.2. MEDIA LUNA	99
5.7. ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO	100
5.7.1. VILLACÍS	101
5.7.2. MEDIA LUNA	104
5.8. VARIABILIDAD ESPACIAL RESPECTO A LA PRECIPITACIÓN	107
5.9. VARIABILIDAD TEMPORAL	108
5.9.1. ESTABILIDAD	109
5.10. VARIOGRAMA TEMPORAL	111
5.10.1. VILLACÍS	111
5.10.2. MEDIA LUNA	113
5.11. TIME STABILITY PLOTS	113
5.12. RELACIÓN DEL THROUGHFALL CON VARIABLES METEOROLÓGICAS	115
5.12.1. PRECIPITACIÓN	115
5.12.2. OTRAS VARIABLES METEOROLÓGICAS	121
5.13. VEGETACIÓN Y EL THROUGHFALL	124
5.13.1. RELACIÓN PCV-THROUGHFALL	125
5.13.2. INFLUENCIA DE LA VEGETACIÓN EN EL THROUGHFALL	129
5.14. COMPARACIÓN ENTRE VILLACÍS Y MEDIA LUNA	131
5.15. INFLUENCIA DE LA NEBLINA EN LA HIDROLOGÍA REGIONAL	132
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	135
6.1. CONCLUSIONES	135
6.2. RECOMENDACIONES	137
REFERENCIAS	139
ANEXOS	145

A. Anexo A	146
A.1. EQUIPOS	146
A.1.1. ESTACIÓN METEOROLÓGICA	146
A.1.2. CANALES	148
A.1.3. COLECTORES	149
A.2. PROTOCOLO DE CAMPO	152
A.2.1. MATERIALES	152
A.2.2. REQUERIMIENTOS	153
A.2.3. ACTIVIDADES	153
A.2.4. PERMISOS	154
B. Anexo B	155

LISTA DE FIGURAS

1.1. TAREAS DEL PROYECTO GIIWS	4
2.1. MAPA DE LOCALIZACIÓN DEL ARCHIPIÉLAGO DE GALÁPAGOS	8
2.2. MAPA DE LOCALIZACIÓN DE LA ISLA SANTA CRUZ, GALÁPAGOS	9
2.3. TEMPERATURA PROMEDIO MENSUAL EN SANTA CRUZ	13
2.4. PRECIPITACIÓN PROMEDIO MENSUAL EN SANTA CRUZ	14
2.5. ISOYETAS PARA LA TEMPORADA FRÍA Y CALIENTE DE LA ISLA SANTA CRUZ	14
2.6. ZONAS DE VEGETACIÓN Y CONTRASTE CLIMÁTICO EN EL LADO BARLOVENTO DE LA ISLA SANTA CRUZ	16
2.7. MAPA DE LAS UNIDADES TERRITORIALES HIDROLÓGICAS EN SANTA CRUZ	19
2.8. MAPA DE VARIACIÓN DE LAS PENDIENTES EN LA ISLA SANTA CRUZ	20
2.9. VISTA DETALLADA DE LA MICROCUENCA DE PELIKAN BAY	20
2.10. SISTEMA HÍDRICO-GEOLÓGICO EN SANTA CRUZ	21
2.11. POSIBLES MODELOS HIDROGEOLÓGICOS PARA SANTA CRUZ	25
3.1. CICLO HIDROLÓGICO	28
3.2. ESQUEMA DEL SISTEMA HIDROLÓGICO	32
3.3. HISTOGRAMA	44
3.4. BOX & WHISKER PLOT	45
3.5. VARIOGRAMA	58
3.6. MODELOS TEÓRICOS DE VARIOGRAMAS	59
4.1. MAPA DE UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES EN SANTA CRUZ	62
4.2. IMAGEN DE LA ESTACIÓN VILLACÍS: PASTO Y BOSQUE	63
4.3. IMAGEN DE LA ESTACIÓN VILLACÍS: VEGETACIÓN EN EL BOSQUE	65
4.4. IMAGEN DE LA ESTACIÓN MEDIA LUNA: VEGETACIÓN	65
4.5. IMAGEN DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA MEDIA LUNA	67
4.6. IMAGEN DE CANALES DE RECOLECCIÓN EN VILLACÍS	68
4.7. IMAGEN DE COLECTOR EN MEDIA LUNA	70
4.8. IMAGEN DE COLECTORES Y CANALES EN MEDIA LUNA	71
4.9. ESQUEMATIZACIÓN DE LAS PARCELAS DE ESTUDIO	71

4.10. DISPONIBILIDAD DE DATOS	76
4.11. CLASIFICACIÓN DE COLECTORES	78
4.12. COMPARACIÓN ENTRE COLECTORES Y CANALES	79
4.13. DIAGRAMA DE FLUJO 1	80
4.14. DIAGRAMA DE FLUJO 2	83
5.1. REGISTROS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA DE LA ESTACIÓN DE BELLAVISTA	88
5.2. VARIACIÓN HORARIA DE VARIABLES METEOROLÓGICAS DURANTE EL DÍA	89
5.3. FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ACUMULADA EN VILLACÍS	91
5.4. FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ACUMULADA EN MEDIA LUNA	91
5.5. FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE COLECTO- RES CLASIFICADOS EN VILLACÍS	93
5.6. FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE COLECTO- RES CLASIFICADOS EN MEDIA LUNA	94
5.7. REPRESENTACIÓN DE VALORES DIARIOS DE THROUGHFALL Y PRE- CIPITACIÓN EN VILLACÍS	96
5.8. REPRESENTACIÓN DE VALORES DIARIOS DE THROUGHFALL Y PRE- CIPITACIÓN EN MEDIA LUNA	97
5.9. RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE COLECTORES Y EL ERROR EN VILLACÍS	99
5.10. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS COLECTORES EN LA PARCELA DE VILLACÍS	102
5.11. VARIOGRAMA EXPERIMENTAL Y TEÓRICO ESPACIAL DE VILLACÍS	103
5.12. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL THROUGHFALL EN VILLACÍS	104
5.13. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS COLECTORES EN LA PARCELA DE MEDIA LUNA	106
5.14. RELACIÓN ENTRE EL COEFICIENTE DE VARIACIÓN Y LA PRECIPITACIÓN TACIÓN	107
5.15. VARIABILIDAD TEMPORAL DEL THROUGHFALL RELATIVO POR EVEN- TOS EN VILLACÍS	108
5.16. VARIABILIDAD TEMPORAL DEL THROUGHFALL RELATIVO POR EVEN- TOS EN MEDIA LUNA	109

5.17. ESTABILIZACIÓN DEL THROUGHFALL RELATIVO Y DEL ERROR RESPECTO A LA PRECIPITACIÓN EN VILLACÍS	110
5.18. ESTABILIZACIÓN DEL THROUGHFALL RELATIVO Y DEL ERROR RESPECTO A LA PRECIPITACIÓN EN MEDIA LUNA	111
5.19. VARIOGRAMA EXPERIMENTAL Y TEÓRICO TEMPORAL EN VILLACÍS	112
5.20. VARIOGRAMA EXPERIMENTAL Y TEÓRICO TEMPORAL EN MEDIA LUNA	112
5.21. TIME STABILITY PLOT EN VILLACÍS	114
5.22. TIME STABILITY PLOT EN MEDIA LUNA	115
5.23. GRÁFICOS DE DIAGNÓSTICO DE REGRESIÓN ENTRE LA PRECIPITACIÓN Y EL THROUGHFALL EN VILLACÍS	117
5.24. RELACIÓN ENTRE LA PRECIPITACIÓN Y EL THROUGHFALL EN VILLACÍS	118
5.25. INTERVALOS DE CONFIANZA DE LA RECTA DE REGRESIÓN PARA LA PRECIPITACIÓN Y EL THROUGHFALL EN VILLACÍS	118
5.26. GRÁFICOS DE DIAGNÓSTICO DE REGRESIÓN ENTRE LA PRECIPITACIÓN Y EL THROUGHFALL EN MEDIA LUNA	119
5.27. RELACIÓN ENTRE LA PRECIPITACIÓN Y EL THROUGHFALL EN MEDIA LUNA	120
5.28. INTERVALOS DE CONFIANZA DE LA RECTA DE REGRESIÓN PARA LA PRECIPITACIÓN Y EL THROUGHFALL EN MEDIA LUNA	121
5.29. RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS Y EL THROUGHFALL RELATIVO EN VILLACÍS	122
5.30. RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS Y EL THROUGHFALL RELATIVO EN MEDIA LUNA	123
5.31. RELACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DE LA PRECIPITACIÓN Y EL THROUGHFALL	123
5.32. RELACIÓN ENTRE EL PAI Y EL THROUGHFALL EN VILLACÍS	126
5.33. EJEMPLO DE FOTOGRAFÍA PARA OBTENER EL PCV	126
5.34. EJEMPLO DE FOTOGRAFÍA DE UN COLECTOR MOJADO EN VILLACÍS	127
5.35. EJEMPLO DE FOTOGRAFÍA DE UN COLECTOR SECO EN VILLACÍS . .	128
5.36. RELACIÓN ENTRE EL PAI Y EL THROUGHFALL EN MEDIA LUNA . . .	128
5.37. EJEMPLO DE FOTOGRAFÍA DE UN COLECTOR MOJADO EN MEDIA LUNA	129
5.38. EJEMPLO DE FOTOGRAFÍA DE UN COLECTOR SECO EN MEDIA LUNA	130

5.39. COMPARACIÓN ENTRE VILLACÍS Y MEDIA LUNA DE LAS PRINCIPALES VARIABLES METEOROLÓGICAS	132
5.40. BALANCE HÍDRICO EN LAS PARCELAS DE VILLACÍS Y MEDIA LUNA .	134
A.1. CONSTRUCCIÓN DE LA ESTACIÓN VILLACÍS	147
A.2. FOTOGRAFÍA DEL DATALOGGER	147
A.3. CANALES DE RECOLECCIÓN	148
A.4. DETALLE DEL INTERIOR DEL PLUVIÓMETRO AUTOMÁTICO	149
A.5. CALIBRACIÓN DE LOS CANALES	150
A.6. PARCELA DE MEDICIÓN	151
A.7. MEDICIÓN DE UN COLECTOR	151
B.1. NUBE DE VARIOGRAMA PARA LA NOVENA SEMANA DE MEDICIÓN .	156
B.2. VARIOGRAMA EXPERIMENTAL Y MODELO DE VARIOGRAMA TEÓRICO PARA LA NOVENA SEMANA DE MEDICIÓN	156

LISTA DE TABLAS

3.1. INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁRBOLES EN EL THROUGHFALL Y STEMFLOW	36
4.1. ESPECIES EN EL PASTO DE LA ESTACIÓN VILLACÍS	64
4.2. ESPECIES EN EL BOSQUE DE LA ESTACIÓN VILLACÍS	64
4.3. RESUMEN DE LA CALIBRACIÓN REALIZADA EN LOS CANALES	75
5.1. RESUMEN ESTADÍSTICO DESCRIPTIVO DE VILLACÍS Y MEDIA LUNA	90
5.2. CLASIFICACIÓN DE COLECTORES EN VILLACÍS	92
5.3. CLASIFICACIÓN DE COLECTORES EN MEDIA LUNA	93
5.4. COMPARACIÓN DE LOS GRUPOS DE COLECTORES CON LOS CANALES	95
5.5. RESUMEN DE CUANTIFICACIÓN DE THROUGHFALL PARA TODO EL PERIODO DE ESTUDIO A PARTIR DE LOS CANALES EN VILLACÍS Y MEDIA LUNA	96
5.6. RESUMEN ESTADÍSTICO RELACIONADO A LA REPRESENTATIVIDAD ESPACIAL EN VILLACÍS	98
5.7. RESUMEN ESTADÍSTICO RELACIONADO A LA REPRESENTATIVIDAD ESPACIAL EN MEDIA LUNA	100
5.8. RESUMEN DEL ANÁLISIS DE VARIOGRAMAS	105
5.9. RESUMEN DEL ANÁLISIS DE REGRESIÓN EN VILLACÍS	116
5.10. RESUMEN DEL ANÁLISIS DE REGRESIÓN EN MEDIA LUNA	120
5.11. RELACIÓN DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS CON EL THROUGHFALL	124
5.12. PCV Y AIF EN LAS PARCELAS DE VILLACÍS Y MEDIA LUNA	125
5.13. VARIABLES DEL BALANCE HÍDRICO	133
B.1. DATOS DE LOS 33 COLECTORES EN VILLACÍS PARA LA NOVENA SEMANA DE MEDICIÓN	155
B.2. DATOS DEL VARIOGRAMA EXPERIMENTAL DE LA NOVENA SEMANA DE MEDICIÓN USANDO EL ESTIMADOR DE CRESSIE	157
B.3. CARACTERÍSTICAS DEL VARIOGRAMA TEÓRICO PARA LA NOVENA SEMANA DE MEDICIÓN	157

SIMBOLOGÍA

AIF	Área de índice folial
ΔS	Cambio de almacenamiento
g	Coefficiente de asimetría
r	Coefficiente de correlación
r^2, R^2	Coefficiente de determinación
CV	Coefficiente de variación
CVM	Coefficiente de variación de la mediana
$C()$	Covarianza
$C(h)$	Covariograma
D_o	Descarga en el océano
$MAD()$	Desviación absoluta de la mediana
s, DE	Desviación estándar
S_d	Desviación estándar de la diferencia de dos muestras
σ	Desviación estándar poblacional
\bar{d}	Diferencia media entre dos muestras
θ	Dirección
h	Distancia entre dos puntos (lag)
I	Entrada del sistema
E	Error
S_e	Error estándar de una regresión
ES	Error estándar
$E()$	Esperanza
E_p	Estimado combinado de la varianza de dos muestras
E_v	Evaporación
E_s	Evaporación del suelo
E_a	Evaporación subterránea
$Z()$	Función que depende de una variable que varía en una región
H_0	Hipótesis nula
H_a	Hipótesis alternativa
I_s	Intercepción del suelo
I_N	Intercepción de la neblina

I_v	Intercepción de la vegetación
Δt	Intervalo de tiempo
l	Litros
\bar{x}, \bar{M}	Media
\tilde{M}	Mediana
μ	Media poblacional
$m.s.n.m$	Metros sobre el nivel del mar
n	Número de datos
$N(h)$	Número de pares a una distancia h
N_{min}	Número mínimo
PCV	Porcentaje de cobertura vegetal
P_b	Precipitación bruta
$P_n O_1$	Primer octil
R_a	Recarga del acuífero
O	Salida del sistema
$\gamma()$	Semivarianza
O_7	Séptimo octil
$skew_8$	Sesgo octil
S_f	Stemflow
T_f, T	Throughfall
$\partial T_{i,n}$	Throughfall normalizado en una posición i y un periodo n
$\Delta\theta$	Tolerancia de la dirección
Δh	Tolerancia de la distancia h
T_v	Transpiración de la vegetación
Z	Valor estadístico de la curva normal de frecuencias
W	Valor Estadístico de la prueba <i>Shapiro & Wilk</i>
t	Valor estadístico de la prueba t de de Student
ΔA_a	Variación en el almacenamiento temporal del acuífero
ΔA_s	Variación en el almacenamiento temporal del suelo
ΔA_v	Variación en el almacenamiento temporal de la vegetación
S^2, Var	Varianza
σ^2	Varianza poblacional
tip	Vasculación

RESUMEN

La precipitación es redistribuida mientras atraviesa la vegetación en forma de trascolación o *throughfall* y en forma de escurrimiento por los troncos o *stemflow*. La trascolación es la porción de la precipitación que alcanza el suelo atravesando los espacios libres de la vegetación o goteando directamente de la misma. Bajo ciertas circunstancias, la intercepción de neblina por parte de la vegetación puede ser una entrada adicional de agua, donde la vegetación puede jugar un papel clave. Ésta tiene influencia en la distribución del contenido de agua y en los flujos del suelo, y por ende en la infiltración del suelo.

El monitoreo de trascolación se lo realizó en la temporada de neblina (Junio - Diciembre), en dos parcelas ubicados en la pendiente del lado barlovento de la isla Santa Cruz. El sitio más bajo (parcela de 6x6 m) está bajo un bosque mixto introducido a los 400 m.s.n.m. El sitio más alto (parcela 5x5 m) está bajo arbustos homogéneos endémicos a los 650 m.s.n.m. La medición de la trascolación se las realizó con un conjunto de canales conectados a un pluviómetro automático, y pequeños colectores (30 cm de diámetro) posicionados aleatoriamente en cada parcela.

En la escala regional, se observó una marcada diferencia entre los dos sitios de monitoreo. El sitio más bajo se caracterizó por tener valores de trascolación del 77 % (respecto a la precipitación) y, una variabilidad temporal y espacial alta (39 % - 175 %). Esto puede ser explicado por la discontinua activación de puntos de goteo y por una compleja estructura de la vegetación respectivamente, donde la evaporación prevalece sobre la intercepción de neblina. El sitio más alto se caracterizó por tener una alta trascolación relativa (122 % de la precipitación) y una alta variabilidad espacial (76 % - 282 %). En este caso los valores altos de trascolación pueden ser explicados por la ocurrencia de neblina y la alta variabilidad espacial por la existencia de un borde expuesto al viento, en donde ocurre la mayor intercepción de neblina.

En este estudio, se mostró que, la estructura de la vegetación a escala local y las condiciones ambientales (precipitación, neblina) a escala regional, tienen influencia en la variabilidad espacial y temporal de la trascolación. Poniendo en evidencia la necesidad de realizar este tipo de estudios para establecer el agua potencialmente disponible para la recarga de los acuíferos.

ABSTRACT

Precipitation is redistributed as it moves through the canopy into throughfall and stem-flow. Throughfall is the portion of rain that reaches the forest floor by dripping from the canopy. Under certain circumstances fog interception by the vegetation can be an additional input of water, thus vegetation actually plays a key role in water income to the soil. Vegetation have an influence in the distribution of soil water content and fluxes, hence in soil's infiltration rates.

Throughfall monitoring was performed during the 2010 fog season (June - December), at two plots along the windward slope of Santa Cruz Island. The lower site (6x6 m plot) was located under an introduced mixed forest at 400 m.a.s.l. The highest site (5x5 m plot) was located under homogeneous endemic evergreen shrubs at 650 m.a.s.l. Throughfall measurements were performed with sets of 3m-long troughs dripping to an automatic gauge and small collectors (30 cm diameter) randomly positioned on each plot.

At regional scale, a marked difference was observed between the two monitoring sites. The lower site was characterized with relative throughfall rates of 77 % (of incident rainfall) and high temporal and spatial throughfall variability (39 % - 175 %). These facts can be explained by discontinues activation of dripping points and by a complex vegetation structure respectively, where evaporation prevails over fog interception. While, the highest site was characterized by high relative throughfall (122 % of incident rainfall) and high spatial variability (76 % - 282 %). In this case the higher throughfall can be explained by fog occurrence and the spatial variability by the existence of a fringe exposed to wind blow, where fog interception occurs.

In this study, we showed how vegetation structure variability at plot scale and fog occurrence at regional scale, influence spatial and temporal variability of throughfall. Taking into account the necessity to perform this type of studies to establish available potential water to groundwater recharge.

PRESENTACIÓN

La tesis ha sido estructurada en 6 capítulos, el orden escogido permite adquirir conocimientos secuenciales con el fin de llegar a las conclusiones propuestas. Los capítulos son los siguientes:

- **Capítulo 1:** Los aspectos introductorios y preliminares.
- **Capítulo 2:** Descripción de los aspectos generales de la zona de estudio.
- **Capítulo 3:** El fundamento teórico necesario para diseñar la metodología.
- **Capítulo 4:** Desarrollo de la metodología para el cumplimiento de los objetivos propuestos.
- **Capítulo 5:** Presentación de los resultados y discusión de los mismos.
- **Capítulo 6:** Conclusiones y recomendaciones propuestas para el estudio.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

Esta tesis consiste en un estudio de la trascolación, que es la porción de la lluvia que atraviesa la vegetación y cae en el suelo. Se la realizó en la Isla Santa Cruz, Galápagos, durante la temporada de garúa (Junio-Diciembre) del año 2010. El estudio se enfocó en la cuantificación de la trascolación y en determinar su variabilidad espacial y temporal, proponiendo una interpretación de los factores que la controlan.

Fue necesario la permanencia durante un extenso periodo de tiempo (6 meses) para la recolección de datos, mantenimiento de los equipos y principalmente para tener una mejor comprensión de la problemática que se vive en Galápagos en torno al recurso hídrico, y observar directamente los procesos de redistribución de la precipitación bajo la vegetación, algo esencial para la interpretación de los resultados.

1.2. CONTEXTO

PREÁMBULO

El Archipiélago de Galápagos es uno de los sitios con mayor diversidad (flora y fauna) en el Mundo, es considerado Patrimonio Natural de la Humanidad, Reserva de la Biosfera y sitio Rámsar (PNG, 2010). Galápagos enfrenta grandes amenazas, desde la llegada de especies invasoras hasta una mala administración de los recursos naturales. El acelerado crecimiento demográfico del 6.4 % anualmente (Epler, 2007) y la gran demanda turística (más de 173000 visitantes por año) (PNG, 2010), están ejerciendo gran presión sobre el recurso hídrico (d'Ozouville et al., 2008), principalmente en Santa Cruz que es la isla más poblada con más de 13000 habitantes (INEC, 2010), y es la puerta de entrada a las Islas para la mayor parte de turistas.

En el contexto hidrológico, la isla se caracteriza por la falta de agua superficial, debido a su geología, el agua de lluvia se infiltra rápidamente por grietas y fisuras, y se deposita a grandes profundidades aflorando en los mares. Debido al desconocimiento general que se tiene sobre el sistema hidrológico, las pocas fuentes de agua existentes han sido

sobreexplotadas o contaminadas de alguna forma (d'Ozouville et al., 2008). El agua que proporciona el municipio (bombeada a partir de grietas) para el abastecimiento de la población es de mala calidad, no es agua dulce, es agua salobre y que contiene altas cantidades de coliformes fecales, hidrocarburos y metales pesados (Pryet, en prep.).

En las Islas Galápagos, los estudios sobre la hidrología de las islas son limitados en comparación a otras temáticas como geología, vulcanología, climatología y biología. La primera iniciativa para entender la hidrología e hidrogeología de las islas volcánicas fue de un equipo científico liderado por la Universidad Pierre et Marie Curie, con el proyecto *GIIWS*. El proyecto internacional "Galápagos Island Integrated Water Studies" tiene como finalidad mejorar el entendimiento del ciclo hidrológico del Archipiélago y proveer las directrices adecuadas para la conservación del ecosistema y el manejo de recursos hídricos. El proyecto cuenta con la colaboración del *Parque Nacional Galápagos* y la *Fundación Charles Darwin* como entidades locales y varios organismos internacionales. Actualmente, uno de los objetivos del proyecto es realizar una estimación de la recarga de los acuíferos en la Isla Santa Cruz. El presente estudio pretendió brindar información valiosa para la realización de este objetivo.

CONTEXTO DEL ESTUDIO

La lluvia al tener contacto con la vegetación se redistribuye, la porción de la lluvia que atraviesa la vegetación y llega al suelo se la conoce como Trascolución. Mundialmente la trascolución se la conoce como "Throughfall" y es de esta forma como se la va a llamar de aquí en adelante. La cantidad de throughfall es afectada por la estructura de la vegetación y por varias variables climatológicas. La cuantificación es importante ya que permite determinar la cantidad de agua que entra al suelo, y por ende a los posibles acuíferos colgados que pudieran existir en la parte alta de la isla. Teniendo un mayor conocimiento de estos posibles acuíferos, se podría hacer extracciones de agua dulce en calidad y en cantidad, algo que la isla requiere de urgencia para ayudar a resolver el problema de salud que se tiene por la baja calidad del agua potable que se vive actualmente en la población.

Una característica particular de este estudio es el clima. El clima del Archipiélago es controlado por la interacción de las corrientes oceánicas que lo rodean y los vientos alizos que llegan desde el sureste (Trueman and d'Ozouville, 2010). Se caracteriza por tener dos estaciones durante el año (una caliente y una fría). Durante la época fría que se conoce como Temporada de Garúa, en la parte alta existe una capa casi permanente de neblina, se cree que podría haber un importante aporte de agua adicional al suelo

debido a la intercepción de la neblina por parte de la vegetación.

Además de la cuantificación del throughfall, se estudió sus patrones temporales y espaciales. Su comprensión es importante para brindar información confiable, y ayudar en problemas hidro-ecológicos como el aporte de nutrientes en el suelo, y el crecimiento horizontal de raíces en el suelo.

1.3. ALCANCE

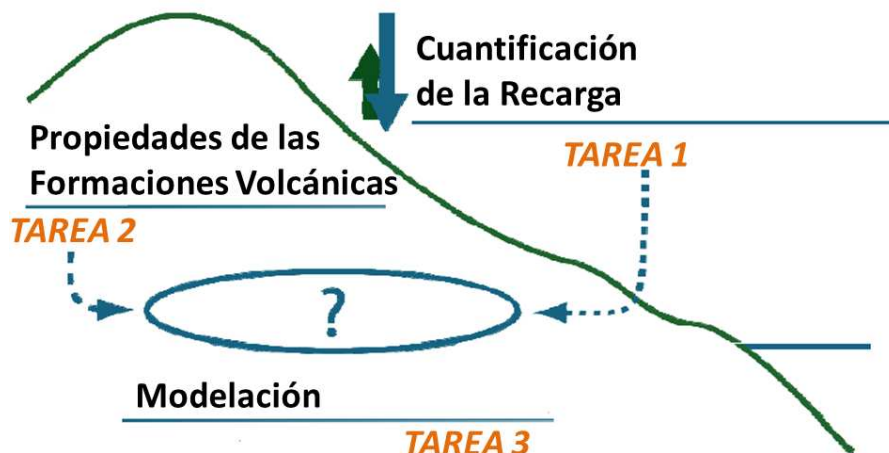
PROYECTO *GIWS*

Es un proyecto de investigación interdisciplinario que tiene como meta el mejorar el conocimiento del ciclo hidrológico del Archipiélago, y proveer directrices tanto para el manejo de los recursos hídricos, y para la conservación de los ecosistemas. El proyecto pretende encontrar un balance entre el desarrollo económico, el impacto local y la conservación de los ecosistemas. Una parte integral de esto, es la necesidad de comprender y cuantificar el ciclo hidrológico como paso esencial para tener un compromiso de conservación de las islas y para el bienestar de las futuras generaciones. Hasta el año 2013, el proyecto tiene propuesto cumplir con tres tareas:

- **Cuantificación de la Recarga:** La entrada de agua al suelo por parte de la precipitación y de la intercepción de neblina por la vegetación a partir de registro climáticos y la implementación de instrumentos para el suelo y la vegetación. Este tesis es un componente de esta tarea.
- **Propiedades de las Formaciones Volcánicas:** Estudio de la morfología y las propiedades hidráulicas a partir de teledetección e investigación de campo.
- **Dinámica de las Aguas Subterráneas:** Creación de modelos analíticos y numéricos, que permitan evaluar diferentes escenarios a partir de estudios de geofísica.

A través de los resultados se va a garantizar que el manejo sustentable del agua sea incorporado en la planeación urbana para reducir la contaminación del ambiente e implementar condiciones sanitarias para la población. Además, una de las insignias del proyecto es la restauración ecológica, y la investigación propondrá la necesidad de vincular las ciencias naturales como la hidrología y la física de suelos con la ecología.

Figura 1.1: Tareas del proyecto GIIWS, donde los estudios se realizan en la Isla Santa Cruz.



Fuente: Sophie Violette.

Este estudio pretende contribuir también al conocimiento de los ecosistemas para definir de mejor manera las investigaciones sobre este tema, donde el agua tiene una posición preponderante.

DETERMINACIÓN DEL THROUGHFALL

Los resultados de este estudio pretenden, en primer lugar, caracterizar el verdadero rol de la vegetación en el ciclo hidrológico de la isla, a partir de la cuantificación del throughfall, considerando que la recarga de los acuíferos es afectada por numerosas variables como el clima, el suelo y la geología; la influencia de la vegetación vendría a ser una de los componentes para el estudio general del proyecto *GIIWS*.

Además, de un modo más práctico, la información de este estudio permitiría ser una referencia para:

- Métodos de Recolección de Agua: En el caso de comprobar que la interceptación de neblina puede ser una entrada adicional de agua al suelo, en la parte alta de la isla, los agricultores y ganaderos podrían implementar un sistema de recolección de agua por medio de mallas verticales, donde se podría aprovechar el agua de la neblina interceptada para el uso agrícola.
- Posibles Usos del Suelo: Procesos biológicos y químicos en el suelo han sido relacionados con los patrones espaciales del throughfall (Zimmermann et al., 2009), tomando en cuenta que éste es una entrada directa de nutrientes en el suelo, se

podría aprovechar esta información para estudios bioquímicos del suelo, como el estudio de la riqueza de nutrientes, la distribución de la humedad y el crecimiento radicular, a partir de esto se tendría un mejor criterio sobre el posible uso del suelo.

- **Influencia en los Ecosistemas:** Actualmente, la invasión de especies introducidas en los ecosistemas del Archipiélago es uno de los graves problemas que enfrenta Galápagos, por ejemplo en Santa Cruz, en la parte alta, la *Cinchona pubescens* introducida en los años 40 (Jäguer et al., 2009), ha invadido una gran área de esta parte de la Isla, se han realizado programas de erradicación de esta especie para la conservación de las especies endémicas. Siendo esto un asunto crucial, una cantidad mayor de throughfall bajo una especie endémica que bajo una especie introducida, demostraría la importancia que tiene la especie como entrada de agua en la isla, y se podría promover aún más la conservación de dicha especie.
- **Manejo de Recurso Hídricos:** En el mundo, el concepto de manejo de recurso hídricos por cuencas hidrográficas se está usando cada vez más, y es algo que falta en Galápagos. Este estudio se realizó en la cuenca bajo el cerro Crocker, que cubre una zona de anidación de especies endémicas dentro del Parque Nacional Galápagos, una zona agrícola y dos zonas urbanas (incluyendo Puerto Ayora donde existe la mayor densidad demográfica del Archipiélago) (d'Ozouville, 2007a). Este estudio, dentro del marco general del proyecto *GIIWS*, al estimar el funcionamiento hidrológico de la cuenca, dotará de herramientas para reconocer la importancia de la correcta administración del mismo, incluso podría incentivar el uso del manejo por cuencas, donde todas las autoridades en estas zonas estarían involucradas.

1.4. FINALIDAD

OBJETIVO GENERAL:

Determinar de forma representativa la cuantificación de la trascolación para la Isla Santa Cruz, Galápagos, mediante el estudio de la variabilidad espacial y temporal del mismo, durante la época de garúa (Julio-Diciembre de 2010), que sirva como guía en el estudio de recarga de los acuíferos, indispensables en el funcionamiento hidrológico dentro de la Isla.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Cuantificar la trascolación bajo dos tipos de vegetación representativas de la región.
- Estimar la representatividad de las mediciones.
- Estimar la variabilidad de la trascolación en el tiempo y en el espacio.
- Interpretar los factores que controlan la variabilidad de la trascolación.

CAPÍTULO 2

ZONA DE ESTUDIO

En este capítulo se da un resumen de los aspectos generales de la zona de estudio. De esta manera se pretende: entender de mejor manera las condiciones en las que se realizó el estudio y conocer las características únicas del sitio. Se va a dar un pequeño resumen sobre el Archipiélago de Galápagos, en especial de la Isla Santa Cruz, desarrollando los siguientes aspectos: ubicación, geología, clima (la mayor parte de esta sección se basa en el trabajo de [Trueman and d'Ozouville \(2010\)](#)), vegetación e hidrología.

Se llegó a la conclusión que Galápagos tiene dos estaciones, una caliente (enero-junio) y una fría (junio-diciembre). En la época fría conocida como temporada de garúa, un nivel de inversión casi permanente que consiste en un tipo de neblina en la parte alta de la isla, en donde puede existir captación de neblina por parte de la vegetación y producirse precipitación oculta. Ésta podría ser una entrada adicional de agua al suelo, e influenciar en la recarga de los acuíferos. Las características del suelo y el estudio de la hidrogeología de la isla es fundamental para entender los procesos de recarga de los posibles acuíferos.

2.1. ARCHIPIÉLAGO DE GALÁPAGOS

El Archipiélago de Galápagos está ubicado en el Océano Pacífico, bajo la línea ecuatorial alrededor de 1000 km de las costas ecuatorianas, donde su centro geográfico está a 0°33.22 Sur y 90°31.26 ([Santos, 2009](#)). Galápagos está ubicado en la confluencia de tres corrientes oceánicas y sus procesos de formación geológica han originado el surgimiento de una fauna y flora única en el mundo ([UNESCO, 2011](#)). Debido a la tardía colonización del hombre y a los esfuerzos de conservación, Galápagos conserva la mayoría de su biodiversidad original (aunque se encuentra en constante peligro), por este motivo ha sido considerado internacionalmente como: Reserva del Patrimonio Natural de la Humanidad, Sitio Ramsar, Santuario de Ballenas, Reserva de Biosfera, entre otros ([PNG, 2011](#)).

El Archipiélago tiene un área aproximada de 8000 km² (el 97 % del área total de Galápagos es considerada como área protegida por el Parque Nacional Galápagos) consta

Figura 2.1: Mapa de localización del Archipiélago de Galápagos ubicado en el Océano Pacífico al Oeste del Ecuador.



Fuente: Alexandre Pryet, (Pryet, en prep.).

de 13 Islas Grandes (superficie superior a 10 km²), 6 medianas (superficie entre 1 a 10 km²) y 107 islotes (superficie menor a 1 km²). Las islas habitadas son: Isabela, San Cristóbal, Floreana, Santa Cruz y Baltra.

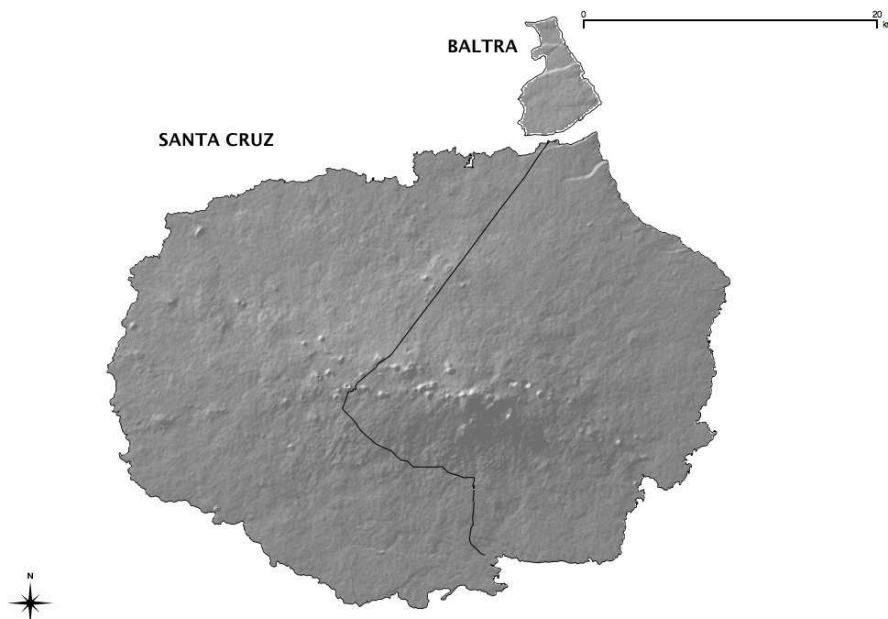
2.1.1. ISLA SANTA CRUZ

Está ubicada en el centro del Archipiélago, es la segunda isla más grande (después de Isabela) con un área total de 986 km², su punto más alto es la punta del Cerro Crocker con una altura de 864 m.s.n.m. En esta isla se encuentra el mayor asentamiento poblacional de Galápagos con aproximadamente 13000 habitantes (INEC, 2010).

2.2. GEOLOGÍA

Galápagos se formó debido a la actividad de un “hot spot” ubicado actualmente por debajo de las islas volcánicas del este, Isabela y Fernandina. Estas erupciones volcánicas ocurrieron hace aproximadamente cinco millones de años, cuyo origen es el producto del manto pluma (White et al., 1993) (columnas de magma que ascienden desde el interior de la Tierra). Las Islas Galápagos se encuentran sobre la placa de Nazca que

Figura 2.2: Mapa de localización de la Isla Santa Cruz ubicada en el centro del Archipiélago de Galápagos.



Fuente: Alexandre Pryet.

se mueve en dirección Este, por este motivo se presenta un modelo en cadena, donde las islas más antiguas se encuentran al Este y las más jóvenes al Oeste. Santa Cruz presenta dos fases de formación (White et al., 1993):

- La primera fase es la serie de lava “Plataforma” formada hace 1.3 millones de años, que originó la base de la Isla y la Isla vecina del Norte, Baltra y Seymour. Estas lavas tienen una morfología de almohada, características de erupciones submarinas y son toleíticas y ferro-basálticas (Pryet, en prep.). No se conoce su geometría actualmente (está bajo la segunda fase de formación), pero puede ser importante en el funcionamiento del sistema de aguas subterráneas de la isla (Pryet, en prep.).
- La segunda fase es la serie de lava “Escudo”, consistió en una serie de erupciones en un sistema alineado de fisuras en dirección E-SE, que originó la forma elíptica de Santa Cruz (Eje mayor de 43 km) (Pryet, en prep.). Los flujos de lava alcali-basáltico pahoehoe durante erupciones en etapas consecutivas se movieron por una red de túneles de lava que actualmente podrían facilitar el drenaje de aguas subterráneas al océano (Pryet, en prep.). Los flujos de lava son bastante impermeables pero también bastante fracturados.

Actualmente, la isla tiene una morfología parecida a un platillo volteado a pesar (forma de las islas del oeste que tienen cráter y calderas), con un perfil basal muy extenso (rectilíneo), luego con pendientes suaves (2-5 %) que van aumentando conforme se llega a la cima (10-12 %) (Santos, 2009). Actualmente la cima no presenta una caldera, ya que la isla se formó a partir de erupciones y fisuras de conos a lo largo del lineamiento ONO-ESE.

2.3. CLIMA

2.3.1. REPORTES HISTÓRICOS

Los primeros datos climáticos de las Islas los presentó [Alpert \(1946\)](#), a partir de la estación climática que la ubicó en la Isla Baltra durante la segunda guerra mundial. En [Palmer and Pyle \(1966\)](#) se relacionó el clima seco de Galápagos con su posición geográfica y condiciones oceanográficas ([Trueman and d'Ozouville, 2010](#)). Posteriormente [Hamann \(1979\)](#) relacionó el clima con el tipo de vegetación. En [Nieuwolt \(1991\)](#) se mostró que el clima es atípico para su ubicación (en la línea ecuatorial). Finalmente el análisis más completo que existe sobre el clima de Galápagos fue desarrollado en [Hutzel \(1995\)](#), usando 14 estaciones meteorológicas en 6 islas, los registros lo llevó a cabo la red del INAHMI, para el periodo de 1955 a 1987. De este estudio se identificó tres formas de lluvia para la zona de costa, de transición y la parte alta. Ahora, se conoce que la precipitación ocurre durante dos temporadas separadas del año, y que la misma es más baja en la costa que en la parte alta.

2.3.2. CONDICIONES CLIMÁTICAS

De una forma muy general, el clima del Archipiélago se lo podría denominar de tipo tropical (en la parte costera), específicamente podría ser considerado como *tropical megatérmico árido a semiárido* según la clasificación descrita en ([Pourrut, 1995](#)). Sin embargo, el clima en Galápagos es muy particular, tiene unas condiciones climáticas únicas debido a su posición en el Pacífico.

El clima es fuertemente influenciado por las corriente marinas y los vientos alisios, que son gobernados por la migración de norte a sur de la *zona de convergencia intra-anual* (ZCIA) ([Trueman and d'Ozouville, 2010](#)). Ésta zona es una banda de aire caliente que

se mueve de 10°N (alrededor de Agosto) a 3°N (alrededor de Febrero). Cuando la ZCIA está al norte de Galápagos, los vientos alicios traen aire frío y corrientes frías desde la Antártica (Alpert, 1946). Y cuando la ZCIA está al sur, cerca de Galápagos, los vientos alicios son reducidos y el agua de los océanos se calienta, teniendo un clima tropical (Trueman and d'Ozouville, 2010).

Debido a este fenómeno, existen dos estaciones que están claramente marcadas (Hammann, 1979): la estación caliente que empieza generalmente en Enero y termina en Mayo, se caracteriza por la presencia de lluvias convectivas, durante esta temporada la mayoría de días son soleados (Trueman and d'Ozouville, 2010). Mientras la época fría (garúa) empieza en Julio y termina en Diciembre, y se caracteriza por la presencia de una capa de inversión, donde existe dos tipos de precipitación (vertical y oculta).

El Pacífico tiene otro factor que modifica el clima en Galápagos, es el fenómeno del Niño (Trueman, 2010). Los eventos del Niño son anomalías en la temperatura de la superficie del océano (mayores temperaturas), debilitando los vientos alicios y fortaleciendo el movimiento hacia el sur del ZCIA. Este fenómeno ocurre irregularmente de 2 a 8 años y se manifiesta en Galápagos con un marcado incremento en las precipitaciones y en la temperatura. En el fenómeno de la Niña ocurre lo contrario, existe una disminución en la temperatura del océano y se manifiesta generalmente con sequías (Trueman and d'Ozouville, 2010). Los últimos eventos del Niño en el Archipiélago han sido en los años 1975-6, 1982-3, 1986-7, 1993-4, 1997-8 (Snell and Rea, 1999) y los años desde el 2002 también han sido considerado como años de este fenómeno (Trueman and d'Ozouville, 2010).

2.3.2.1. TEMPORADA DE GARÚA

Este estudio se ha concentrado en la temporada de garúa, en la Isla Santa Cruz. El levantamiento orográfico del aire húmedo está influenciado por los vientos prevalecientes que llegan del S-SE, los vientos alicios. Estos vientos son enfriados por las corrientes marinas frías, entran a la isla y su movimiento es obstaculizado por una capa seca y más caliente que se produce por encima de los 600 m.s.n.m, de esto se crea una interface llamada *capa de inversión*, donde el aire frío y húmedo está bajo el aire caliente y seco, y por lo tanto se forman nubes en consecuencia de la condensación del agua (Fuente-Tomai, 2011; Pryet, prep). Es por este motivo que durante la época de garúa hay una capa semipermanente de neblina desde los 400 m.s.n.m. Debido a este fenómeno hay

una clara diferencia (nubosidad, temperatura, radiación y humedad) entre la zona del barlovento y la zona del sotovento de la isla, donde la cumbre hace un efecto de sombra sobre la zona del sotavento.

2.3.3. VARIABLES METEORÓLOGICAS

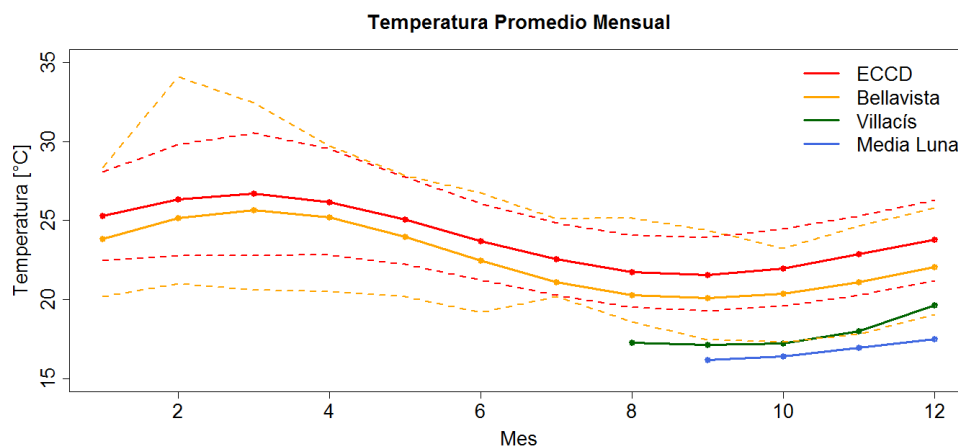
La información para caracterizar estas variables se la obtuvo de dos estaciones históricas operadas por la Fundación Charles Darwin. La primera estación (4 m.s.n.m) ubicada en la Estación Científica Charles Darwin (ECCD) cerca de Puerto Ayora con datos de 1965. La segunda estación (180 ms.n.m) ubicada en Bellavista con datos desde 1987. Además, se ha usado la información de las estaciones construidas por el proyecto GIIWS en el año 2010, la estación Villacís (400 ms.n.m) y la estación Media Luna (640 m.s.n.m) de las cuales se hablará más detenidamente en la sección 4.1.

2.3.3.1. Temperatura

La temperatura del aire es más caliente durante la temporada de invierno que en la temporada de garúa, y está en relación con las oscilaciones anuales de la superficie del mar. En la figura 2.3 se puede ver la variación de las temperaturas mensuales, en donde claramente se nota la diferencia entre las temporadas, y que este cambio está alrededor de junio y julio, y alrededor de diciembre y enero. La temperatura máxima diaria es 5 °C mayor que la mínima durante la mayoría del año a excepción de los meses más calidos (febrero a mayo) donde esta diferencia puede llegar hasta 9 °C ([Trueman and d'Ozouville, 2010](#)).

Haciendo comparaciones entre las estaciones, en general, la temperatura en Bellavista es menor que en Puerto Ayora, para la mayoría de meses, a excepción de los más calientes, donde para ciertos casos ha sucedido lo contrario. En [d'Ozouville \(2007b\)](#) se determinó el decrecimiento del gradiente de temperatura en relación a la altura, en donde se calculó un gradiente promedio de -0.8 °C cada 100 m de altura. [Trueman and d'Ozouville \(2010\)](#) considera que es razonable que exista un enfriamiento significativo en la parte alta de la isla, en especial en la temporada de garúa, donde apenas se recibe 3 horas de luz al día, y en la temporada de invierno sólo 6 horas.

Figura 2.3: Temperatura promedio mensual en la pendiente sur de la Isla Santa Cruz. Las líneas entrecortadas representan las máximas o mínimas temperaturas mensuales. Nótese la disminución de temperatura mientras más alta está la estación.



Fuente: Autor.

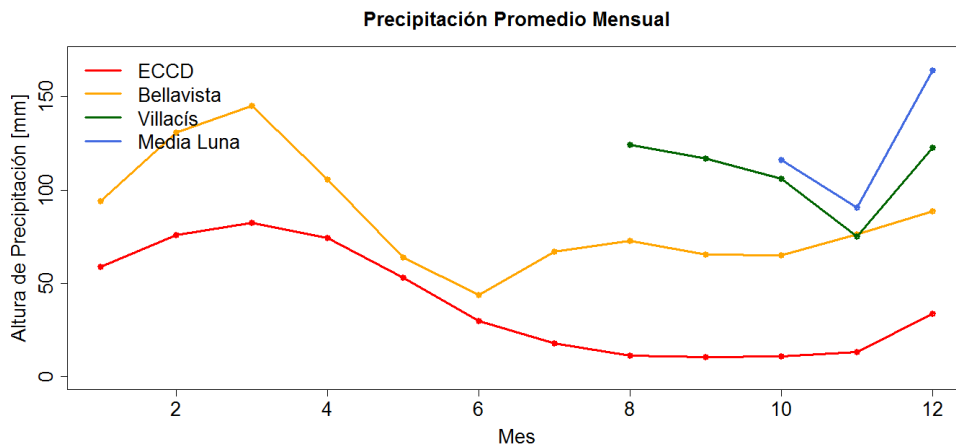
2.3.3.2. Precipitación

La mediana anual de precipitación en la ECCD es de 271 mm, donde el 71 % de ésta fue en la temporada caliente. La mínima precipitación anual fue de 64 mm en el año 1985 y la máxima fue de 2769 mm en 1983 (Trueman, 2010). La mediana anual de precipitación en Bellavista es de 813 mm, donde el 57 % de ésta fue en la temporada fría. La mínima precipitación anual fue de 448 mm en 1983 y la máxima fue de 2666 mm en 1997 (Trueman, 2010).

La precipitación en Bellavista (180 m.s.n.m) es aproximadamente 3 veces mayor a la precipitación en la ECCD (4 m.s.n.m). A partir de los datos de estas dos estaciones y de otras estaciones a varias alturas, d'Ozouville (2007b) determinó que la precipitación varía dependiendo de la altura, con un gradiente orográfico (varía con el año y la temporada) que varía con una media de 300 mm cada 100 m de altura en la zona barlovento de la isla. Trueman (2010) propuso un dibujo de las isoyetas de la Isla Santa Cruz (figura 2.5) a partir de los datos de 7 estaciones meteorológicas, sin embargo, debido a la variabilidad de la precipitación de año a año, Trueman (2010) advierte que los valores de las isoyetas en altitudes bajas puede multiplicarse hasta 10 veces su valor, y para mayores alturas hasta 5 veces.

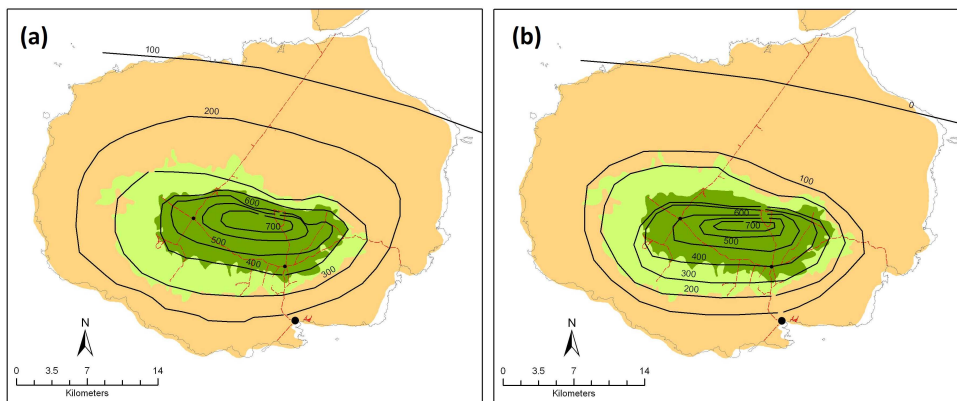
La precipitación es bastante variable en la temporada caliente con ciertos meses en donde no se ha registrado lluvias, a diferencia de lo que es en la temporada fría en donde es bastante consistente año a año y mes a mes (Trueman and d'Ozouville, 2010). La

Figura 2.4: Precipitación promedio mensual en la pendiente sur de la Isla Santa Cruz.



Fuente: Autor.

Figura 2.5: Isoyetas para la temporada fría y caliente de la isla Santa Cruz. (a) Isoyetas para la mediana de precipitación en la temporada de invierno. (b) Isoyetas para la mediana de precipitación en la temporada de garúa.



Fuente: Mandy Trueman (Trueman, 2010).

precipitación en Bellavista es mayor que en ECCD, y en particular durante la época de garúa. Otro hecho interesante, es que el número de días que hubo precipitaciones en la temporada caliente es mucho menor al número de días de la temporada fría para ambas estaciones. Durante la época de garúa existen días con precipitaciones típicas menores a 2 mm (80 % de los datos), en cambio en la temporada caliente las precipitaciones típicas son mayores a 5 mm (40 % de los datos) ([Trueman and d'Ozouville, 2010](#)).

2.3.3.3. Otras variables

La mediana de la velocidad del viento promedio es de 2.4 m/s durante la temporada de invierno, donde la dirección del viento es bastante variable. En la temporada de garúa, la velocidad del viento tiene valores similares pero el viento llega del sur-sureste con baja variabilidad ([Trueman and d'Ozouville, 2010](#)).

Hay mayor cantidad de horas de sol en la temporada de invierno que en la de garúa. Y se ha registrado más horas de sol en Puerto Ayora que en Bellavista ([Trueman and d'Ozouville, 2010](#)).

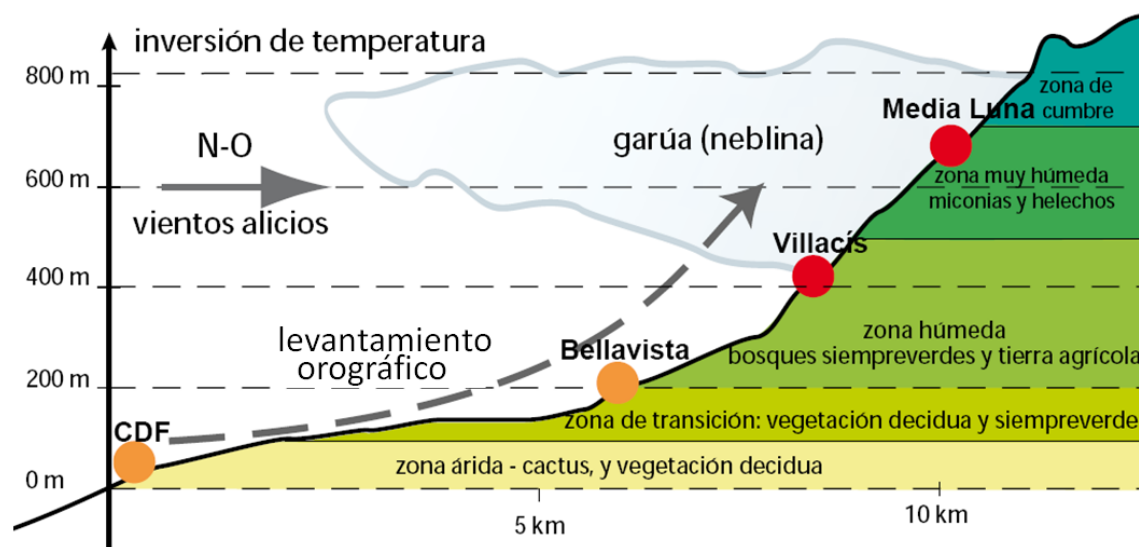
La humedad relativa es consistentemente alta tanto en Puerto Ayora como en Bellavista, en los meses más calientes es un poco más baja ([Trueman and d'Ozouville, 2010](#)).

2.4. SUELOS

Prácticamente toda la isla está cubierta por roca desnuda debido a las condiciones climáticas y a las características volcánicas. Una capa muy delgada de litosoles se encuentra en la zona árida (120 m.s.n.m). Hasta los 300 m.s.n.m el suelo evoluciona, se puede llegar a tener espesores de hasta 1 m, y los suelos tienen textura predominantemente arcillosa y en algunos casos franco limosa a arenosa fina ([Santos, 2009](#)). Entre 300-400 m.s.n.m el suelo proviene de depósitos piroclásticos meteorizados ([Fuente-Tomai, 2011](#)) y son de tipo andosol ([Pryet, en prep.](#)). A alturas mayores a los 400 m.s.n.m el suelo tiene espesores más delgados que varían conforme al sustrato basáltico y a los saltos de las pendientes ([Pryet, en prep.](#)). Existen lavas basálticas fragmentadas en gravas y alteradas a materiales arcillosos, limosos y arenosos.

Actualmente, en base al mapa de características del suelo existente realizado por la [INGALA-PRONAREG-ORMSTOM \(1989\)](#), se realizó un estudio para caracterizar los

Figura 2.6: Zonas de vegetación y contraste climático en el lado barlovento de la Isla Santa Cruz. Los vientos alisios llevan aire húmedo que es levantado a lo largo de la pendiente, provocando un incremento de la precipitación con la altitud. Debido a la ocurrencia de la inversión de temperatura se crea una nube semi-permanente a partir de los 400 m.s.n.m. Los puntos de colores representan la posición de las estaciones de estudio (se hablará más ampliamente en el capítulo 4) a lo largo de la pendiente sur.



Fuente: Alexandre Pryet, (Pryet, en prep.).

tipos de suelo en la isla, en donde la información del mapa podría ser validada. Siendo este el caso, conocer las propiedades físicas de los suelos sería crucial para entender la infiltración o no del agua en los posibles acuíferos.

2.5. VEGETACIÓN

La vegetación de la Isla varía de acuerdo a la altura y a la exposición de los vientos. Se divide en las siguientes zonas:

- **Zona Árida:** Es la zona más extensa, comienza en la costa hasta una altura de 130 m.s.n.m. Se caracteriza por ser bastante seca. Predominan arbusto espinosos y cactus, en general habitan plantas deciduas (Santos, 2009). Las plantas deciduas pierden sus hojas durante la época seca para reducir el consumo de agua. Las especies que están en las costas son capaces de sobrevivir a un ambiente salino.
- **Zona de Transición:** En esta se encuentran plantas deciduas y siempreverdes. En la pendiente sur esta zona alcanza los 200 m.s.n.m (Wiggins and Porter, 1971), mientras que en la parte Norte esta zona ocurre más alto. Esta zona es la más difícil de identificar debido a que no existen especies que sean dominantes (Santos,

2009).

- *Zona Húmeda*: Esta zona se extiende hasta los 500 m.s.n.m, está dominado por bosques siempreverdes, y con especies predominantes como *Scalesias*. Los arbustos están bien desarrollados. También existen epífitas que se desarrollan en los troncos de otros árboles y están generalmente presentes durante la época de garúa en donde está presente la capa de neblina. Esta zona también se la conoce como zona agrícola, ya que es en la que se desarrolla todas las actividades agrícolas de la Isla, en donde se tienen principalmente plantaciones de café y pasto (Santos, 2009).
- *Zona Muy Húmeda*: Es también conocida como la zona de *Miconias* debido a la presencia de este arbusto endémico. Sin embargo, debido a la presencia de animales y plantas introducidos como la *Cinchona*, esta especie ha sido reducida. Además de *Miconias* también se encuentran especies de helechos y de musgos. En esta zona está casi totalmente presente la neblina durante la época de garúa, por eso se la considera como muy húmeda (Santos, 2009).
- *Zona de Cumbre*: En esta zona se encuentra principalmente helechos, musgos y corocillos. Durante la época de garúa esta zona está continuamente húmeda y se puede encontrar en algunos sitios pequeños charcos.

2.6. HIDROLOGÍA

El recurso hídrico constituye uno de los problemas más graves que afecta el desarrollo sustentable del Archipiélago. Este recurso es escaso, y las pocas fuentes de agua están contaminadas o sobreexplotadas. La dificultad para explotarlo radica en el desconocimiento del funcionamiento hidrológico. Santa Cruz, al ser una isla de origen basáltico, la hidrología presenta características particulares, en donde el contexto geológico forma un papel muy importante (Pryet, en prep.). La isla sufre de falta de agua superficial debido a que la roca basáltica tiene muchas fracturas (sección 2.2) y fisuras por las que el agua se filtra fácilmente (d'Ozouville et al., 2008).

2.6.1. CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Se puede decir que es un espacio definido por la línea de cumbres y que tiene un único drenaje natural. Ésta también podría ser una cuenca hidrogeológica si no existe

trasvases de aguas subterráneas de una cuenca a otra. Siendo este el caso, la divisoria topográfica de la cuenca también sería la divisoria para las aguas subterráneas, y este caso se da generalmente para cuencas grandes de más de 1000 a 2000 km² (Santos, 2009). Para cuencas pequeñas se toma en cuenta la hidrogeología de la zona. Para el caso de Santa Cruz, en ningún caso se podría hablar de una cuenca hidrográfica, si no más bien de microcuencas (área menor a 300 km²).

2.6.1.1. Unidades Territoriales Hidrológicas

Fue un trabajo realizado por la [INGALA-PRONAREG-ORMSTOM \(1989\)](#) para delimitar las microcuencas en Santa Cruz (figura 2.7), en donde se tomó en cuenta las siguientes consideraciones:

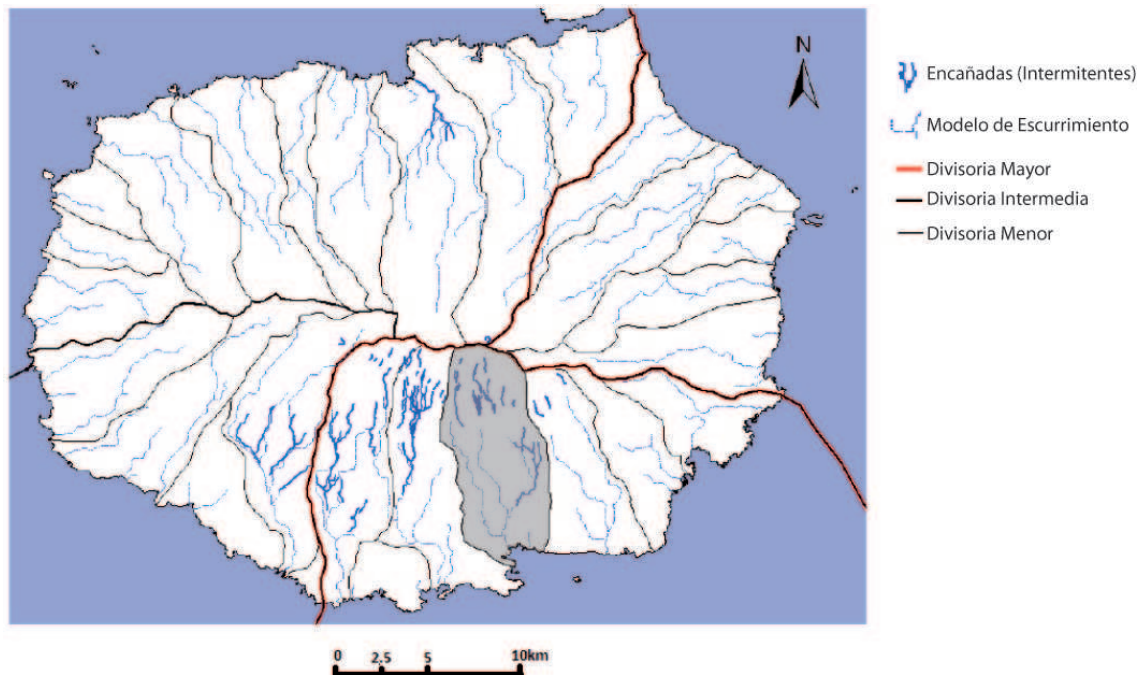
- Al ser una isla, los sistemas de drenaje son radiales, por este motivo el agua fluye hacia todas las direcciones desde un punto central que comúnmente es la parte más alta de la isla.
- El uso de la baltimetría, ya que el relieve marino permite delimitar cuencas más grandes, así se puede integrar a las microcuencas como subsistemas.
- Análisis del modelo digital de elevaciones.

Esta figura también permite observar que el modelo de escurrimiento muestra los posibles curso por los que el agua fluiría pero en condiciones excepcionales. Se puede ver que el modelo de escurrimiento tiene forma radial. Se diferencian dos vertientes principales, la norte y la sur.

2.6.1.2. Microcuenca Pelikan Bay

Podría ser considerada la más importante de la Isla. Se la considera como una microcuenca mayor, con un área de 51.88 km². Forma parte de la vertiente sur del archipiélago, en la vertiente menor de Santa Cruz (sur) y Santa Fé ([INGALA-PRONAREG-ORMSTOM, 1989](#)). La microcuenca tiene una pendiente suave en la mayor parte de su longitud (desde la zona costera hasta Bellavista), la pendiente pasa a ser moderada desde Bellavista hasta el Cerro Crocker prácticamente. Sin embargo, en la figura 2.9 se

Figura 2.7: Mapa de las unidades territoriales hidrológicas (vertientes mayores, menores y división de microcuencas) en Santa Cruz. La zona coloreada es la microcuenca de Pelikan Bay.



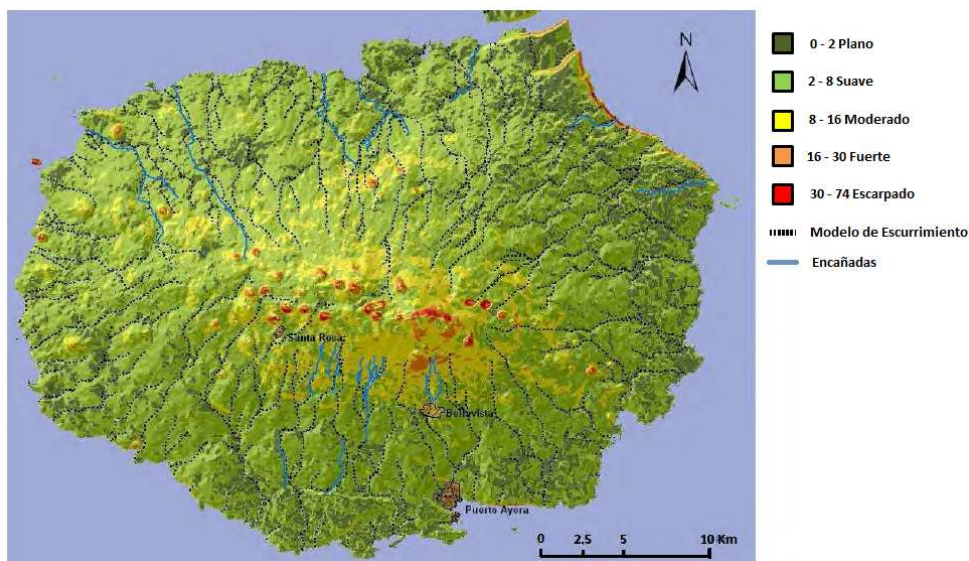
Fuente: Santos (2009).

puede ver que al parecer en las zonas más altas, aunque las pendientes son moderadas, existen algunos cráteres con pendientes escarpadas. Debido a esto los procesos de escurrimiento pueden ser mayores en esta zona, sin embargo, el desplazamiento está condicionado por el tamaño de fisuras y fallas geológicas.

2.6.2. SISTEMA HÍDRICO DE LA MICROCUENCA DE PELIKAN BAY

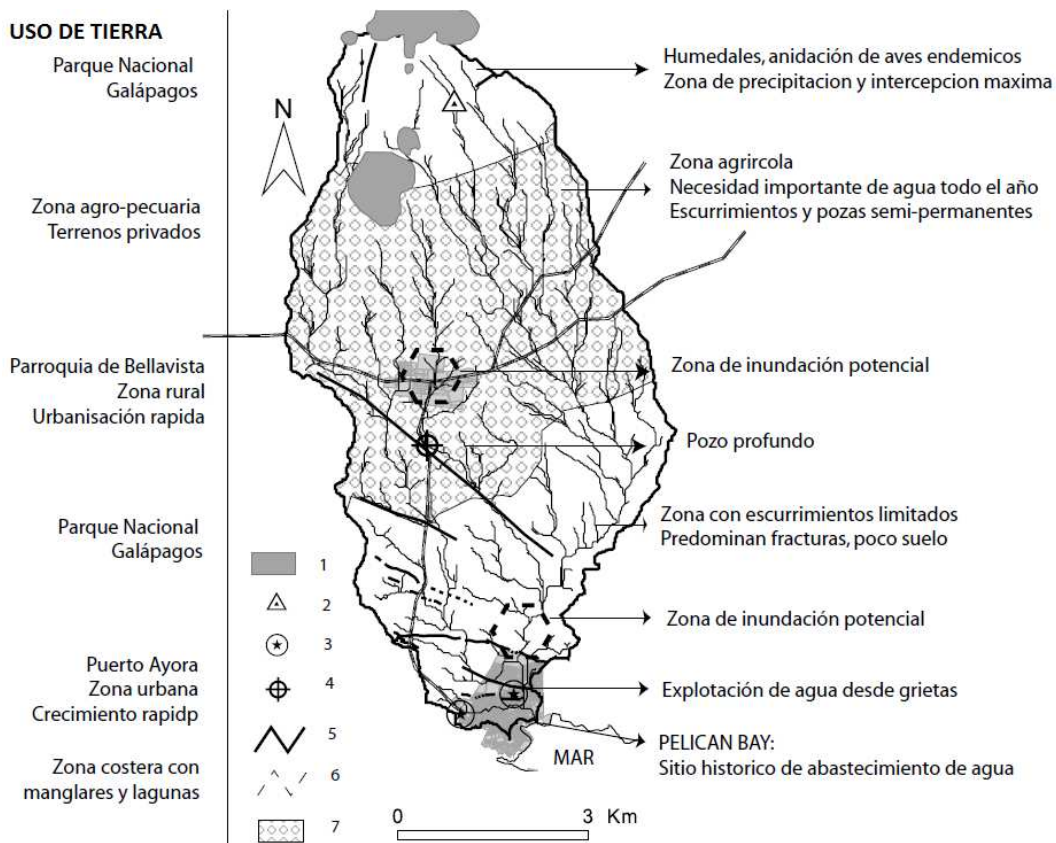
El sistema se lo ha dividido en tres subsistemas, el subsistema atmosférico que constituye los aspectos relacionados con la dinámica del agua superficial, el subsistema subsuperficial que toma en cuenta la dinámica del agua en el suelo y el subsistema subterráneo, que toma en cuenta la dinámica del agua a nivel subterráneo. A continuación se va a hablar sobre los elementos y funciones en el sistema hídrico-geológico. En la sección 3.1.3 se realizará un balance hídrico con los elementos del sistema a pequeña escala.

Figura 2.8: Mapa de variación de las pendientes y posibles modelos de escurrimiento superficial en la Isla Santa Cruz.



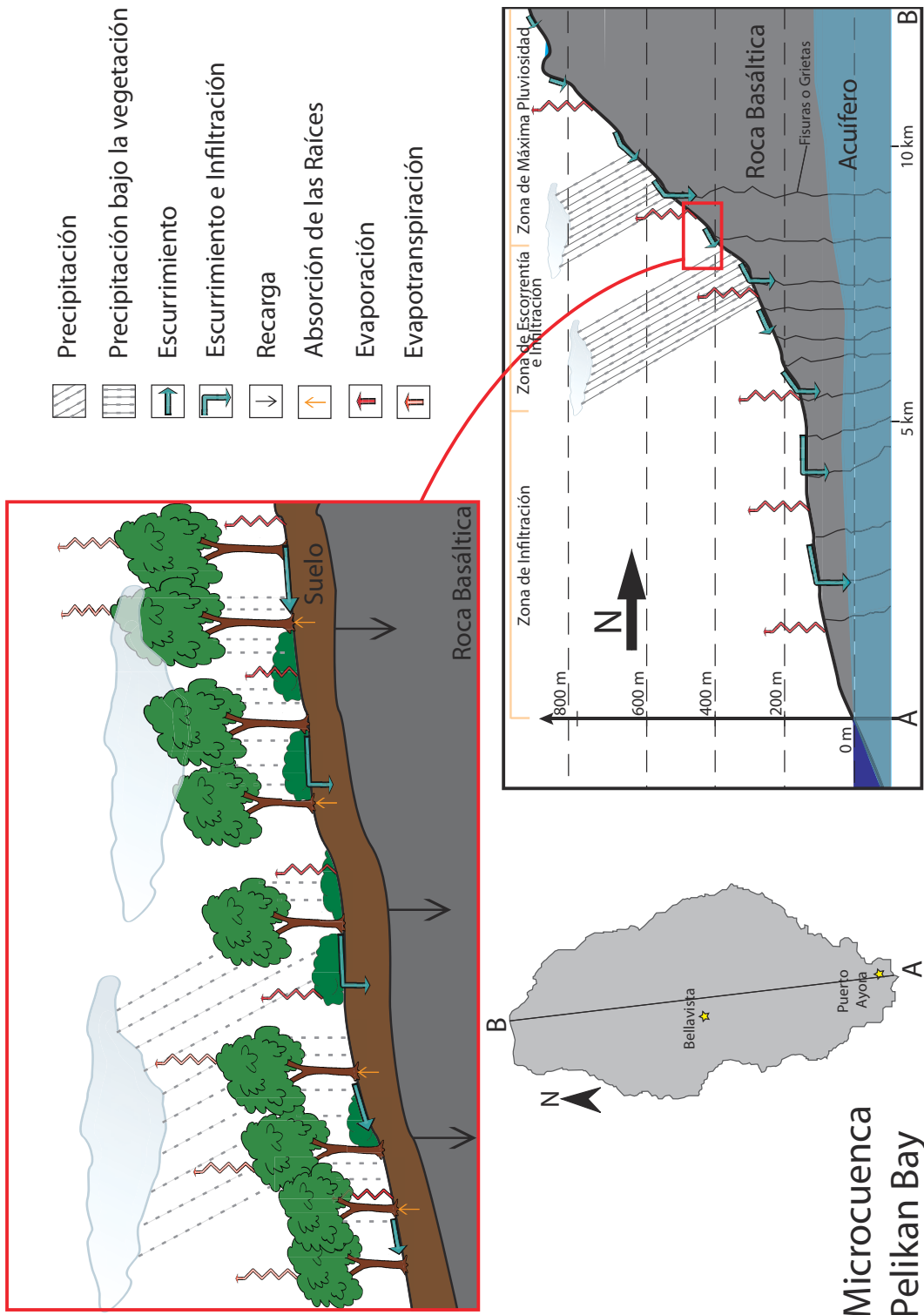
Fuente: Santos (2009).

Figura 2.9: Vista detallada de la microcuenca de Pelikan Bay, donde se señalan los problemas de manejo de recursos hídricos. 1) Cono adventicio. 2) Pequeña presa en Cerro Gallito. 3) Grietas explotadas. 4) Pozo profundo (provee de agua salobre y está en riesgo de contaminación). 5) Fracturas. 6) Red supuesta de ríos. 7) Zona Agrícola.



Fuente: d'Ozouville et al. (2008).

Figura 2.10: Representación del sistema hídrico del perfil de la microcuenca de Pelikan Bay en la Isla Santa Cruz.



Elaborado por: Autor.

2.6.3. ELEMENTOS Y FUNCIONES EN EL SISTEMA HÍDRICO

2.6.3.1. Precipitación

La precipitación tiene como función la recarga del sistema, es la entrada de agua al sistema. La precipitación para Santa Cruz resulta ser muy irregular. Como ya se mencionó previamente en la sección 2.3.3.2, tomando en cuenta el gradiente orográfico, la precipitación anual puede variar desde 300 mm en el área costera hasta más de 1500 mm en la cima de la Isla. Además, los cambios de temporada y la existencia del fenómeno del Niño y la Niña, hacen difícil de estimar un valor representativo. Otro factor a tomar en cuenta, es la posible entrada adicional de agua debido a la precipitación oculta en la temporada de garúa (Pryet, en prep.).

2.6.3.2. Evaporación

Es otro factor que resulta muy complicado estimar. Depende de otros factores, como el tipo de vegetación, temperatura, viento y radiación solar. Durante la temporada de invierno se esperarían altos valores de evaporación, debido a la elevada temperatura. Normalmente, se esperarían tener una mayor evaporación en la parte alta por estar más expuesta al viento y a la radiación solar. Sin embargo, durante la época de garúa, la capa de neblina que cubre la parte alta, reduce las horas de exposición al sol y la temperatura, disminuyendo la evaporación. La evaporación puede presentarse en la vegetación, en el suelo e incluso en subsuelo (rocas basálticas). La evaporación generalmente viene asociada a la evapotranspiración, es el efecto de la evaporación sumándole el efecto de transpiración de las plantas, que absorben el agua del suelo por medio de sus raíces.

2.6.3.3. Infiltración y Escurrimiento

Ambos dependen de las condiciones del suelo y la morfología del terreno. En la microcuenca, se distinguen tres zonas donde ocurren estos procesos de manera diferente:

- En la parte alta, durante la época de garúa se puede encontrar algunos sitios donde existen pequeños almacenamientos de agua, esto es debido al suelo más arcilloso en donde la infiltración toma más tiempo. También pueden ocurrir pequeños escurrimientos dependiendo de las pendientes.

- En la parte media, la escorrentía es mucho menor y la infiltración es mucho más rápida debido a numerosas fallas geológicas y grietas.
- En la parte baja, prácticamente no existe escorrentía, los procesos de infiltración son mucho mayores debido a la escasez de suelo y pendientes suaves, además de la presencia de grietas más abiertas y de túneles de lava que podrían conducir rápidamente el agua hacia el océano.

2.6.3.4. Almacenamiento

Se puede dar al nivel del dósel o en los tallos y troncos de las plantas. Aquí, el agua pasa a evaporarse o finalmente cae en el suelo. En el caso de existir neblina, la vegetación podría interceptarla y tener una entrada más al sistema.

Se puede dar también a nivel de la superficie terrestre, es posible que se formen pequeños almacenamientos de agua en depresiones, formando de esta forma humedales. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que el 74 % de la superficie de la isla corresponde a derrames lávicos que se caracterizan por la falta de suelo y la presencia de grietas y fracturas. A pesar de esto, en la parte alta durante la época de garúa se puede ver en algunos sitios pequeños humedales.

2.6.3.5. Recarga

Es la cantidad de agua dulce que alcanza los acuíferos. Es una entrada al sistema subterráneo, que aumenta la cantidad del recurso subterráneo. El agua de la lluvia para convertirse en recarga tuvo que haber atravesado la vegetación, llegar al suelo, infiltrarse y filtrarse por las rocas hasta el acuífero.

2.6.3.6. Aguas Subterráneas

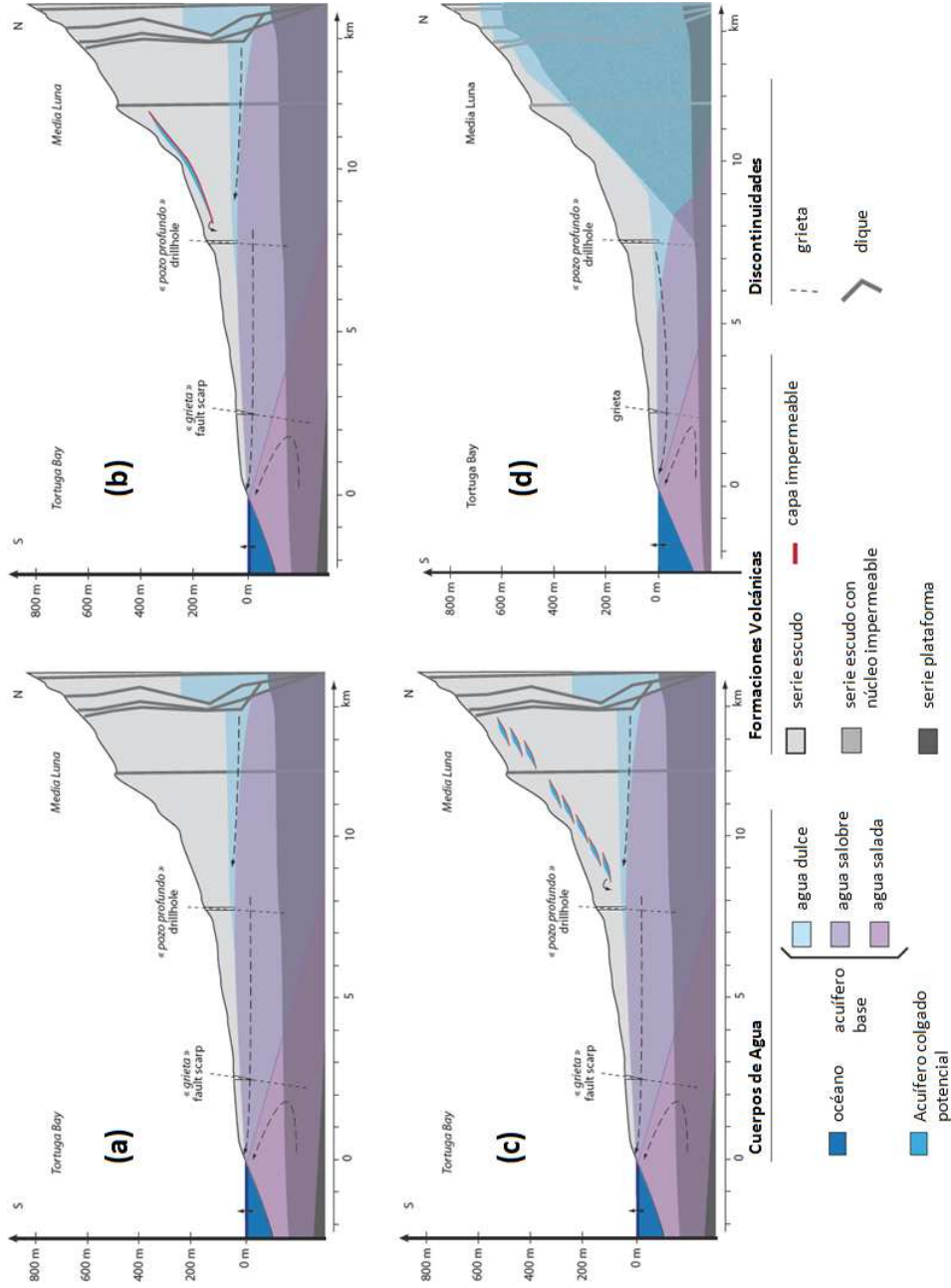
Es el recurso hídrico más abundante de la isla, que se lo ha explotado actualmente y el menos conocido. Los depósitos de agua subterránea se los conoce como acuíferos, los cuales pueden tener distintas configuraciones. Actualmente, no se conoce a que altura está el nivel freático en la Isla. Se cree que el agua que se infiltra por el suelo pasa a ser parte del acuífero, ya que la escorrentía subsuperficial está muy limitada. Las

fallas geológicas que disponen compartimientos a distintos niveles, la disposición de los niveles saturados a distintas alturas y la presencia de diques (intrusiones de magma condensados) que actuarían como barreras hidráulicas (si no están fracturados), son factores que impedirían la existencia de un flujo horizontal.

Existen 3 modelos de acuíferos que pueden corresponder con las características de la isla (Pryet, en prep.):

- *Acuífero Basal Solo*: El acuífero está en equilibrio dinámico con el océano. El agua de las precipitaciones se infiltra en las rocas y se acumula. El acuífero base tendría un lente de agua dulce que está sobre el agua salada por diferencia de densidad, a medida que el agua se acerca a la costa se vuelve más salina. En el centro de la isla a pesar de que pueden encontrarse diques, el agua en ellos estaría muy profunda y en el caso de querer hacer una extracción no sería muy viable.
- *Acuífero Basal y Acuíferos Colgados*: Se mantiene el mismo acuífero basal con la adición de un acuífero colgado que es un depósito de agua que se forma sobre una capa impermeable, el cual se carga con la infiltración. Este acuífero puede ocurrir de dos formas: con una sola capa continua impermeable o por varias capas impermeables en varios niveles, donde el agua se podría descargar de uno a otro.
- *Acuífero Basal con Gradiente Hidráulico Alto en la Parte Alta*: Debido a la presencia de un núcleo de baja permeabilidad el acuífero basal puede alcanzar grandes alturas.

Figura 2.11: Posibles modelos hidrogeológicos para Santa Cruz. (a) Solo acuífero base con equilibrio dinámico con el océano con baja elevación. (b) Acuífero base de baja elevación con un acuífero colgado extenso sobre una capa de baja permeabilidad. (c) Acuífero base de baja elevación con varios acuíferos colgados debido a la discontinuidad de la capa de baja permeabilidad. (d) Acuífero base con grandes alturas por la presencia de un núcleo de baja permeabilidad.



Fuente: Alexandre Pryet.
Modificado por: Autor.

CAPÍTULO 3

BASE TEÓRICA

Este capítulo trata sobre la teoría investigada para el desarrollo de la metodología. Primero, el desarrollo del balance hídrico regional para conocer la posición del throughfall en él. Segundo, información pertinente y específica al throughfall, en especial a diseños de cuantificación de throughfall. Tercero, una breve explicación sobre los conceptos básicos de estadística usados en esta investigación. Finalmente, un resumen de los conceptos básicos de geoestadística.

3.1. BALANCE HIDROLÓGICO

3.1.1. HIDROLOGÍA

3.1.1.1. Definición

Es una ciencia interdisciplinaria que abarca la historia del agua en la Tierra, su ocurrencia (existencia), circulación (movimiento) y distribución, sus propiedades físicas y químicas, su interacción con el medio ambiente y su relación con los seres vivos (Herrera, 2008; Monsalve, 1995).

3.1.1.2. Ecuación Fundamental de la Hidrología

Se basa en los principios de la Mecánica de Fluidos, de conservación de la masa, momentum y de energía. Se refiere a que "lo que entra menos lo que sale es igual a un cambio de almacenamiento", y esto se da en un volumen de control, para un periodo de tiempo (Herrera, 2008).

$$I - O = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (3.1)$$

I : Entrada

O : Salida

ΔS : Cambio de Almacenamiento

Δt : Intervalo de Tiempo

3.1.1.3. Aplicaciones

- Estudio de Control y Conservación del Agua
- Estudio de Obras Hidráulicas
- Drenaje
- Irrigación
- Control de Contaminación
- Control de Inundaciones
- Control de Erosión
- Aprovechamiento Hidroeléctrico
- Preservación del Medio Ambiente

3.1.2. CICLO HIDROLÓGICO

3.1.2.1. Definición

Es una descripción del movimiento del agua en la Tierra, este movimiento es cíclico y continuo, tanto de un punto del planeta a otro, y entre sus estados (líquido, sólido y gaseoso). El flujo de las masas de agua es producido por la energía solar y la gravedad ([Frost, 2004](#)).

3.1.2.2. Componentes Globales

El proceso continuo de movimiento del agua se ha dividido en etapas en donde se tienen los siguientes componentes ([USGS, 2009](#)):

- *Agua en los Océanos*: Representa el 96.5 % del agua en la Tierra, y la cantidad que tiene almacenada es mucho mayor a la que se encuentra en movimiento en el ciclo.

Figura 3.1: Ciclo hidrológico.



Fuente: U.S.G.S, 2009.

- **Evaporación:** Es el proceso mediante el cual el agua pasa de estado líquido a gaseoso, de esta forma el agua líquida en la Tierra (principalmente del Océano) pasa a la atmósfera como vapor de agua.
- **Agua en la Atmósfera:** La atmósfera no es importante almacenador de agua, pero es un medio rápido por el cual el agua puede moverse en la Tierra.
- **Condensación:** Es el proceso por el cual el aire cambia de estado gaseoso a estado líquido, y la principal evidencia de ellos son las nubes. Otra forma de condensación es la neblina.
- **Precipitación:** Es el agua liberada por las nubes en forma de lluvia, nieve o granizo, y es el principal proceso por el cual el agua regresa a la Tierra. La principal forma de precipitación es la lluvia, la cual puede ser:
 - **Lluvias de Convección:** Son típicas de zonas llanas, generalmente son intensas y se producen por el ascenso de aire caliente proveniente de la superficie.
 - **Lluvias Orográficas:** Son típicas en zonas de montaña, su intensidad es variable y se produce por el ascenso de aire húmedo al encontrarse con un obstáculo orográfico (montaña). Son la principal fuente de entrada de agua en las Islas.

- *Lluvias Frontales*: Se producen cuando dos masas de aire (frente caliente y frente frío) se encuentran y son típicas en zonas de clima templado.
- *Agua en Hielos y Glaciales*: Es otra forma en la que está almacenada el agua, y puede estar por largos periodos de tiempo. La mayor cantidad de agua en esta fase se encuentra en la Antártida.
- *Agua de Deshielos*: Se puede considerar una parte importante del movimiento del agua en la Tierra, y se puede evidenciar más en zonas de clima frío.
- *Escorrentía Superficial*: Es la parte de la lluvia que corre sobre el suelo siguiendo su pendiente, cuando el suelo está saturado. Es la principal fuente de alimentación de los ríos.
- *Corrientes de Agua*: Es la cantidad de agua que corre por un río o un arroyo, son de gran importancia para el desarrollo de los seres vivos, y permiten completar el ciclo ya que descargan finalmente en el mar.
- *Almacenamiento de Agua Dulce*: Se encuentra en forma de lagos, estanques y reservorios, y se forma gracias a la entrada de agua de precipitaciones y de escorrentía superficial.
- *Infiltración*: Es el movimiento descendente del agua (proveniente principalmente de las precipitaciones) a través del suelo en dirección de la gravedad.
- *Descarga de Aguas Subterráneas*: Es el flujo que se presenta bajo la superficie de la Tierra, y es una de las principales formas de descarga a corrientes de agua.
- *Transpiración*: Es el proceso por el cual el agua que está en el suelo es tomada por las raíces de las plantas y es llevada hasta los poros de las hojas en donde es transformada en vapor de agua y soltada a la atmósfera.
- *Agua Subterránea Almacenada*: Es el agua que se encuentra bajo la superficie terrestre, y se recarga por el agua lluvia infiltrada desde el suelo. También tiene el nombre de acuífero.

3.1.2.3. Influencia de la Vegetación

Otra componente en el ciclo hidrológico y particularmente importante en este estudio es la participación de la vegetación para los procesos de intercepción y precipitación oculta.

3.1.2.3.1. Intercepción: Comúnmente es el proceso por el cual la precipitación es retenida por la vegetación y finalmente se evapora (Monsalve, 1995). Se considera una pérdida debido a que el agua es evaporada o retenida antes de llegar al suelo. Sin embargo, la vegetación también puede proveer de entradas adicionales de agua al suelo además de la lluvia, y pueden ser considerables, incluso mayor que la evaporación (Holwerda et al., 2010; McJannet et al., 2007).

3.1.2.3.2. Precipitación Oculta: Es la intercepción de la neblina por parte de la vegetación, y ocurre debido a la condensación del vapor de agua. Las pequeñas partículas de agua que están en la neblina son transportadas por el viento, y al aparecer la vegetación (cubierta, hojas, ramas y epífitas), son interceptadas. De aquí se forman gotas más grandes que finalmente pueden caer al suelo (*fog drip*) o evaporarse a la atmósfera (Villegas et al., 2008). Sin embargo, como la neblina se forma en condiciones de alta humedad relativa y de baja radiación solar, el efecto de evaporación puede reducirse. La entrada de agua por la intercepción está relacionada con la duración, tipo y densidad de la neblina, además del área de la vegetación perpendicular a la dirección, y a la intensidad del viento (Ingraham and Matthews, 1988).

La neblina puede ser interceptada por *impactación* (cuando la neblina tiene bajo contenido en agua y vientos fuertes) y *deposición* (cuando la neblina tiene un alto contenido en agua y vientos débiles), la intercepción generalmente aumenta con el viento, sin embargo empieza a disminuir con grandes intensidades del viento (Villegas et al., 2008).

3.1.3. SISTEMA HIDROLÓGICO Y BALANCE HÍDRICO

3.1.3.1. Definiciones

El ciclo del agua representa un sistema global, que resultaría prácticamente imposible de cuantificar, debido a que se necesitaría conocer el aporte total de agua al océano y la evaporación del mismo. Es por este motivo que para un estudio, se considera únicamente los elementos del ciclo que se pueden cuantificar.

Un *sistema hidrológico* es un mecanismo que relaciona la entrada y salida de depósitos de agua, en un tiempo y espacio, es decir, la transferencia de agua en un territorio designado.

El *balance hídrico* es la aplicación de la ecuación fundamental de la hidrología en un

sistema hidrológico.

3.1.3.2. Esquematización

A continuación se presenta una esquematización aproximada de un modelo estocástico del sistema hidrológico para predecir la recarga del acuífero en la Isla Santa Cruz.

El balance hídrico se lo ha realizado en tres niveles (Pryet, en prep.).

3.1.3.2.1. Sistema Atmosférico: La *precipitación proveniente de la atmósfera* (P_b) cae en la vegetación. Ésta se reduce y es distribuida mientras se dirige hacia el suelo (Staelens et al., 2006). La *precipitación neta* (P_n) es la parte de la precipitación que llega al suelo. Ésta precipitación neta, ocurre de dos formas: como *Throughfall* (T_f), porción de la lluvia que alcanza el suelo atravesando la vegetación (Wullaert et al., 2009); como *Stemflow* (S_f), porción de la precipitación que llega al suelo escurriendo por los troncos (Ziegler et al., 2009). De aquí se obtiene la ecuación:

$$P_n = T_f + S_f \quad (3.2)$$

Una parte de la precipitación se queda almacenada en la vegetación produciéndose una *variación en el almacenamiento de la vegetación* (ΔA_v). La porción de agua que no cae al suelo, finalmente es evaporada, como *evaporación en la vegetación* (E_v). A partir de aquí se puede hacer el siguiente balance:

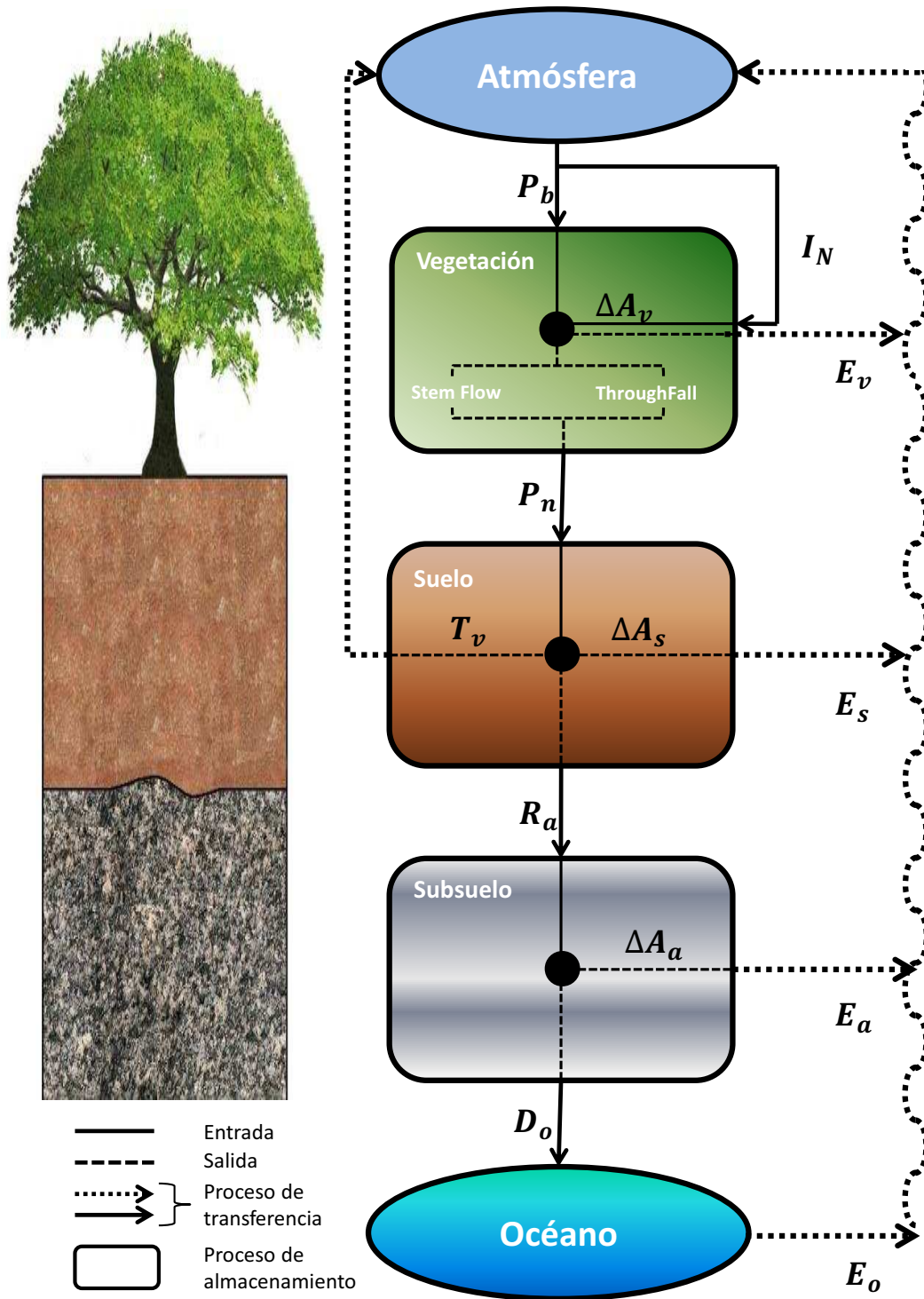
$$P_b = P_n + E_v + \Delta A_v$$

En el caso de la existencia de neblina, existe una entrada adicional de agua al sistema, debido a la intercepción de la neblina, (I_N) por parte de la vegetación. Entonces, la vegetación tiene una importante influencia en el balance, la ecuación general para el balance hídrico a nivel atmosférico queda definida como:

$$P_b + I_N = T_f + S_f + E_v + \Delta A_v \quad (3.3)$$

Finalmente, se simplificará la expresión usando el término de pérdidas por intercepción como *intercepción de la vegetación* (I_v) que es la suma de la evaporación y el cambio de almacenamiento en la vegetación (despreciable generalmente), y usando el término

Figura 3.2: Esquemática del sistema hidrológico regional, dividido en subsistemas: Atmosférico, Sub-supercical y Subterráneo.)



Elaborado por: Autor.

de precipitación neta, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$P_b + I_N = P_n + I_v \quad (3.4)$$

3.1.3.2.2. Sistema SubSuperficial: La entrada de agua al suelo proviene de la precipitación neta. Parte del agua se almacena en el suelo temporalmente (ΔA_s) dependiendo del tipo del tipo de suelo y espesor. Parte del agua almacenada en el suelo puede ser evaporada, como *evaporación del suelo* E_s . La intervención del suelo en el balance se la ha denominado, *intercepción del suelo* (I_s) y es:

$$I_s = E_s + \Delta A_s$$

La transpiración de la vegetación genera una salida de agua al sistema, puesto que las raíces de las plantas toman el agua almacenada en el suelo para sus necesidades, y la cual es finalmente transpirada a la atmósfera. Se asume que toda el agua que toman las plantas de las raíces es transpirada, y se la conoce como *transpiración de la vegetación* (T_v). Otra parte del agua en el suelo se infiltra, y pasa a través de una zona insaturada, se la conoce como *recarga del acuífero* (R_a). A partir de estos elementos se puede hacer el siguiente balance:

$$P_n = R_a + I_s + T_v \quad (3.5)$$

3.1.3.2.3. Sistema Subterráneo: Esto tiene que ver con lo que suceden en el acuífero. La entrada de agua proviene de la recarga del acuífero. El agua del acuífero es descargada en el océano, se lo conoce como *descarga en el océano* (D_o). A estos estratos también puede ocurrir *evaporación subterránea* E_a . Parte del agua se almacena temporalmente en el acuífero ΔA_a , y debido a que los acuíferos se encuentran a gran profundidad no existirían raíces que tomen agua, el balance se lo puede hacer de la siguiente manera:

$$R_a = D_o + E_a + \Delta A_a \quad (3.6)$$

3.1.3.3. Throughfall en la hidrología regional

En muchos estudios se ha encontrado que la cantidad de stemflow tiene relación directa que con las características de los árboles, pero en general, resulta ser muy pequeño en relación a la precipitación (Crockford and Richardson, 2000; Thimonier, 1998), y en

varios casos es despreciable. Previendo que en el estudio actual el stemflow podría ser pequeño comparado con la precipitación y el throughfall, se lo podría despreciar. De la misma manera, por la poca cantidad de stemflow y la dificultad de hacer un constante monitoreo separada de la evaporación y el almacenamiento temporal, se va a considerar a la interceptación de la vegetación como evaporación únicamente. Entonces la ecuación 3.4, se modificaría de la siguiente forma:

$$P_b + I_N = T_f + E_v \quad (3.7)$$

De esta ecuación, se puede interpretar que el throughfall es un término importante en el balance hídrico, no solo porque es la entrada de agua a nivel subsuperficial (y consecuentemente para la recarga del acuífero), pero también permite determinar la influencia que tiene la vegetación en la hidrología de la isla. La estimación del throughfall, nos puede llevar a dos escenarios:

- $T_f < P_b$: Cuando no existe interceptación de neblina (es la caso más común) o la evaporación predomina sobre la interceptación de neblina.
- $T_f \geq P_b$: Cuando la interceptación predomina sobre la evaporación.

En el primer caso se tiene que efectivamente la presencia de la vegetación causa pérdidas en la entrada de agua al suelo, mientras que en el segundo caso la presencia de la vegetación tiene un efecto positivo.

3.2. ESTUDIO DEL THROUGHFALL

3.2.1. PRELIMINARES

3.2.1.1. Definición

El throughfall es “el goteo de la cobertura vegetal como una porción de la precipitación que alcanza el piso forestal sin ser interceptada por las copas” (Thimonier, 1998). Una definición más completa es que “el throughfall es una porción de la lluvia que alcanza el piso forestal como throughfall directo (sin interceptación de la vegetación), en cascada a través de la vegetación o goteando de las copas después de un almacenamiento temporal en la vegetación” (Wullaert et al., 2009). Basándose en estas definiciones se

propone una definición más sencilla, que el throughfall es una parte de la lluvia que atraviesa la vegetación y llega al suelo.

3.2.1.2. Importancia

El throughfall tiene varias implicaciones, en cuanto a la hidrología como se ha mencionado anteriormente, es una parte importante de la precipitación y la entrada principal de agua al suelo en bosques. Además permite determinar la influencia de la vegetación en la hidrología regional. Además de la hidrología, debido a sus características, el throughfall puede afectar la heterogeneidad bioquímica y procesos ecológicos que suceden en el suelo bajo vegetación (Staelens et al., 2006; Wullaert et al., 2009). Se ha visto que nutrientes pueden ser transferidos al suelo directamente y con gran proporción a través del throughfall (Cavalier et al., 2007). El agua que se encuentra en el suelo bajo la vegetación es importante como aporte de nutrientes para las plantas y se realizan muchos procesos microbiológicos (Raaijmakers et al., 2002). Siendo éste el caso, lugares de gran cantidad de throughfall estimulan el crecimiento horizontal de las raíces de plantas y su distribución (Staelens et al., 2006).

El throughfall también puede afectar la erosión del suelo bajo la vegetación y escorrentías en el caso de existir, por lo tanto es importante para el estudio de la influencia de la cobertura vegetal en los procesos erosivos y la formación de escorrentía (Belmonte et al., 1996).

3.2.2. CARACTERIZACIÓN

3.2.2.1. Problemática

Existe una gran dificultad en la medición del throughfall, porque se ha visto una considerable variabilidad espacial (tanto regional como local) del throughfall (Holwerda et al., 2006; Raaijmakers et al., 2002; Lloyd and Marques, 1988; Ziegler et al., 2009; Zimmermann et al., 2009). Además de esto, existe el problema de la existencia o no de estabilidad temporal en los patrones espaciales (Staelens et al., 2006; Wullaert et al., 2009).

3.2.2.2. Factores de Influencia

■ Vegetación

Es uno de los factores más influyentes, pues el grado de heterogeneidad del throughfall depende directamente del grado heterogeneidad de la vegetación. Dependiendo de una alta carga epífita y la posición de las hojas de la cubierta vegetal, se pueden crear puntos de goteo (Wullaert et al., 2009), los cuales pueden afectar mayormente la variabilidad espacial. Existen ciertas características de los árboles que repercuten en la estimación del throughfall y stemflow (Fuente-Tomai, 2011; Crockford and Richardson, 2000), como puede verse en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Influencia de las características de los árboles en el throughfall y stemflow

Característica		Throughfall	Stemflow
<i>Tamaño de la Corona respecto al Tronco</i>	Mayor	Desfavorece	Favorece
	Menor	Favorece	Desfavorece
<i>Forma de las Hojas</i>	Concava	Desfavorece	Favorece
	Convexa	Favorece	Desfavorece
<i>Dirección de las Hojas</i>	Hacia Arriba	Desfavorece	Favorece
	Hacia Abajo	Favorece	Desfavorece
<i>Angulo de las Ramas</i>	Empinadas	Desfavorece	Favorece
	Horizontales	Favorece	Desfavorece
<i>Corteza de las Ramas</i>	Rugosas	Favorece	Desfavorece
	Lisas	Desfavorece	Favorece
<i>Obstrucciones en las Ramas</i>		Favorece	Desfavorece

Elaborado por: Autor.

■ Precipitación

Es otro factor de variación del throughfall, en donde la influencia se ve relacionada a la cantidad y la duración de un evento de lluvia (Staelens et al., 2006; Raat et al., 2002). En cuanto a la cantidad, ésta tiene una relación inversa con la variabilidad del throughfall, a mayor intensidad, menor es la variabilidad (Carlyle-Moses et al., 2004; Staelens et al., 2006; Ziegler et al., 2009). En cuanto a la duración, en eventos donde la vegetación logra saturarse completamente, existe una mayor cantidad de throughfall que en eventos donde la vegetación no logra saturarse

completamente.

- **Temporada**

La temporada del año también puede afectar el throughfall, en especial a su estabilidad temporal. Dependiendo de la estación se tiene cambios en las características de la lluvia (intensidad, duración) o la falta de ella en ciertos casos. También afecta la vegetación y por ende a la variabilidad espacial del throughfall. La presencia de neblina en ciertas temporadas puede afectar directamente la cantidad del throughfall (Holwerda et al., 2006).

- **Factores Meteorológicos**

Pueden ser factores de influencia, como el viento que ayuda en el proceso de intercepción de la neblina. La temperatura, la humedad relativa, la intensidad solar y el viento que influyen en la evaporación y por lo tanto en las pérdidas por intercepción.

3.2.3. MUESTREO

3.2.3.1. Equipamiento

3.2.3.1.1. Tipo de Colector

- *Exposición de los Colectores:* Pueden ser colectores que estén siempre expuestos al medio ambiente o que se cierren automáticamente en periodos secos, en donde al detectar (por medio de un sensor) gotas de lluvia se abre automáticamente (Thimonier, 1998). Los últimos son mucho más convenientes pues reducen la evaporación y la entrada de agentes indeseados, aunque resultan mucho más caros y se necesita una fuente de energía mayor.
- *Modo de Recolección:* La recolección de throughfall se la puede realizar mediante el uso de colectores individuales y canales. Los colectores son parecidos a pluviómetros. Se pueden utilizar varios y son convenientes porque no ocupan mucho espacio, son relativamente baratos y su instalación es sencilla. Los canales tienen un área más grande, y al ser largos pueden representar una mayor serie de condiciones de la vegetación. Su instalación es más complicada y requieren una pendiente mínima, por lo que se necesita mayor espacio y altura. Un problema que existe con los canales es que al tener un área mayor, está más expuesta a la

evaporación, y en el caso de eventos de lluvia pequeña son menos precisos que los colectores individuales. En el caso de una vegetación heterogénea en donde existe una alta variabilidad del throughfall, los canales tendrían muestras más representativas (Crockford and Richardson, 1990). Otro modo de recolección es el uso de grandes redes plásticas, de esta manera se puede superar el problema de variabilidad pero solo se pueden utilizar en estudios de corto tiempo, y se debe de regar continuamente el suelo bajo las redes (Crockford and Richardson, 2000).

3.2.3.1.2. Diseño del Colector: El colector debe estar diseñado para evitar la entrada de gotas que han chocado con el suelo, por lo que tiene que tener una altura suficiente, pero no tan alto para ser afectado por corrientes de viento. También debe de ser diseñado para evitar que salga agua del mismo, evitar la evaporación excesiva, tener pendientes suficientes. El diámetro y el tamaño del almacenador (en el caso de colectores individuales) deben de ser adecuado dependiendo de la cantidad de throughfall esperado en la zona. El material es importante en especial si se desea hacer un análisis químico, debe ser de materia inerte, que se pueda limpiar fácilmente y ser bastante liso para que permita el fácil drenaje del agua, el polietileno es un buen candidato como colector (Thimonier, 1998).

3.2.4. DISEÑO EXPERIMENTAL DE MUESTREO

El diseño de muestreo tiene que ver con la forma, distribución y tamaño de las unidades de muestreo. En este caso, se asigna una probabilidad de seleccionar una serie de unidades de muestreo en el universo de muestras (Zimmermann et al., 2010). Un diseño adecuado, provee de muestras más representativas y por lo tanto de una mayor precisión en la estimación de los parámetros estudiados.

3.2.4.1. Determinación del Número Mínimo de Colectores

Para determinar un estimado confiable de la cantidad de throughfall es necesario determinar un número mínimo de colectores que cubre la variabilidad espacial del mismo (Thimonier, 1998). Existen muchos estudios (Holwerda et al., 2010; Staelens et al., 2006; Lloyd and Marques, 1988; Ziegler et al., 2009; Zimmermann et al., 2009) en donde se consideró un número de colectores lo suficientemente apto para asumir un valor verda-

dero de throughfall. Se siguen principalmente los siguientes métodos de aproximación:

- Se calcula el rango de variación del parámetro estudiado para incrementar el número de colectores. Se usan diferentes números de colectores seleccionados (desde 1 hasta el número total) y se determina para cada número su variación, de esta forma se hace una gráfica en donde se podría predecir el número de colectores para una variación deseada, como es hecho en [Kimmins \(1973\)](#).
- Otro método es tras determinar la desviación estándar y la media del throughfall a varios números de colectores, se hace una regresión para determinar el número de colectores basados en el error estándar como porcentaje de la media de throughfall ([Thimonier, 1998](#)).
- El método más usado es calcular el número de colectores necesarios para un intervalo de confianza y con un error deseado ([Ziegler et al., 2009](#)), esto se obtiene de la ecuación del error estándar.

En este estudio se escogió este último método, el cual está descrito con mayor profundidad en la sección 4.3.3.4.

3.2.4.2. Colectores Fijos vs Colectores Móviles

Es necesario tener un alto número de colectores para estimar de forma precisa la cantidad de throughfall. Dependiendo de las condiciones, el número necesario es tan exagerado que es difícil de lograrlo. Un alto número requiere de mayor cantidad de trabajo, tiempo y dinero. El método de colectores móviles permite una solución a este problema. Consiste en reubicar los colectores en posiciones aleatorias después de cada periodo de medición ([Thimonier, 1998](#)). Los datos son ajustados sobre la precipitación en el intervalo de manera de tener una mayor cobertura espacial con un número menor de colectores ([Holwerda et al., 2006](#); [Ziegler et al., 2009](#)). En el caso de colectores fijos, la media es calculada tras la acumulación de mediciones en periodos para un periodo mayor. En el caso de colectores móviles, la media es calculada usando el número total de mediciones en los periodos, teniendo un número mucho mayor. Sin embargo, es necesario tener largos periodos de estudio y de reubicación para tener un estimado representativo. En estudios de poco tiempo, es necesario el uso de colectores fijos.

Para el caso de querer estudiar la estabilidad temporal, el uso de colectores fijos es

necesario ya que se debe estudiar su variación en el tiempo y en distintos eventos, que en el caso de colectores móviles sería imposible determinar.

3.2.4.2.1. Factores de Influencia en el número de Colectores: El tamaño de la muestra es afectado por la variabilidad espacial del throughfall. Existen grandes diferencias en el número de colectores necesarios para diferentes tipos de bosques (Zimmermann et al., 2010), ya que la vegetación influencia la variabilidad del throughfall. El tipo de lluvia también influencia la variación del throughfall (Holwerda et al., 2006; Staelens et al., 2006), y por lo tanto el número de colectores necesarios. Es importante tomar en cuenta estas consideraciones para determinar en primera instancia el número de colectores necesarios.

3.2.4.3. Distribución de los Colectores

Se refiere a la elección de la ubicación de los colectores. Se debe determinar el área de estudio, y tener en cuenta los límites. Son independientes de si se usan colectores móviles o fijos, o si se usan colectores individuales canales. Las distribuciones del muestreo son las siguientes:

- *Muestreo Simplemente Aleatorio:* Es el comúnmente usado (Carlyle-Moses et al., 2004; Rodrigo and Ávila, 2000; Zimmermann et al., 2009), y consiste simplemente en la ubicación aleatoria de los colectores en el área de estudio.
- *Muestreo Estratificado:* Consiste en la ubicación ordenada de los colectores sistemáticamente, siguiendo una forma o un espaciamiento dado previamente a la instalación (Staelens et al., 2006).
- *Muestreo Estratificado Aleatoriamente:* El área es dividida en subáreas, en donde en cada subarea los colectores son ubicados aleatoriamente (Ziegler et al., 2009). De esta manera se asegura que la selección aleatoria de los colectores cubra la mayor cobertura posible, evitando que exista agrupamiento (generalmente sucede con el muestreo aleatorio).
- *Muestreo Agrupado:* Consiste en la división del área en subareas, en donde los colectores se agrupan en ciertas subareas (este muestreo es combinado con el de colectores móviles), de esta forma se tiene una ventaja operacional reduciendo

la distancia de viajes entre los colectores de medición ya que todos están agrupados. No existen estudios hechos con este diseño, pero según [Zimmermann et al. \(2010\)](#) con una autocorrelación espacial cercana debido al agrupamiento se tiene menos información (por la falta de distancias intermedias) por lo que es bastante ineficiente.

3.2.4.4. Forma

El área de muestreo puede ser de distintas formas, generalmente pueden ser circulares ([Rodrigo and Ávila, 2000](#)), rectangulares o cuadrados ([Ziegler et al., 2009](#)) de manera de representar una porción de la población total. Existen casos en donde se usan transectos longitudinales de grandes dimensiones, así se puede incluir varias especies de árboles, hacer un estudio a diferentes alturas (en un bosque con una alta pendiente) y permite el fácil acceso sin perturbar el sotobosque ([Holwerda et al., 2006](#); [Lloyd and Marques, 1988](#)).

3.2.4.5. Espaciamiento

Depende directamente del tipo de estudio que se quiere hacer, si es a escala regional o local. En el caso de escala regional, se recomienda no poner los colectores muy juntos, ya que puede haber cambios extremos en sitios muy cercanos de un mismo árbol, que a escala regional no es adecuado. Para áreas intermedias se recomienda usar 2/3 de la separación existente entre árboles ([Thimonier, 1998](#)). A pequeña escala, el espaciamiento puede ser variable, pero debe estar en función del tamaño de los árboles, de manera que se puede tener muestras cerca del tronco, en las ramas y en los extremos de los mismos.

3.3. FUNDAMENTOS DE ESTADÍSTICA

En esta sección se describen brevemente las herramientas básicas de estadística que se han aplicado en este estudio. Los siguientes conceptos se han sacado principalmente de [Harraway \(1997\)](#).

3.3.1. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

Se refiere al tratamiento de los datos, un resumen y descripción para presentarlos de forma ordenada y agrupada (Ruiz, 2004). Los datos se presentan como valores de una variable que representan cierta característica del elemento estudiado (Harraway, 1997). Para resumir la información de una serie de datos se crea una tabla de frecuencias que finalmente termina en la construcción de un histograma de frecuencias que representa la distribución empírica de una variable, que luego puede servir para ajustar una distribución teórica que permita hacer otros análisis más complejos.

3.3.1.1. Medidas de Posicionamiento y Dispersión

Dan información acerca de los datos, en donde se encuentran y el grado de dispersión, de esta forma se mide la representatividad.

3.3.1.1.1. Medidas de Posición

- *Media:*

Es la medida de tendencia central por excelencia, y es el promedio de una serie de datos, se obtiene de la suma de los valores de los datos y se divide para el número de datos (n).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Es única, el centro de gravedad de los valores de todos los datos y los representa; pero es muy susceptible a valores muy bajos o muy altos.

- *Mediana:*

Es otra medida de tendencia central, y es el valor medio de una serie de datos que están puestos en orden de magnitud, es decir, hay la misma cantidad de valores a la derecha y a la izquierda de la mediana. En su obtención no se toma en cuenta todos los valores de los datos, pero no es susceptible a valores alejados.

- *Cuartiles:*

Son medidas de posición no central, valores que dividen una serie de datos ordenados en 4 partes, de forma que en cada parte exista el mismo número de datos.

3.3.1.1.2. Medidas de Dispersión

- *Rango Intercuantil:*

Es una medida de dispersión absoluta, es una forma de recorrido, y es la diferencia entre el primer y tercer cuartil. Representa el 50 % de los datos, e incluye la mediana.

- *Varianza:*

La varianza mide la dispersión de la variable respecto a la media. Mientras mayor sea el valor de la varianza existirá una mayor dispersión y viceversa. Su valor es el cuadrado de las unidades de la variable.

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Valores que están alejados de la media inflan considerablemente el valor de la varianza, un valor alto de varianza reduce la representatividad de la media.

- *Desviación Estándar:*

Es la raíz cuadrada de la varianza, y tiene como ventaja que su unidad es la misma que la unidad de la variable debido a que la raíz cuadrada anula el valor elevado al cuadrado de la varianza.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

3.3.1.1.3. Medidas de Forma: De acuerdo a su valor determina si una distribución es simétrica o asimétrica, y si es asimétrica hacia qué lado es su sesgo.

$$g = \frac{1/n \sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^3}{(1/n \sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2)^{3/2}}$$

Si $g = 0$ entonces la distribución es simétrica.

Si $g < 0$ entonces la distribución es asimétrica negativamente.

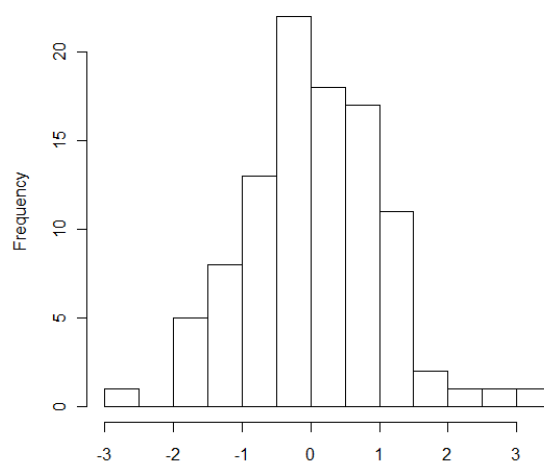
Si $g > 0$ entonces la distribución es asimétrica positivamente.

3.3.1.2. Representación Gráfica

Hay varias formas de representar gráficamente un resumen de datos, éstas permiten tener una mejor concepción de los datos tratados que únicamente con medidas numéricas.

3.3.1.2.1. Histograma: Es una forma gráfica de representar una tabla de frecuencias, es una serie de rectángulos que corresponden a un intervalo de clase. Si todas las clases de intervalo tienen la misma longitud, las frecuencias relativas se presentan por la altura del rectángulo. A partir de la formación de un histograma se puede hacer una aproximación a una distribución continua que lo represente.

Figura 3.3: Ejemplo de histograma de una muestra de 100 datos aleatorios

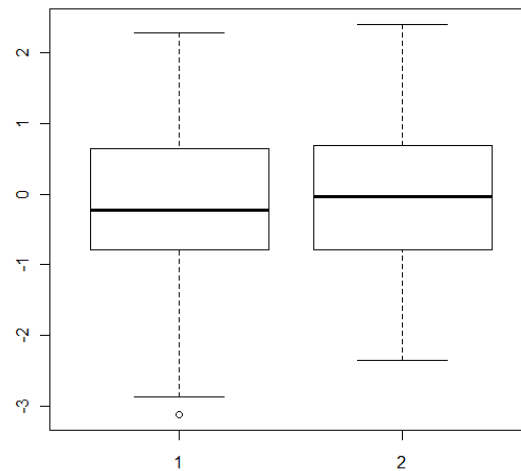


Elaborado por: Autor.

3.3.1.2.2. Box & Whisker Plot: Es un diagrama que representa un resumen de la serie de datos. Es bastante útil para un gran número de datos y para comparar varias muestras.

La longitud de la caja representa el rango intercuantil. La línea dentro de la caja representa la mediana. La línea longitudinal es el rango de datos. En casos que existen valores extremos, la línea longitudinal se extiende solo hasta 1.5 veces la longitud del

Figura 3.4: Ejemplo de dos Box & Whisker Plot de dos muestras de 100 datos aleatorios.



Elaborado por: Autor.

rango intercuantil más allá de los cuartiles, y los datos extremos si están fuera de ésta línea se los representa de alguna forma especial o no se los toma en cuenta. Para una muestra, éstos gráficos indican claramente el centro, variación, simetría y valores extremos.

3.3.2. MUESTREO

3.3.2.1. Distribución Normal

Es una distribución de probabilidades de variable continua que representa la mayoría de fenómenos que suceden en el mundo. Permite la modelación de éstos fenómenos; debido a la cantidad de variables que afectan estos fenómenos y son desconocidas, el uso del modelo normal se basa en la idea que cada observación es la suma de una cantidad pequeña de causas independientes. Presenta una forma de campana y es simétrica respecto a la media (μ), tiene como ecuación:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Solo dos parámetros describen la curva normal, la media (μ) y la desviación estándar (σ). La media determina la posición de la distribución, y es el punto de simetría de la

curva. La desviación estándar da la dispersión de la distribución.

El área de una curva normal representa la probabilidad de ocurrencia de un intervalo. Toda el área equivale al 100 %. En el intervalo de $(\mu - \sigma)$ a $(\mu + \sigma)$, el área bajo la curva representa una probabilidad de ocurrencia de aproximadamente 68 %. Para el intervalo de aproximadamente $(\mu - 2\sigma)$ a $(\mu + 2\sigma)$, se presenta una probabilidad del 95 %, y mientras más grande sea el área, más se acerca la probabilidad al 100 %.

3.3.2.1.1. Normal Estándar y Normal General: La distribución normal estándar es la que tiene $\mu = 0$ y $\sigma^2 = 1$, se la denota por $N(0, 1)$. Se tienen tablas donde están tabulados los valores que coinciden con el área desde 0 hasta un valor Z dado.

La distribución normal general tiene una forma $N(\mu, \sigma^2)$, con una variable aleatoria x , se la relaciona con la distribución normal estándar $N(0, 1)$ con la variable Z con:

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Esto permite calcular las probabilidades de una distribución normal general, a partir de la distribución normal estándar.

3.3.2.2. Distribución de Muestreo de la Media

Dado una muestra de una población, se puede determinar la media de la muestra \bar{x} , ésta es la media real de los valores de la muestra pero en ningún caso representa la media verdadera μ de la población. Esto ocurre, porque para distintas muestras se va a tener distintos valores de \bar{x} que no van a ser los mismos. Si se hacen varias muestras, las medias de cada muestra pueden formar una distribución de medias.

3.3.2.2.1. Error Estándar: En el caso de tener una distribución de medias de muestras, el error estándar se define como la desviación estándar de esta distribución.

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Esto significa, que en una distribución de medias de muestras hay menor variabilidad que en una distribución de valores individuales, porque los valores están esparcidos alrededor de μ (valores cercanos) y con desviación estándar σ/\sqrt{n} (disminuido por el

denominador).

Al asumir una distribución normal de una población la distribución de medias de muestras también es normal, incluso en el caso de que una población no tenga distribución normal, la distribución de muestras se acerca a la normalidad mientras mayor sea el número de muestras.

3.3.2.3. Intervalos de Confianza

Es un intervalo que se calcula a partir de los datos de una muestra y un parámetro de la población. En una distribución de medias, es el intervalo en donde se encuentra la media poblacional μ con cierta probabilidad (UMA, 2010). El nivel de confianza y la amplitud del intervalo varían conjuntamente, mientras mayor sea el intervalo existe mayor posibilidad de que la media esté en él, y viceversa.

La probabilidad de tener éxito se mide con el nivel de confianza $(1 - \alpha)$, donde α el *nivel de significación*, la posibilidad de fallar la estimación del intervalo. El intervalo de confianza para la media de una población viene dado por:

$$\left(\bar{x} - z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \bar{x} + z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right)$$

Si no se conoce σ y con un n suficientemente grande, el intervalo se transforma en:

$$\left(\bar{x} - z_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}, \bar{x} + z_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \right)$$

Se puede conseguir un intervalo de confianza para cada muestra, pero generalmente se construye uno solo, estos intervalos van a estar alrededor de la media de cada muestra, y la media poblacional puede estar o no dentro de los intervalos. Generalmente se hacen intervalos para distintos niveles de confianza, los que se usan son $(1 - \alpha)$ equivalente al 95 % de confianza, con valor de $z_{\alpha/2} = 1,96$ y $(1 - \alpha)$ equivalente al 99 % de confianza, con valor de $z_{\alpha/2} = 2,576$.

3.3.2.4. Intervalos de Confianza para la Diferencia de Dos Muestras

Generalmente se presente el problema de comparar dos muestras, muestras que pueden ser de una misma población o de distintas poblaciones. Existen dos casos, uno

cuando se trata de poblaciones independientes (no pareado), y el otro de dos poblaciones que coinciden, que son de la misma población (pareado). En el caso del intervalo de confianza de muestras no apareadas, ambas poblaciones tienen que tener una distribución normal para que sus diferencias tengan una distribución normal, para estos casos el intervalo de confianza es:

$$(x_1 - x_2) \pm t S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$$

t es el valor para un nivel de confianza dado para $(n_1 + n_2 - 2)$ grados de libertad. S_p viene del estimado combinado de la varianza, y es la mejor estimación dado que la varianza común es desconocida.

En el caso del intervalo de confianza de muestras pareadas, las muestras no son independientes porque son obtenidas de la misma población, es claro que va a haber una diferencia, de esta forma el intervalo de confianza viene dado por:

$$\bar{d} \pm t \frac{S_d}{\sqrt{n}}$$

n es el número de pareja de datos.

S_d es la desviación estándar para la pareja de datos.

3.3.3. PRUEBAS ESTADÍSTICAS

Sirven para determinar cierta hipótesis que se tiene de una población a partir de una muestra aleatoria (SEFO, 2010). Generalmente las pruebas suponen una distribución normal de la población (pruebas paramétricas), pero en el caso de no serlo los datos se pueden transformar de manera que sigan una distribución normal, o se pueden utilizar pruebas estadísticas que no se basen en la suposición de la normalidad (pruebas no paramétricas).

3.3.3.1. Prueba de Hipótesis

Las pruebas se basan en una hipótesis que se plantea. Una hipótesis nula (H_0), es una asunción que se toma como verdadera hasta que a partir de los datos de la muestra se demuestre lo contrario. Existe una hipótesis alternativa (H_A), que es la que se toma si la hipótesis nula es rechazada.

Se usa un estadístico que es el valor estandarizado del parámetro que se quiere probar (media, proporción, diferencia), y viene dado por:

$$\text{estadístico} = \frac{\text{parámetro observado} - \text{hipótesis nula}}{\text{error estándar del parámetro}}$$

Se asigna una región de rechazo, es la región dentro de la distribución (generalmente las colas de la distribución) del estadístico, en donde si el valor del estadístico se encuentra en ella, se rechaza la hipótesis nula. La probabilidad que el estadístico esté en esta región se llama *nivel de significancia* α , con valores que normalmente son de 0.05 y 0.01.

3.3.3.1.1. Errores:

- *Error Tipo 1:* Cuando un estadístico cae dentro de la región de rechazo de la hipótesis nula, puede ser debido a que la hipótesis nula no es verdad y la hipótesis alternativa si lo es, o el error tipo 1, la hipótesis nula es verdadera pero se ha dado un estadístico poco probable. La medida de esta duda es equivalente a α , y la probabilidad de hacer este tipo de error es igual al nivel de significancia.
- *Error Tipo 2:* Al reducir el nivel de significancia se reduce la posibilidad de tener un error tipo 1, pero se tiende a hacer un error tipo 2, cuando la hipótesis nula no es rechazada cuando es falsa. El reducir el error tipo 1 aumenta el error tipo 2 y viceversa, para protegerse de esto se debe tener una muestra grande.

3.3.3.1.2. Valor-p: En vez de seleccionar un nivel de significancia y determinar su región de rechazo, otra forma de hacer la prueba de una hipótesis es asumir que la hipótesis nula es verdadera, y encontrar la probabilidad *valor-p* de observar un valor de la prueba estadística que es tan extremo o más extremo que el obtenido de la muestra. Si el *valor-p* es menor que el nivel de significancia, entonces el estadístico cae en la región de rechazo y la hipótesis nula debe ser rechazada a ese nivel de significancia.

3.3.3.2. Pruebas Estadísticas

3.3.3.2.1. Prueba t: Es una prueba paramétrica en donde se utiliza como estadístico el término *t* y se utiliza una distribución *t de Student*. Esta distribución se utiliza para la

estimación de los parámetros de una población con distribución normal (generalmente la media) si se tiene una muestra pequeña. Su forma depende del número de datos, si se tiene un número mayor a 30, esta distribución es prácticamente igual a la distribución normal. Esta prueba se puede realizar para datos pareados y apareados:

$$t = \frac{(\text{parámetro} - H_0)}{S_d}$$

El error estándar difiere su fórmula dependiente si los datos son pareados o apareados.

3.3.3.2.2. Prueba Shapiro-Wilk: Esta es una prueba para determinar si una muestra tiene una distribución normal, sigue las mismas reglas para la prueba de una hipótesis, con la diferencia del estadístico, se basa en un estadístico W (Shapiro and Wilk, 1965):

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)} \right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

x_i es el i -ésimo en el orden estadístico en orden ascendente.

La constante a_i viene dado por:

$$(a_1, a_2, \dots, a_n) = \frac{m^T V^{-1}}{(m^T V^{-1} \cdot V^{-1} m)^{1/2}}$$

m es el vector de los valores esperados en orden estadístico de una distribución de una variable idéntica independiente de una muestra de la distribución normal estándar.

V es la matriz de covarianza de ese orden estadístico.

3.3.3.2.3. Prueba Wilcoxon de Signos: En una prueba no paramétrica pareada que usa el signo de la diferencia pareada y toma en cuenta la magnitud de esta diferencia. Se basa en la hipótesis nula que dos poblaciones tienen la misma distribución, entonces se espera que la mitad de las diferencias d_i sean positivas y la otra mitad negativas. También se asume que las diferencias positivas y negativas tienen aproximadamente la misma magnitud, al tomar en cuenta esto, al valor absoluto de las magnitudes se las

puede ordenar de menor a mayor y etiquetarlos con una posición (*orden estadístico*). Se hace una suma de las posiciones de los valores negativos y los valores positivos, y se esperaría que la suma sea parecida porque cada diferencia positiva debería tener una diferencia negativa de una magnitud parecida.

$$\min(S^+, S^-) \leq cv$$

cv es el valor crítico que se obtiene de la tabla de Wilcoxon con n como el número de diferencias que no sean iguales a 0.

$$S^+ = \sum d_{(i)} \text{ (suma del orden estadístico de las diferencias positivas)}$$

$$S^- = \sum d_{(i)} \text{ (suma del orden estadístico de las diferencias negativas)}$$

3.3.4. REGRESIÓN Y CORRELACIÓN

3.3.4.1. Regresión

Es el estudio de la dependencia de una variable aleatoria respecto a otra variable o a otras variables. Se usa para predecir el valor de una variable en base a lo que se conoce de otra variable. La variable dependiente se le denomina Y , mientras que la variable independiente se le denomina X . El caso más simple ocurre cuando Y depende de una sola variable, y la relación existente es lineal. El valor de la variable Y está sometido a un error aleatorio donde las condiciones que determinan los valores de X son menos rigurosos.

En el caso de una relación lineal, se intenta determinar una línea recta sobre los puntos en el diagrama de dispersión, donde esta línea permita tener un valor de \hat{y}_i para cada valor de x_i . Si esta línea está bien ajustada, la diferencia entre los valores observados y los valores calculados va a ser la mínima.

3.3.4.1.1. Método de Mínimos Cuadrados: Es un procedimiento matemático que a partir de un conjunto de pares de datos se intenta buscar una función que mejor se ajuste a los datos con el criterio de tener un error mínimo cuadrado. En el caso, de que el ajuste sea lineal, la ecuación de la línea es:

$$\hat{y} = a + bx$$

a es la intercepción de la línea con el eje Y

b es la pendiente de la línea

Entonces, para cada valor de x_i

$$\hat{y}_i = a + bx_i$$

La manera de medir la variabilidad de la pareja de datos alrededor de la línea de ajuste es:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

La línea que minimice este valor es el de mejor ajuste, de aquí se calculan los coeficientes:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, a = \bar{y} - b\bar{x}$$

3.3.4.1.2. Desviación Estándar, Intervalo de Confianza y Prueba de Hipótesis: Para cada valor de x_i de X , hay una distribución teórica y_i de posibles valores debido a errores aleatorios, la cual es independiente, normal y que cada distribución y_i tiene la misma varianza σ_e^2 . Esto implica que el error $(y_i - \hat{y}_i)$ tiene una distribución normal y una desviación estándar σ_e .

En una situación ideal, las medias de las distribuciones y_i caen sobre una sola línea recta (verdadera línea de regresión), la media teórica es $\mu_i = \alpha_i + \beta x_i$, donde α y β perteneces a la ecuación de la verdadera línea de regresión. La técnica de mínimos cuadrados está basada en una muestra y es una estimación de la verdadera línea de regresión. Si la muestra es aleatoria se puede estimar el error estándar con:

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 2}}$$

Se usa $n - 2$ grados de libertad debido a que para especificar el punto donde se mide la desviación se usan dos valores a y b . El intervalo de confianza para β se puede calcular como:

$$b \pm t \sqrt{\frac{S_e}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}}$$

Se puede realizar varias pruebas de hipótesis, pero la principal sería probar un valor de

H_0 :

$$H_0 : \beta = \beta_0$$

$$t = \frac{b - \beta_0}{\frac{S_e}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}}}$$

3.3.4.1.3. Residuales: Los residuales del ajuste de la línea de regresión deberían ser pequeños, aleatorios y normalmente distribuidos. Residuales muy grandes indican valores inusuales (*outliers*), y se debe verificar su validez. Los residuales deberían estar dentro de $\pm 2\sigma_e$ de cero. Alguno de estos residuales influyen fuertemente en la regresión lineal, es decir al removerlos la línea de regresión cambia considerablemente de posición, estos residuales se llaman (*leverage points*).

3.3.4.2. Correlación

Es una forma de medir como dos variables varían, indica la fuerza y la dirección de la relación lineal de dos variables, que a diferencia de la regresión las variables deben de ser independientes.

3.3.4.2.1. Coeficiente de Correlación: Esta medición se hace con el coeficiente de correlación que mide si la línea de regresión describe de forma adecuado la relación entre X y Y . El coeficiente de correlación tiene como fórmula:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Cuando $r = 0$, quiere decir que no existe correlación, no hay relación entre las variables. El máximo valor posible de $r = 1$, y esto ocurre cuando en el caso de que todos los puntos estén en una línea recta, y quiere decir que la relación es lineal y positiva, si $r = -1$ quiere decir que la relación es lineal y negativa.

Si el valor de $|r| > 0,7$ implica que existe una fuerte relación lineal, mientras un valor de $|r| < 0,3$ implica una relación lineal despreciable. Se puede usar r para hacer pruebas estadísticas de forma de determinar la verdadera correlación ρ , si existen relación o no lineal y si existe si es positiva o negativa. Se compara r con el valor crítico r_α de las tablas del coeficiente de correlación de Pearson, con $n - 2$ grados de libertad.

Una correlación significativa no quiere decir que existe una relación de causa y efecto, puede ser que las dos variables estén afectadas por una tercera variable.

3.3.4.2.2. Coeficiente de Determinación: Es el cuadrado del coeficiente de correlación, y explica la fracción de la variación total en Y son explicados por cambios en X , es decir da el porcentaje de datos de Y que su variación es explicada por cambios en X .

3.4. ELEMENTOS DE ESTADÍSTICA ESPACIAL

En esta sección se describe breve y únicamente los principales conceptos de estadística espacial que han sido aplicados en este estudio. La mayoría de conceptos se los obtuvo de [Chica-Olmo \(1987\)](#); [Funes \(2004\)](#).

3.4.1. INTRODUCCIÓN

La estadística espacial, también conocida como *Geoestadística* es la rama de la estadística que estudia procesos aleatorios con índices espaciales continuos ([Cressie, 1991](#)).

Generalmente los modelos estadísticos toman en cuenta variables aleatorias independientes, en casos más reales se toman en cuenta la dependencia estadística. En el caso de series temporales mientras los datos estén más juntos puede existir una mayor correlación, lo mismo sucede con datos espaciales, donde la dependencia puede estar en todas las direcciones.

3.4.2. EXPLORACIÓN DE DATOS

Un modelo subyacente es en el cual se considera que los datos pertenecen a un conjunto fijo y continuo. Previamente a los modelos geoestadístico es necesario hacer un análisis de los datos de forma exploratoria. Es muy común resumir los datos espaciales en las formas clásicas (como si provinieran de una muestra aleatoria), pero se los debe de tomar en cuenta como variables espaciales aleatorias dependientes, donde la dependencia está fuertemente influenciada por su posición espacial. El análisis exploratorio no considera observaciones de la misma manera, más bien toma en cuenta las observaciones atípicas ([Funes, 2004](#)).

Los modelos subyacentes pueden ser investigados por el análisis exploratorio, los cuales deben de ser resistentes a observaciones atípicas. En el contexto espacial, se quisiera un modelo en donde todos los datos deben provenir de una distribución normal conjunta donde la estructura de correlación dependa de las posiciones espaciales. Aunque es complicado de investigar se puede determinar si el conjunto de datos independientemente de sus posiciones provienen de una distribución normal, mediante gráficos que además permiten tener una idea la de forma de la distribución.

3.4.3. CAMPOS ALEATORIOS

Es una función de una familia de vectores de variables aleatorias:

$$\{Z(s) : s \in D\}$$

D es un subconjunto en R^d

s es una variable que varía continuamente en la región D

3.4.3.1. Momentos de un Campo Aleatorio

En Geoestadística, la *ley espacial de probabilidad* toma en cuenta solo los primeros dos momentos de la distribución $Z(s)$ (Funes, 2004). El momento de primer orden se lo conoce como la tendencia del proceso aleatorio Z , y es la esperanza matemática definida como:

$$E(Z(s)) = \mu(s)$$

Los tres momentos de segundo orden considerados en geoestadística son:

- La varianza o momento de segundo orden de $Z(s)$ respecto de $\mu(s)$:

$$\sigma^2(s) = Var[Z(s)] = E \{[Z(s) - \mu(s)]^2\}$$

- La covarianza de dos variables aleatorias $Z(s_i)$ y $Z(s_j)$, definido por:

$$C(s_i, s_j) = E \{[Z(s_i) - \mu(s_i)][Z(s_j) - \mu(s_j)]\}$$

- El variograma $2\gamma(s_i, s_j)$ definido por:

$$2\gamma(s_i, s_j) = \text{Var}[Z(s_i) - Z(s_j)]$$

3.4.3.2. Campos Aleatorios Estacionarios

Se dice que un campo aleatorio es estacionario si:

- $E(Z(s)) = \mu$ para todo s
- Para toda pareja de variables $Z(s+h, s), Z(s)$ su varianza existe y solo depende del vector de separación h , que es la distancia entre la pareja de variables,

$$C(s+h, s) = E\{Z(s+h)Z(s)\} - \mu^2 = C(h)$$

Esto quiere decir que los momentos de segundo orden no dependen de las posiciones sino del vector de separación entre los dos puntos h . La función $C(h)$ se denomina *covariograma*.

3.4.3.3. Isotropía

La condición de isotropía sostiene que la función de covarianza que depende de la separación entre dos puntos únicamente y no de la dirección. Si no satisface esta restricción, es decir si entre dos puntos existe no solamente dependencia de la distancia sino también de la dirección se la llama *anisotrópica*. Esta condición es bastante fuerte, entonces si un campo aleatorio es isotrópica también es estacionario.

3.4.4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Es el proceso de selección del modelo geoestadístico a partir de la construcción de un variograma experimental. El cálculo del variograma es la herramienta más importante para determinar las características de variabilidad y correlación espacial (Chica-Olmo, 1987). Se debe determinar un modelo teórico que se ajuste al experimental caracterizando la variabilidad espacial de la variable estudiada.

3.4.4.1. Variograma

El variograma es una función que representa la media aritmética de todos los cuadrados de las diferencias entre pares de datos experimentales separados por una distancia h (Journel and Huijbregts, 1978) o la varianza de los incrementos de la variable regionalizada en las localizaciones separadas a una distancia h , viene dado por:

$$2\gamma(h) = \frac{[\sum (Z(s) - Z(s+h))^2]}{|N(h)|} \quad (3.8)$$

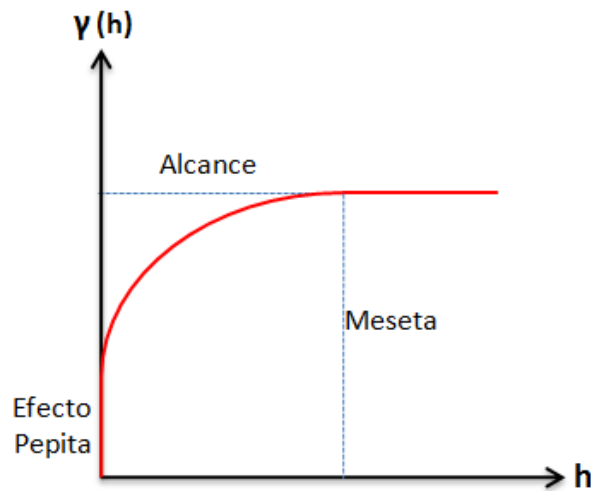
$|N(h)|$ es el número de pares a la distancia h

Esta es la fórmula para el variograma de Matheron que tiene como condición la estacionariedad de los datos.

3.4.4.1.1. Variograma Experimental: Para la construcción del variograma es necesario conocer los siguientes elementos:

- *Distribución de los Datos:* Los datos pueden presentarse igualmente espaciados, ya sea en una dirección o en dos direcciones, el caso más común es que se presenten datos irregularmente espaciados en donde el espaciamiento y la dirección pueden ser afectados, por este motivo se usa una tolerancia.
- *Dirección θ :* Es la dirección para la cual se va a calcular el variograma, para cada dirección θ se define una tolerancia $\Delta\theta$, donde se utilizan los puntos que se ubiquen únicamente entre el intervalo $(\theta - \Delta\theta, \theta + \Delta\theta)$. Para el caso en que se use una tolerancia de 90° se va a incluir a todos los puntos dentro de un radio h , por lo que se toman todas las posiciones, este variograma se lo llama *omnidireccional*.
- *Incremento h :* Es la distancia (*lag*) con la cual se va a obtener el variograma, también tiene una tolerancia lineal Δh , donde se utilizan los puntos que se ubiquen únicamente entre el intervalo $(h - \Delta h, h + \Delta h)$. Generalmente el valor de Δh se utiliza como el 50 % de la distancia h , de esta forma las clases de distancias no se superponen y no hay valores fuera de una clase.
- *Distancia Máxima L_{max} :* La máxima distancia a la cual va a ser calculado el variograma, se recomienda que sea la mitad de la distancia entre las muestras más alejadas (Krajewski and Gibbs, 1993).

Figura 3.5: Características de la función de un variograma.



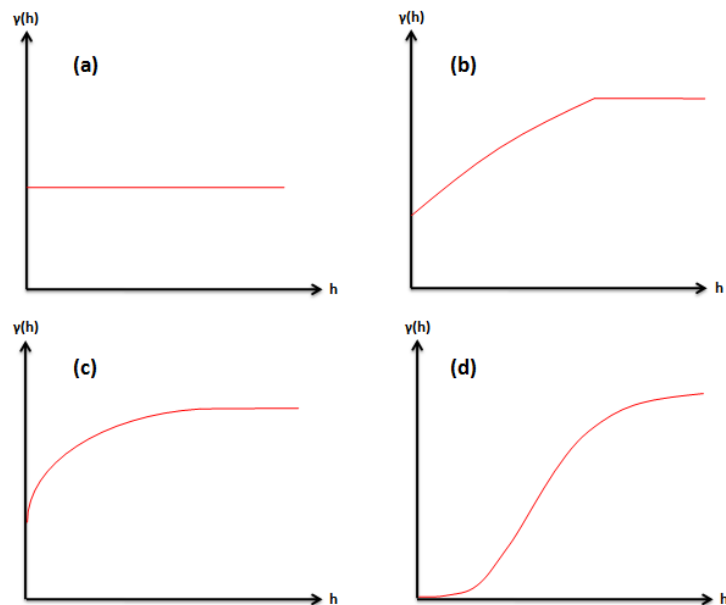
Elaborado por: Autor.

- **Número de lags:** Es el número de incrementos que se escoge a partir de la distancia máxima y el incremento h .

3.4.4.1.2. Características: Los parámetros del variograma vienen dados por tres elementos que definen la variabilidad: la discontinuidad en el origen, el área de influencia de correlación y el valor máximo de variabilidad, que se presentan a continuación:

- **Efecto Pepita (Nugget Effect):** El variograma por definición es nulo en el origen, ya que se esperaría que la varianza de la diferencia entre dos puntos que están en el mismo sitio sea igual a 0. Sin embargo, este no es usualmente el caso, en la práctica las funciones obtenidas pueden presentar una discontinuidad en el origen, a esta discontinuidad se la conoce como *efecto pepita* y se da debido a errores de medición, variaciones a microescala (variable muy irregular a distancias muy cortas) o ausencia de valores en distancias inferiores a las que se tomaron las muestras.
- **Meseta (Sill):** Es la máxima altura de la función del variograma. Mientras más grande es la distancia h la correlación entre los puntos tiende a ser despreciable y por este motivo el variograma se vuelve constante.
- **Alcance (Range):** Es la distancia a la cual el variograma alcanza su meseta, es decir, la distancia a la cual los valores de las variables dejan de estar correlacionados y son independientes.

Figura 3.6: Modelos de variogramas teóricos más comunes; (a) Pepita, (b) Esférico, (c) Exponencial y (d) Gaussiano.



Elaborado por: Autor.

3.4.4.1.3. Modelos: La existencia de modelos de variogramas se debe a que el variograma experimental no se puede evaluar en distancias y direcciones intermedias. También la interpolación no satisface las condiciones de un variograma y por lo tanto el experimental no satisface estas condiciones.

Existen varios modelos teóricos para el variograma, tomando en cuenta su comportamiento en el origen (lineal, parabólico o con efecto pepita) y la meseta (existencia o ausencia) (Journal and Huijbregts, 1978), los modelos son:

- *Efecto Pepita:* Modelo donde no existe correlación entre las variables, sin importar la distancia entre ellas.
- *Esférico:* Es una expresión polinomial simple, e indica fenómenos continuos aunque no derivables.
- *Exponencial:* Este modelo alcanza la meseta de forma asintótica creciendo más rápidamente que el esférico. Como la meseta no se alcanza a una distancia finita se usa un *alcance efectivo* para el cual se tiene el 95 % de la meseta.
- *Gaussiano:* Es extremadamente continuo, tiene un comportamiento en el origen de tipo parabólico con pendiente nula lo cual indica gran regularidad y alcanza la meseta de forma asintótica por lo que se usa también un *alcance efectivo*.

3.4.4.2. Validación del Modelo Teórico

La idea fundamental del uso de un modelo teórico es ajustarlo al modelo experimental, de manera que con una medida de la dependencia espacial, represente de mejor manera la dependencia espacial de los datos. No existe un procedimiento totalmente automático para ajustar el variograma. Existe un conjunto de variogramas que pueden ajustarse al experimental, la idea es de encontrar el que se ajuste de mejor manera. Existe varios criterios para determinar la bondad del ajuste.

3.4.4.2.1. Mínimos Cuadrados: La comparación del gráfico del variograma experimental con la del variograma teórico a ajustar es altamente recomendado. Tomando en cuenta esto, para medir la cercanía entre ambos, se usa la suma de cuadrados de las diferencias entre un estimar del variograma genérico $2\gamma_I(h_e)$ y un modelo $2\gamma(h_e, \theta)$. El método propone la obtención de θ por minimización en una dirección e :

$$\sum_{j=1}^K \{2\gamma_I(h(j)e) - 2\gamma(h(j)e; \theta)\}^2$$

3.4.4.2.2. Ajuste Manual: El método de mínimos cuadrados produce un ajuste sin tomar en cuenta ciertos aspectos cualitativos del variograma. El ajuste manual consiste en tomar en cuenta una serie de consideraciones de tipo cualitativo:

- Es suficiente con que el modelo ajustado refleje los principales aspectos del variograma experimental, no es necesario tener un ajuste detallado ya que generalmente no son características de las variables sino de fluctuaciones muestrales.
- El comportamiento de $\gamma(h)$ a grandes distancias determinará la presencia o no de la meseta.
- El valor del efecto pepita puede encontrarse extrapolando los primeros puntos del variograma muestral hasta cortar el eje.
- El sentido común y el conocimiento físico de la variable son fundamentales para la estimación del modelo del variograma correcto. Se debe tomar en cuenta que las apreciaciones y la experiencia no garantizan un modelo único.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

Este capítulo trata sobre la metodología que se usó para cumplir con los objetivos previamente mencionados. La toma de datos la realicé yo, durante mis pasantías en Galápagos con el proyecto *GIIWS* en el periodo de Julio a Diciembre del 2010. Primero se da una descripción de los sitios de estudio escogidos y se justifica su representatividad e interés sobre la Isla. Luego se ahonda en detallar los materiales necesarios y el diseño de muestreo utilizado para obtener los datos requeridos en el estudio. Se muestra el tratamiento que se les da a los datos previamente a ser analizados, de esta manera se tiene una idea de lo que se va a realizar con ellos. Finalmente se va a describir el análisis de los datos, es decir todos los métodos que se van a usar para determinar cada uno de los objetivos. Todo el tratamiento y análisis de datos se lo realizó con el programa *R Project*, con el uso de los paquetes *Gstat*, *Lattice*, *nlme*, *sgeostat*, *stats* y *UsingR*.

4.1. SITIO DE ESTUDIO

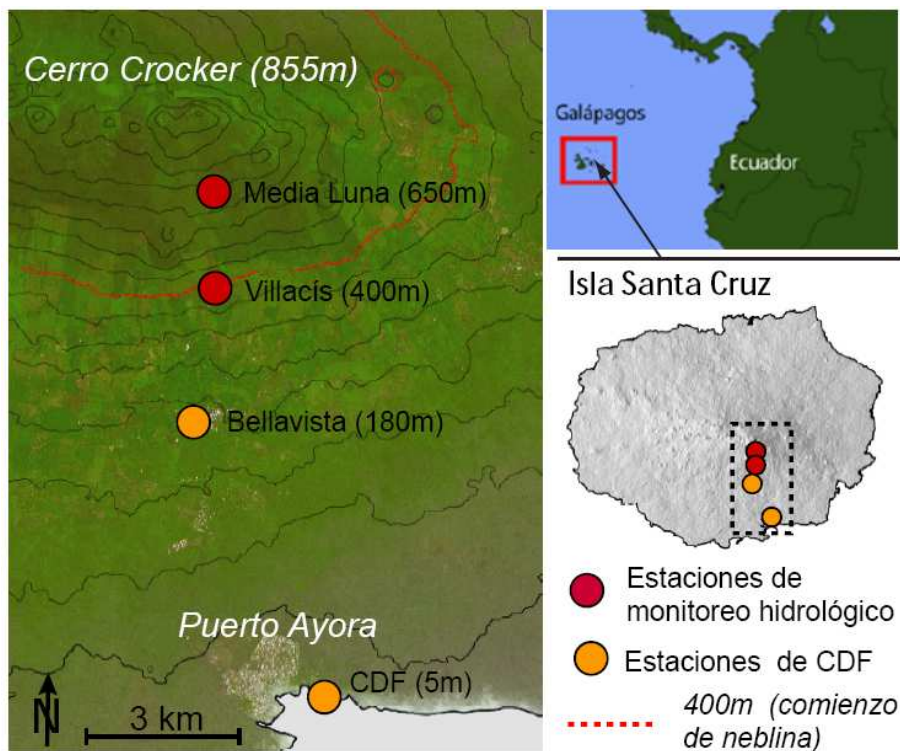
El estudio se lo realizó en la cuenca de *Pelikan Bay*, en la zona de barlovento (pendiente sur) de la Isla Santa Cruz, en dos sitios de estudio: Estación Villacís en la zona agrícola y Estación Media Luna en la zona de cumbre.

4.1.1. ZONA DE VILLACÍS

Está ubicada en la zona agrícola, a 1 km del pueblo de Bellavista. La estación está ubicada a 400 m.s.n.m en la zona húmeda que se extiende desde 200 m.s.n.m hasta 400 m.s.n.m ([Wiggins and Porter, 1971](#)). Está localizada en la franja inferior del nivel de inversión, en el límite de la neblina. El clima se caracteriza por tener fuertes eventos de lluvia en la época de invierno. El suelo se tiene un espesor de un poco más de 1 m, y está sobre una cama de roca basáltica.

En esta estación de estudio se distinguen dos sitios, que se los llamará *pasto* y *bosque*.

Figura 4.1: Mapa de ubicación de las estaciones climatológicas disponibles. Las estaciones con círculos amarillos pertenecen a la Estación Científica Charles Darwin y al Parque Nacional Galápagos, su mantenimiento es por parte de estas organizaciones. Las estaciones con círculos rojos pertenecen al proyecto GIIWS, y es en estos sitios donde se desarrolló el presente estudio.



Fuente: Alexandre Pryet.

4.1.1.1. Pasto

En este sitio existe una pendiente del 22 % con exposición en la dirección S-SE (Fuente-Tomai, 2011). Está ubicado en un pasto ($00,67350^{\circ}S$; $90,32341^{\circ}W$) dominado por *Pennisetum purpureum* y sus variedades representando 6000 Ha en toda la Isla (Fuente-Tomai, 2011; PNG, 2010). La altura media del pasto es de 1.2 m con altura máxima de 2 m. Las variedades de especies pueden verse en la tabla 4.1 (Fuente-Tomai, 2011).

4.1.1.2. Bosque

En este sitio existe una pendiente de 10 - 20% con exposición en la dirección S-SE (Fuente-Tomai, 2011). Está ubicado en un bosque mixto introducido ($00,67354^{\circ}S$; $90,32300^{\circ}W$) que se extiende en un área de 3 Ha donde la especie dominante es la *Psidium gajava* que ocupa 3000 Ha en la Isla Santa Cruz (PNG, 2010). La altura promedio de los árboles es de $5.45 \text{ m} \pm 2.75 \text{ m}$ con algunos árboles con alturas de

Figura 4.2: Imagen de la estación Villacís. En la parte superior se puede observar el bosque mixto introducido en donde se tiene la parcela de estudio, la cual está ubicada a 60 m de la Estación Climatológica en el pasto, la cual se ve en la parte inferior de la foto.



Fuente: Alexandre Pryet.

hasta 15 m. La densidad del bosque promedio es de 3550 *árboles*.Ha⁻¹ (Fuente-Tomai, 2011). La cobertura vegetal se caracteriza por ser altamente afectada por el hombre. En la canopea o dosel arboreo (el nivel de la copa de los árboles) se encontraron principalmente seis especies introducidas como se ve en la tabla 4.2 (Fuente-Tomai, 2011). Algo característico del bosque es la presencia de epífitas, se encontró que en el 45 % de los árboles las epífitas cubren una superficie mayor al 33 % de las ramas y tronco (Fuente-Tomai, 2011).

El sotobosque consiste principalmente de helechos de aproximadamente 1.5 m de altura. Se diferencia vegetación a dos niveles de altura, el superior compuesto por helechos como *Thelypteris balbisii* y *Ctenitis sloaneii*; y el inferior (nivel del suelo) con hierba y pequeños helechos.

4.1.2. ZONA DE MEDIA LUNA

Está ubicada en la parte alta, junto al cerro "Media Luna", en el Parque Nacional Galápagos a 4 kilómetros del pueblo de Bellavista. La estación está ubicada a 640 m.s.n.m en la zona muy húmeda (figura 4.4). El clima se caracteriza por la fuerte presencia de

Tabla 4.1: Principales especies de pasto con sus respectivos porcentajes, donde se encuentra la Estación Villacís según Fuente-Tomai (2011).

Especie	Porcentaje
<i>Pennisetum purpureum</i>	83 %
<i>Thelypteris balbisii</i>	8 %
<i>Browallia americana</i>	3 %
<i>Ichnanthus nemorosus</i>	2 %
<i>Blechnum polypoides</i>	1 %
<i>Ctenitis sloanei</i>	1 %

Fuente: Fuente-Tomai (2011)

Elaborado por: Autor

Tabla 4.2: Principales especies arbóreas en el dosel con sus respectivos porcentajes, donde se encuentra la estación Villacís según Fuente-Tomai (2011).

Especie	Nombre Común	Porcentaje
<i>Psidium guajava</i>	Guayaba	35 %
<i>Cestrum auriculatum</i>	Sauco	29 %
<i>Cinchona pubescens</i>	Cinchona	27 %
<i>Persea americana</i>	Aguacate	5 %
<i>Cedrela odorata</i>	Cedrel	2 %
<i>Cordia alliodora</i>	Laurel	2 %

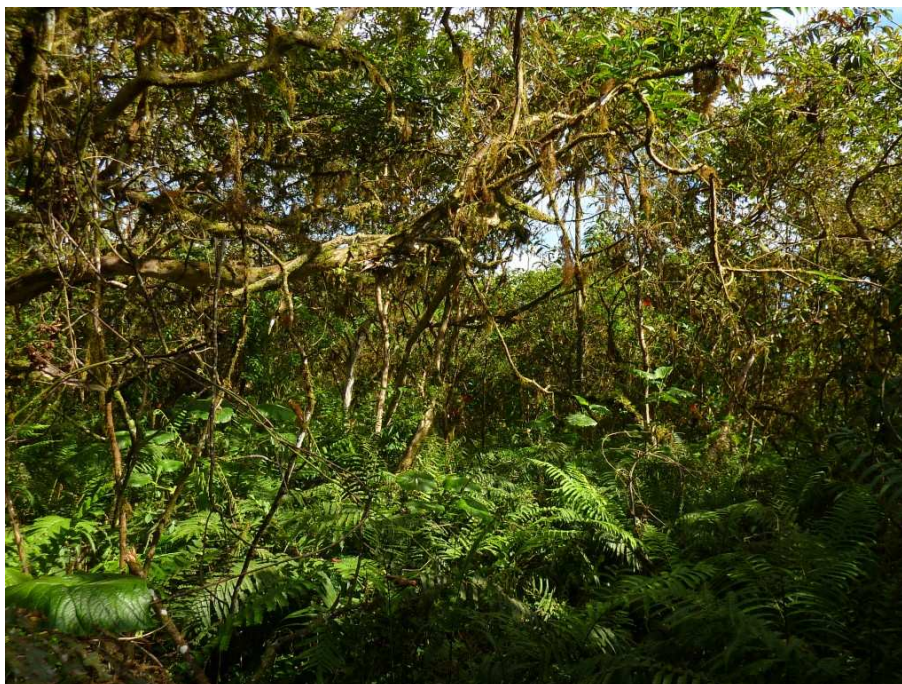
Fuente: Fuente-Tomai (2011)

Elaborado por: Autor

neblina en la época de fría. El espesor del suelo es muy variable, pero no llega a más de 50 cm. Bajo el suelo, existe rocas que se formaron de flujos piroclástico recientes (Laruelle, 1966).

La estación se encuentra ubicada en el límite de la Zona de Miconias, por lo que se puede encontrar arbustos de *Miconia robinsoniana* rodeados por grandes espacios de helechos. Las Miconias se caracterizan por tener sus hojas perennes en un solo nivel de vegetación con alturas entre 1-5 m (Beard, 1955). Además de las Miconias, existen algunas especies de helechos como *Pteridium arachnoideum* y *Ctenitis sloanei* (Fuente-Tomai, 2011). Debido a la gran humedad presente existe gran cantidad de epífitas, como briofitas.

Figura 4.3: *Imagen del interior del bosque mixto introducido en la estación Villacís.*



Fuente: Pilar Fuente-Tomai.

Figura 4.4: *Imagen de la estación de Media Luna, en la parte alta de la Isla Santa Cruz.*



Fuente: Pilar Fuente-Tomai.

4.1.3. PARCELAS DE ESTUDIO

En Villacís, la parcela de estudio tuvo un área de 42.25 m² (cuadrado de 6.5x6.5 m), las dimensiones escogidas fueron suficientes dentro del bosque mixto disturbado como una área representativa. Dentro del área se encontraron 15 árboles (de los cuales 10 fueron Guayabas), con una altura promedio de 4.1 m y un diámetro promedio de 9 cm. La cobertura vegetal fue del 76 % caracterizada por una presencia media de epífitas.

En Media Luna, la parcela de estudio tuvo un área de 25 m² (cuadrado de 5x5 m), debajo de varias miconias. Dentro de la parcela se encontraron 9 Miconias, con una altura media de 2.8 m y un diámetro promedio de 8 cm. La cobertura vegetal fue de 84 % caracterizada por una gran presencia de epífitas.

4.2. INSTRUMENTACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS

4.2.1. ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA

Tiene como función, medir y registrar regularmente las diversas variables climatológicas de interés para la investigación. Los datos necesarios para el estudio se los obtuvieron de dos estaciones meteorológicas construidas en los meses de Julio y Agosto del 2010. La estación en Media Luna es marca *HOBO*, y todos sus componentes (incluido la estructura) son parte de un kit. La estación Villacís tiene una estructura y base fabricadas en la Isla, sus componentes son marca *Campbell* y fueron ensamblados a la estructura de la Estación.

4.2.2. DATA LOGGER

La parte más importante de la estación es su memoria, y en este caso es el Data Logger. Un Data Logger es un dispositivo electrónico que registra mediciones de varios sensores, éstas son ordenadas en el tiempo y se almacenan en una memoria llevando el registro de la fecha y hora ([Saravia, 2008](#)). La ventaja que se obtuvo al usar esta clase de aparato es el poder tener mayor cantidad de datos, en pequeños intervalos de tiempo, por lo tanto un mejor detalle de los eventos, y sin la constante intervención del encargado de la estación. Otra de las características principales es que permitió llevar una programación interactiva, el registro de varias variables con diferentes intervalos y

Figura 4.5: Imagen de la estación meteorológica Media Luna.



Fuente: Pilar Fuente-Tomai.

rutinas.

En la estación Villacís se instaló un *Data Logger Campbell CR1000*, programado para tomar medidas cada 5 segundos. Dependiendo del dato tratado, el Data Logger presentó una media o la suma del mismo en un intervalo de 15 minutos (intervalo con los que se tratan los datos). En la estación Media Luna se instaló un *Data Logger Hobo* con la misma programación para los parámetros meteorológicos y dos *DataLogger Campbell CR200* para la medición de la precipitación y el throughfall respectivamente. Los datos se los descargaba en una computadora portátil en visitas periódicas a las estaciones.

4.2.3. THROUGHFALL

Las mediciones se las realizó de dos maneras: Con el uso de canales (Ziegler et al., 2009; McJannet and Wallace, 2006), y con colectores (Lloyd and Marques, 1988; Staelens et al., 2006; Zimmermann et al., 2009).

Figura 4.6: Imagen de los canales de recolección en la parcela de estudio en Villacís.



Fuente: Pilar Fuente-Tomai.

4.2.3.1. Canales

Se utilizaron canales semicirculares, que consistieron en tubos de PVC de 6 pulgadas (15 cm) de diámetro y 3.1 m de longitud cortados en la mitad axialmente. Estos canales se los sujetó con barras de acero clavadas en el suelo. En Villacís, se usaron 4 canales ubicados casi perpendicularmente entre ellos, con una pendiente promedio de 12° respecto al suelo (mínimo 10° según [McJannet and Wallace \(2006\)](#)) y un área horizontal proyectada de 1.8 m^2 para el periodo de Julio a Diciembre del 2010. En Media luna, se usaron 3 canales con una pendiente promedio de 17° y un área de 1.4 m^2 para el periodo de Septiembre a Diciembre del 2010.

Todo el throughfall recolectado por los canales es dirigido hacia un embudo central, conectado a una manguera de goteo, la cual mantiene el agua almacenada en caso de eventos de lluvia de alta intensidad. Esta manguera está sobre un balancín oscilante de dos cubetas, las cuales se voltean una vez que se han llenado con cierto volumen y dan paso a la siguiente cubeta que repite el mismo proceso. El balancín está cubierto por un recipiente plástico que impide cualquier paso de agua a excepción del que entra por

la manguera. El balancín está ubicado a unos 20 cm bajo el suelo, está nivelado horizontalmente y tiene una salida de drenaje de agua, la cual es descargada directamente en el suelo. Cada vez que las cubetas se voltean se tiene un registro automático, y el número de tips es registrado en el Data Logger.

Se vio necesario hacer una limpieza de los canales para sacar hojas, ramas o musgos que caían en ellos, para evitar que el agua recogida por los canales sea interrumpida, cuya limpieza se la realizó periódicamente una vez por semana.

El uso de canales permitió cubrir un área relativamente grande y por lo tanto más representativa, además que al tener una larga longitud cubre transectos en donde hay copas de árboles de distintas especies.

La toma de datos automáticamente, además de reducir el tiempo entre visitas para hacer mediciones y dar mantenimiento, también permite hacer mediciones sin la necesidad de tener un tanque de almacenamiento de agua que puede ser bastante considerable tomando en cuenta el área y las lluvias. También se puede hacer mediciones detalladas de eventos de lluvia, en donde se puede calcular la intensidad, duración y otros aspectos para hacer comparaciones.

4.2.3.2. Colectores

Se utilizaron colectores, que consistieron en embudos de plástico de 25 cm de diámetro, con una altura de 40 cm. Éstos estaban sobre recipientes plásticos de 18 cm de diámetro y 40 cm de altura. El conjunto formó un colector con una altura de 50 cm, un área proyectada horizontalmente de aproximadamente 0.05 m². Los colectores se los puso sobre el suelo de las parcelas previamente nivelado, sujeto con palillos de madera para evitar que se volcaran y definir una posición fija. Los embudos colectaban el throughfall que caía sobre ellos para ser almacenados en los recipientes plásticos que tenían una capacidad de 4 litros. En Villacís, se usaron 20 colectores en un periodo de 1 mes y 33 colectores en un periodo de 2 meses. En Media Luna se usaron 13 colectores en un periodo de 1 mes.

Las mediciones se las realizó manualmente cada 2 a 3 días (en un día no se recolectaba suficiente), mediante una balanza electrónica, pesando todo el colector con el agua recogida, y luego vertiendo el agua y pesando el colector vacío. Ésta fue una forma más precisa de medición debido a que resulta difícil medir el nivel de agua en el campo.

Figura 4.7: Imagen del colector #22 en la parcela de estudio de Media Luna.



Fuente: Pilar Fuente-Tomai.

Se vio necesario dar mantenimiento a los colectores después de cada medición, debido al ingreso de hojas, tallos y otra materia orgánica en ellos, además de lodo que se pegaba en las paredes. También se dio gran importancia a mantener los embudos horizontales para mantener la misma área.

A cada uno de los colectores se le dio una coordenada correspondiente respecto de la parcela. También cada uno tiene una identificación (un nombre y un número) para mantener registrado lo que ocurren en cada uno y en todos los períodos.

El uso de colectores sirvió para obtener la representatividad espacial del throughfall, es decir, poder determinar si las mediciones que se están haciendo con los canales son representativas o no de la parcela de medición. También para representar la variabilidad espacial del throughfall.

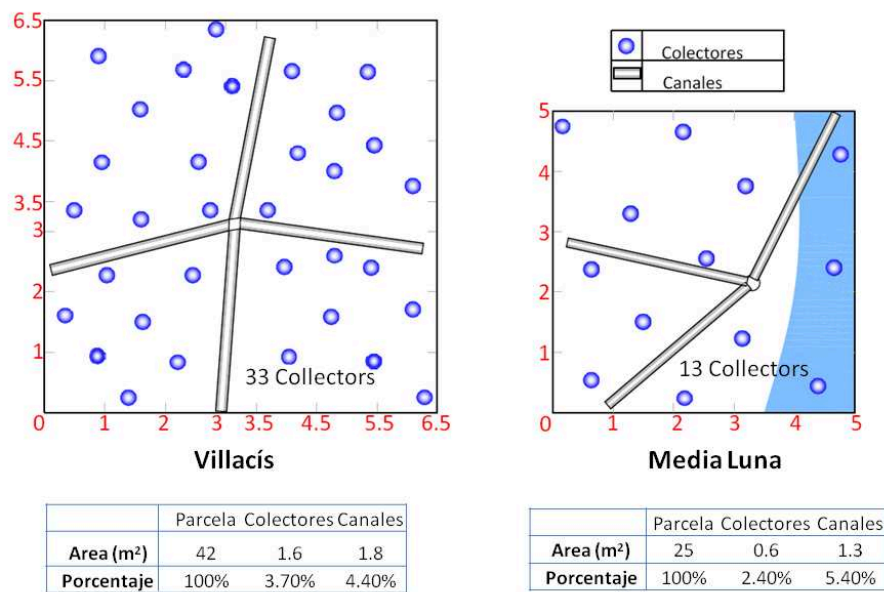
Las mediciones manuales aunque resultaron demorosas y engorrosas permitieron que se tenga una presencia constante en las estaciones, de esta manera se pudo determinar problemas existentes y mayor cantidad de observaciones sobre lo que sucede durante un evento de lluvia. Finalmente fueron muy útiles para hacer comparaciones y determinar el mal funcionamiento del balancín, algo que sucedió en algunas ocasiones.

Figura 4.8: Imagen del conjunto de colectores y canales en la parcela de estudio de Media Luna.



Fuente: Pilar Fuente-Tomai.

Figura 4.9: Esquematzación (a escala) de la posición de los colectores y los canales en las parcelas de estudio. La zona de color azul en la parcela de Media Luna representa el área expuesta al viento.



Elaborado por: Autor.

4.2.4. PARÁMETROS CLIMATOLÓGICOS

Su medición es indispensable para poder determinar la influencia que podrían tener estos factores en el throughfall. En Villacís, se midió en el periodo de Julio a Diciembre del 2010, mientras en Media Luna en el período de Septiembre a Diciembre del 2010. Se han hecho mediciones de:

- *Viento*: La dirección y la intensidad del viento se la midió con un anemómetro *Vector A100R* ubicado sobre el poste principal de la estación a una altura de 3 m en Villacís y en Media Luna.
- *Humedad Relativa*: Se la midió con una sonda *Campbell CS215* ubicada en el poste.
- *Temperatura*: En Villacís, se midió por sondas *Campbell CS215* ubicadas tanto en la parcela de estudio como en la ubicación de la estación climatológica en el pasto, ya que se espera que haya una variación en la temperatura entre las dos zonas. En Media Luna, por medio de una sonda *HOBO* ubicada en la estación y solo se cuenta con esta debido a que no se esperaba una diferencia relevante de temperatura entre la estación y la parcela de estudio.
- *Radiación Solar*: En Villacís, se la midió por medio de un piranómetro *Kipp&Zonen SPLite* y en Media Luna por un piranómetro *HOBO*.

4.2.5. PRECIPITACIÓN

La precipitación bruta se la ha medido con pluviómetros *Campbell ARG100* con un diámetro de 25 cm y una calibración de 0.2 mm por tip. En Villacís, el pluviómetro está ubicado a 3 m de la estación, a una altura de 2 m (sobre el pasto que el pasto circundante) y con un ángulo de 12° respecto a los árboles más cercanos del bosque. El pluviómetro estaba conectado al DataLogger *Campbell CR1000* donde se guardó la suma de los tips cada 15 minutos en el período de Julio a Diciembre del 2010. En Media Luna, el pluviómetro está ubicado a 2 metros de la estación, a una altura de 1.5 m sobre la vegetación circundante (no existe presencia de árboles cercanos que afecten las mediciones) en el período de Septiembre a Diciembre del 2010.

Además se contó con la información de pluviosidad de las dos estaciones que mantienen la Estación Científica Charles Darwin con el apoyo de la FAE. La estación en Puerto

Ahora, en la *Estación Científica Charles Darwin* (ECCD) con datos desde 1965 y la estación en Bellavista con datos desde 1985.

4.2.6. OTRAS MEDICIONES

4.2.6.1. Presencia de Neblina

Es indispensable conocer su influencia. La intensidad de la neblina se la obtiene al medir la desviación turbulenta del viento a partir del anemómetro y contenido líquido de la neblina a partir de un espectómetro (Holwerda et al., 2006). En este estudio no se usó éste último aparato, únicamente se pudo medir la presencia de la neblina. Para esto se usó una red de neblina de forma cilíndrica que presenta mayor eficiencia en campo (Villegas et al., 2008) y al ser multidireccional existe un área expuesta a toda dirección del viento (Juvik and Nullet, 1995). La red está sobre un estructura metálica cilíndrica de 12 cm de diámetro y 40 cm de altura que está ubicada a 2.5 m del suelo, en ambas estaciones. La red está conectada a una manguera que llega a un tanque de almacenamiento, el cual se lo midió de forma manual semanalmente.

4.2.6.2. StemFlow

Al ser parte de balance hídrico es importante cuantificarlo para determinar si en verdad es despreciable o si se lo debe tomar en cuenta. Se recolectó usando una manguera de 3/4" de diámetro cortado a lo largo y puesta sobre el tronco de los árboles en espiral y termina conectada a una botella de recolección (Thimonier, 1998). Las mediciones se hicieron manuales y se pusieron 15 recolectores en la parcela de Villacís (en todos los árboles de la parcela) y 3 recolectores en la parcela de Media Luna. En ambos sitios se realizó las mediciones en el período de Septiembre a Diciembre del 2010.

4.2.6.3. Evaporación de los Canales

Se observó que su efecto tuvo influencia en las mediciones throughfall, en especial en períodos de poca lluvia. Se midió usando dos recipientes plásticos con un volumen de agua fijo y un techo para impedir la entrada adicional de agua dentro de los recipientes. Las mediciones se las hizo en los periodos de medición del throughfall en los colectores

pesándolos con una balanza electrónica. Las mediciones se las realizó únicamente en la parcela de Villacís en el periodo de Octubre a Diciembre del 2010.

4.3. TRATAMIENTO DE DATOS

4.3.1. UNIDADES DE THROUGHFALL

De las mediciones en campo, se tiene como dato volúmenes de throughfall. Para trabajar de mejor forma con los datos, el throughfall se lo ha transformado en otras unidades.

- *Altura de Throughfall*: El volumen de agua registrado fue dividido para la proyección horizontal del área de los canales o los colectores, para tener una altura de throughfall equivalente (mm).
- *Throughfall Relativo*: Es el porcentaje de altura de throughfall respecto a la altura de precipitación (%). Es muy útil para hacer comparaciones con otros sitios y definir la participación del throughfall o de la intercepción.

4.3.1.1. Unidades de Tiempo

Para poder realizar los distintos análisis, ha sido necesario establecer niveles de tiempo (intervalos de tiempo de medición) para todas las variables medidas. Se usó los siguientes niveles:

- *Horario*: Para ver los cambios de las distintas variables durante el día.
- *Diario*: Desde las 0:00 de un día hasta las 0:00 del siguiente día, de esta forma se puede ver las variaciones diarias que sirven para hacer comparaciones con otras estaciones.
- *Evento*: Durante el tiempo de un evento de throughfall para sacar relaciones entre el throughfall y el resto de variables. Para la existencia de evento de throughfall, tiene que medirse por lo menos 0.6 mm de precipitación en algún momento, y la separación de eventos es de más de 2 horas (Holwerda et al., 2006).
- *Periodos*: Depende de los periodos de medición de los colectores, y el periodo dura el tiempo entre mediciones de colectores.

- *Semanal*: Se usó únicamente en los variogramas debido a la cantidad de trabajo requerido para hacerlos por periodo.

4.3.2. ERRORES DE LAS MEDICIONES

Los mediciones realizadas tienen errores que pueden ser considerables o no. La estimación correcta depende de un buen diseño de muestreo y la minimización de los errores. En este caso, errores como la entrada o salida de agua en los colectores o canales y la influencia del viento han sido despreciados. Los errores que se presentan a continuación deben de ser considerados, y aunque no se realizaron correcciones, fue importante cuantificarlos para determinar su influencia en la cuantificación.

4.3.2.1. Error de Calibración

Para la determinación de las unidades de throughfall fue necesario hacer calibraciones en los canales que ofrezcan una altura de throughfall equivalente a cada basculación (tip) del balancín. Para esto se hicieron pruebas usando un volumen conocido de agua, y poniéndolo en los canales. Se contó el número de tips del balancín y el tiempo que duró la prueba. A partir de esto cada tip, tiene una resolución en (mm/tip).

Tabla 4.3: Resumen de la calibración realizada en los canales. La pequeña resolución es debido al gran área de recolección de los canales.

Periodo	Villacís (mm/tip)	Media Luna (mm/tip)
JULIO-OCTUBRE	0.00602	0.00692
NOVIEMBRE-DICIEMBRE	0.00836	0.00787

Elaborado por: Autor

Debido a que la superficie de los canales no permanece igual por la acumulación de materia orgánica en ellos, se hicieron 2 calibraciones, al inicio y en la mitad del periodo de estudio, que resultaron en distintas resoluciones que han producido errores de estimación, posiblemente por movimiento del embudo recolector.

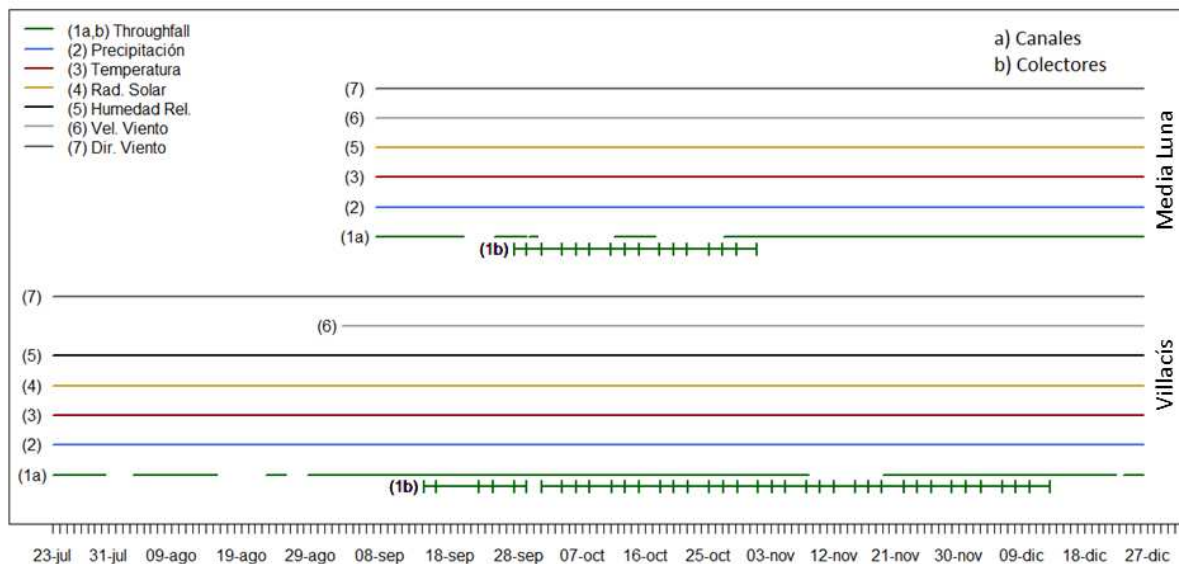
Otro problema que existe es la intensidad de lluvia, debido a que el área de recolección es muy grande, el caudal que pasa por el balancín es muy alto y no permite su correcto funcionamiento. Esto ocurre para intensidades mayores a $0.8\text{cm}^3/\text{s}$, para lo cual se

debería de hacer una corrección. Sin embargo, por ser la temporada de garúa en Galápagos, donde las intensidades de lluvia son muy pequeñas no hubo este problema, solo en algunos casos que son menores al 1 %.

4.3.2.2. Evaporación

La evaporación produce una subestimación del throughfall. En el caso de los canales, el agua no siempre llega al balancín, ésta se puede quedar en los canales, esto es una pérdida que eventualmente se evapora. En el caso de los colectores, el agua dentro de los recipientes también se evapora. A partir de los recipientes usados para medir la evaporación, se obtuvo que la evaporación total en el periodo representa el 4 % del total de precipitación (479 mm). Se debe tomar en cuenta que este valor incluye periodos en que no hubo precipitaciones, por lo que se estima que las posibles pérdidas sean mayores.

Figura 4.10: Disponibilidad de datos en el periodo del 23 de Julio del 2010 hasta el 27 de Diciembre del 2010. Los espacios vacíos representan falta de datos por mal funcionamiento o falta de medición. Las líneas continuas representan mediciones cada 15 minutos. Las líneas con barras representan una sola medición en el periodo entre barras.



Elaborado por: Autor.

4.3.2.3. Malfuncionamiento de Equipos

Se hizo una revisión de calidad de datos para revisar la existencia de valores extraños que pueden ocurrir por el malfuncionamiento de los equipos. Esto es algo que ocurrió frecuentemente con algunas variables. En el caso que en la revisión se hayan encontrado valores extraños, el periodo en donde ocurrieron no se lo tomó en cuenta en ningún cálculo relacionado con la variable revisada.

4.3.3. ANÁLISIS DE DATOS

4.3.3.1. Estadística Descriptiva

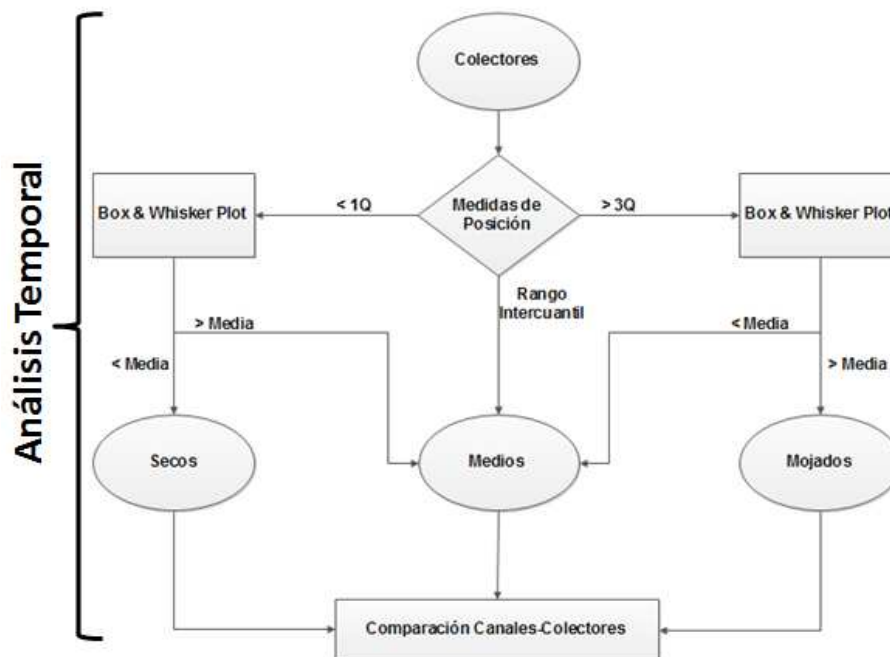
Es aplicada únicamente a los datos obtenidos de la medición de los colectores en Villacís ($n=33$) y Media Luna ($n=13$). Se usó el throughfall relativo de cada uno de los colectores. Para determinar el throughfall relativo de cada colector se sumó el throughfall acumulado de cada periodo medido relacionado respectivamente con la precipitación acumulada para los mismos periodos en donde se midió el throughfall, es decir, existe una precipitación acumulada distinta para cada colector dependiendo del throughfall medido en cada uno. De esta manera, se puede obtener el throughfall relativo de todos los colectores aunque algunos de ellos no fueron medidos en todos los periodos.

Para describir adecuadamente la información se ha realizado un resumen de las principales medidas de posicionamiento y dispersión. También se usaron gráficos como: histogramas y las funciones de distribución de probabilidad y acumulada. Finalmente, se usó la prueba Shapiro y Wilk para determinar la normalidad de las funciones (existe interés por conocer únicamente si las funciones son normales).

4.3.3.2. Clasificación de Colectores

Tomando en cuenta que en la vegetación existen puntos de goteo que concentran el throughfall en puntos específicos (Wullaert et al., 2009; Ziegler et al., 2009; Holwerda et al., 2006; Zimmermann et al., 2010) la distribución espacial de throughfall se ve afectada. En el caso de tener una distribución de throughfall donde se aprecie este fenómeno, es necesario identificar dichos colectores. Entonces se debe determinar los colectores que tengan mucho más throughfall que el resto. De la misma manera, debido a la es-

Figura 4.11: Clasificación de colectores. Representación de la toma de decisiones para clasificar a los colectores en secos, medios y mojados a partir de datos temporales. Se basa principalmente en la separación de valores extremos.



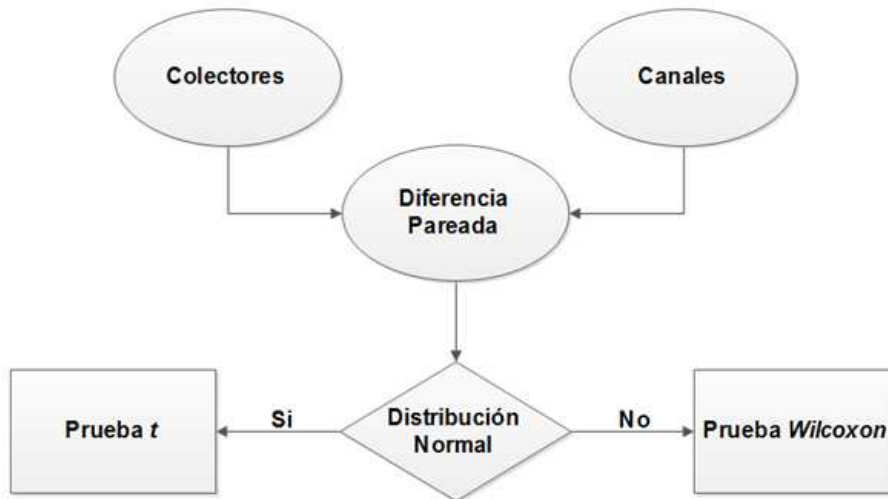
Elaborado por: Autor.

estructura y disposición de la vegetación puede ocurrir lo contrario, que existan colectores con throughfall menor al promedio. Partiendo de esto, se ha determinado tres clases de colectores:

- *Secos*: Colectores con valores de throughfall relativo bajo.
- *Medios*: Colectores con valores de throughfall relativo cercano al promedio.
- *Mojados*: Colectores con valores de throughfall relativo alto.

Los colectores han sido clasificados de acuerdo a la figura 4.11. Una vez clasificados los colectores se realizaron comparaciones usando la media por periodo para cada clase de colector. También se determinó el porcentaje de cada tipo respecto al resto y se infirió respecto al resto de la parcela.

Figura 4.12: Comparación entre colectores y canales. Representación de la toma de decisiones para hacer la comparación entre canales y colectores a partir de datos temporales. Dependiendo de si la diferencia pareada entre colectores y canales es normal se realiza una prueba paramétrico (prueba t) o no paramétrica (prueba Wilcoxon).



Elaborado por: Autor.

4.3.3.3. Comparación entre Canales y Colectores

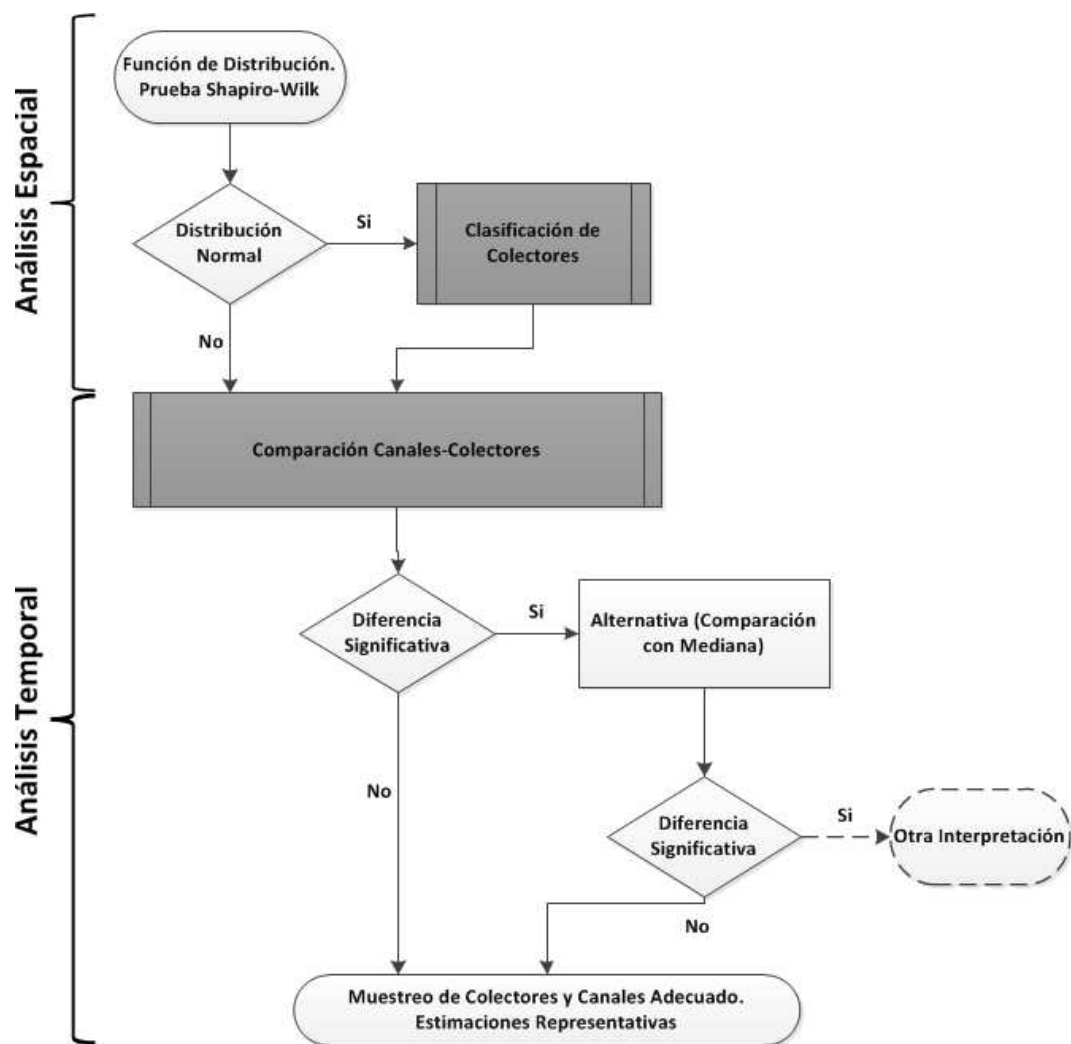
Para determinar si hay una diferencia significativa en la cuantificación de throughfall usando canales o usando los colectores se realizó una prueba estadística entre ambos. Se usó el throughfall relativo de los canales en los mismos periodos de medición que en los colectores. En los colectores, se usó la media por periodo de cada clase de colector y la media por periodo de todos los colectores. Dependiendo de la distribución de la diferencia entre canales y colectores, se usó la prueba pareada t (distribución normal) o la prueba pareada Wilcoxon de Signos (distribución no normal) como se ve en la figura 4.12. En la figura 4.13 se puede apreciar un resumen de los pasos correspondientes para estimar la representatividad de los canales y colectores.

4.3.3.4. Representatividad Espacial

Para evaluar la representatividad espacial se dio un resumen estadístico más específico:

- Tomando en cuenta el CV (coeficiente de variación) espacial, que es una medida de dispersión invariante ante cambios de escala, de esta forma se puede hacer

Figura 4.13: Diagrama de flujo 1. Representación de la toma de decisiones para estimar la representatividad de los colectores y canales. Los casilleros gris oscuro tienen más procesos que están representados en otros gráficos.



Elaborado por: Autor.

comparaciones sobre la variabilidad con otros sitios. Viene dado por:

$$CV = \frac{DE}{\bar{M}} 100 \quad (4.1)$$

DE es la desviación estándar.

\bar{M} es la media.

- Otro parámetro importante es el error relativo respecto a la media, se calcula con:

$$E = \frac{ES}{\bar{M}} 100 \quad (4.2)$$

ES es el error estándar.

- Se determinó el número mínimo de colectores descrito en la sección 3.2.4.1, para determinar si la muestra es representativa usando:

$$N_{min} = \frac{t^2 CV^2}{E^2} \quad (4.3)$$

t es el estadístico de la distribución de Student para el intervalo de confianza del 95 %.

Los resultados de estos análisis se presentan en la sección 5.6

4.3.3.5. Análisis geoestadístico

El objetivo del análisis geoestadístico es la obtención de un modelo de variograma que describa la dependencia espacial del throughfall. Se usaron variogramas omnidireccionales. Se usó como datos el throughfall por periodos de medición y el throughfall acumulado total (de todo el periodo de medición) para la construcción de variogramas por periodo y general respectivamente.

Tomando en cuenta la posible existencia de una distribución univariada de throughfall sesgada (debido a la presencia de puntos de goteo), se realizó un análisis exploratorio que consistió principalmente en determinar la normalidad de la distribución espacial.

En el caso de no tener una distribución normal se usó el coeficiente de sesgo octil (*octile skew*) (Zimmermann et al., 2009), que es una medida del sesgo respecto a la mediana. Se tiene como ventaja que este coeficiente es insensible a valores extremos, los cuales pueden provocar una distribución no normal aunque la distribución subyacente si lo sea.

El coeficiente de sesgo octil ($skew_8$) viene dado por:

$$skew_8 = \frac{(O_7 - \tilde{M}) - (\tilde{M} - O_1)}{O_7 - O_1}$$

O_1 es el primer octil.

O_7 es el séptimo octil.

\tilde{M} es la mediana o el cuarto octil.

En el caso de tener un $skew_8$ menor a -0.2 o mayor a 0.2 es necesario hacer una transformación a los datos (Zimmermann et al., 2009) (logarítmica o raíz cuadrada).

Para la construcción del variograma experimental se usó el modelo de Matheron, con la ecuación 3.8, donde se toma en cuenta la suposición de segundo orden de estacionariedad. Se construyó nubes de variograma (Bivand et al., 2008), las cuales se obtienen graficando todas las posibles diferencias cuadradas $(Z(s_i) - Z(s_j))^2$ vs todas las clases de separación h_{ij} . Como el variograma de Matheron es un promedio de los puntos de una nube de variograma, entonces está fuertemente influenciado por valores extremos, por lo que su uso puede sobreestimar la varianza. En el caso de presentarse valores extremos en las nubes de variograma se usó el variograma robusto de Cressie:

$$2\bar{\gamma}(h) \equiv \left\{ \frac{[\sum |Z(s_i) - Z(s_j)|^{1/2}]}{|N(h)|} \right\}^4 / \left(0,457 + \frac{0,494}{N(h)} \right) \quad (4.4)$$

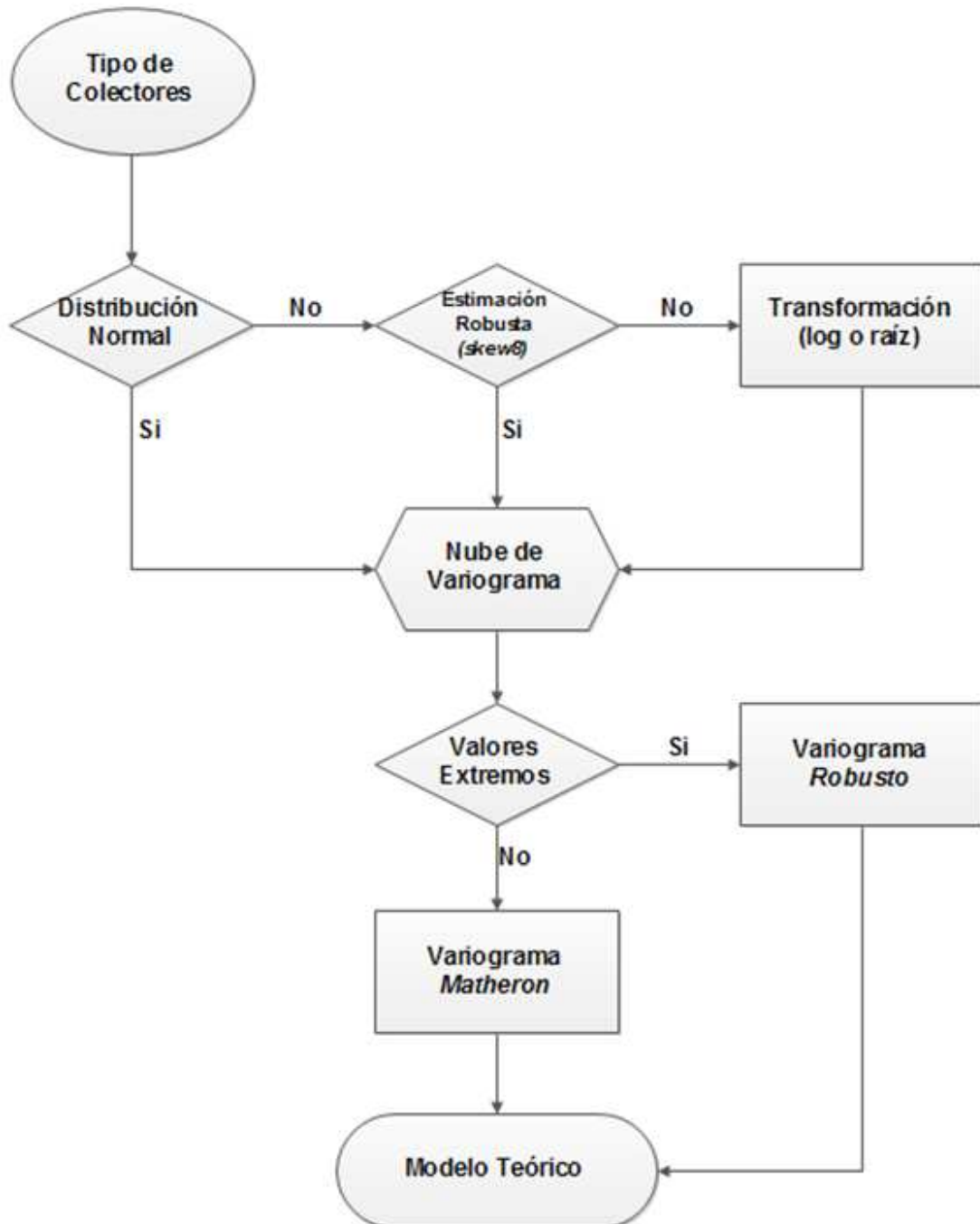
Después de esto se usó un modelo de variograma teórico ajustado al variograma experimental, usando el método de máxima verosimilitud en el caso de que el variograma experimental no tenga una forma aparente, o el método de mínimos cuadrados si el variograma experimental presentaba tendencia hacia a alguno de los modelos propuestos (figura 3.6). Se puede ver un ejemplo de este análisis en los Anexos.

Para los datos de throughfall acumulado para todo el periodo, se realizó un kriging ordinario.

4.3.3.6. Variabilidad Temporal

Se realizó una evaluación de la variabilidad del throughfall relativo en el tiempo a través de varios *gráficos temporales* que se pueden ver en la sección 5.9. Los distintos *gráficos*

Figura 4.14: Diagrama de flujo 2. Representación de la toma de decisiones para determinar un modelo de autocorrelación adecuado para los datos por periodo de throughfall.



Elaborado por: Autor.

temporales permiten:

- Además de ver la forma en que varía el throughfall relativo en distintos tiempos, permiten ver la influencia de la cantidad de precipitación en la cantidad de throughfall.
- Al usar valores acumulados de precipitación y throughfall, se puede tener una idea de la estabilidad de los valores acumulados.

4.3.3.7. Variograma Temporal

Se pretendió realizar un modelo de variograma que permita describir la dependencia temporal del throughfall (Zimmermann et al., 2009). Éste permite presentar la duración del periodo de tiempo en que se correlacionan las mediciones de throughfall. Esta correlación no se refiere a la dependencia entre eventos, se refiere a la similitud entre eventos. Se usó como datos las mediciones de throughfall en los canales y como unidad de tiempo los días en que ocurrieron los eventos de throughfall.

Se usó el mismo criterio para la construcción del modelo que en la sección 4.3.3.5, ya que se espera que los colectores también presenten puntos de goteo que no se activan en todos los eventos.

4.3.3.8. Time Stability Plots

Se usaron *Gráficos de Estabilidad Temporal (Time Stability Plots)* para analizar la variabilidad temporal de los patrones espaciales de throughfall (Raat et al., 2002; Keim et al., 2005; Staelens et al., 2006; Zimmermann et al., 2007; Wullaert et al., 2009). El método utiliza como unidad el throughfall normalizado que es la diferencia relativa de un punto respecto de la media general de todos los puntos en un mismo periodo de tiempo. Tomando en cuenta la presencia de puntos de goteo, y que la distribución de throughfall en los periodos no sea normal, se hizo una redefinición del throughfall normalizado a partir de la siguiente ecuación:

$$\partial T_{i,n} = \frac{T_{i,n} - \tilde{T}_n}{MAD(T_n)} \quad (4.5)$$

$\partial T_{i,n}$ es el throughfall normalizado.

$T_{i,n}$ es el throughfall medido en una posición i y un periodo n .

\tilde{T}_n es la mediana de throughfall para un periodo.

$MAD(T_n)$ es la desviación absoluta de la mediana de throughfall para un periodo.

Se calcula sacando la mediana de las diferencias entre el throughfall normalizado y la mediana de throughfall normalizado.

Usando la mediana en vez de la media se usa un enfoque más robusto, y al usar la desviación absoluta de la mediana (no se puede usar la desviación estándar porque se está usando la mediana) se toma en cuenta la dispersión.

En el gráfico de un *time stability plot*, se ordena la media de throughfall normalizado de menor a mayor, y con líneas que representan \pm una desviación estándar.

Este gráfico permite visualizar la persistencia (seca o mojada) de los colectores respecto de la mediana general, si las líneas se cruzan con la línea de la mediana general entonces el colector no es persistente (seco o mojado). De este tipo de gráfico se puede sacar dos tipos de persistencia (Keim et al., 2005; Zimmermann et al., 2007): persistencia extrema de los colectores fuera de la región del rango intercuantil, y persistencia general que tiene que ver con la persistencia de los colectores dentro del rango intercuantil. Este gráfico se lo puede ver en la figura 5.21 en la sección 5.11.

4.3.3.9. Relación del Throughfall con Variables Meteorológicas

Con el objeto de explicar los posibles factores que controlan la variabilidad del throughfall, se realizó gráficos entre las distintas variables meteorológicas (precipitación, intensidad, temperatura, humedad relativa, radiación solar, intensidad y dirección del viento) con el throughfall. De esta forma, se pretendió buscar una posible relación mediante un primer modelo de regresión lineal (o no lineal en el caso que pueda existir otro modelo que se ajuste mejor). La relación de los modelos se probó con el coeficiente de correlación. En el caso de existir una relación considerable entre las variables, se trabajó en el posible modelo para verificarlo (análisis de regresión) Éste análisis se presenta en la sección 5.12.

4.3.3.10. Relación de la Vegetación con el Throughfall

Debido a la importancia que tiene la vegetación en la redistribución de la precipitación y en la variabilidad espacial del throughfall y para facilitar la interpretación de las mediciones se midió la apertura de la cubierta vegetal (Staelens et al., 2006; Ziegler et al., 2009; Zimmermann et al., 2009). Se usaron fotografías hemisféricas que a diferencia de fotografías comunes (limitadas por el ángulo de apertura), estas permiten tomar imágenes con apertura extrema y en esencia proporcionan la proyección de un hemisferio en un plano y por lo tanto no presenta distorsión en las imágenes.

Se usó una cámara *Nikon D80*, con un lente *Nikon DX AF FishEye Nikkor 10.5 mm 1:2-8 G ED*. Las fotografías se las tomó a uno 30 cm del suelo aproximadamente sobre una superficie horizontal en todos los sitios donde se pusieron los colectores.

Debido a que las fotografías son muy amplias y solo se quiere conocer la parte del dosel que afecta al colector se recortaron las fotografías a un círculo de 1.5 m de diámetro (6 veces el tamaño del colector) a partir del conocimiento de la altura del dosel. A las nuevas imágenes se las transformó a imágenes binarias y utilizando un programa de edición de fotografías se determinó el porcentaje de área negra sobre el total, en donde el área negra representa las partes del cielo que están siendo obstruidas por el dosel de la vegetación.

La apertura de la cubierta vegetal de cada colector expresado como porcentaje se lo relacionó con el throughfall relativo de cada colector. Un ejemplo de este proceso se puede ver en la figura 5.34.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestra los principales resultados obtenidos de la metodología, los cuales generalmente se muestran con tablas y figuras. Los resultados han sido separados por objetivos, y en varios ocasiones por sitio de estudio. Conjuntamente con los resultados se ha puesto la discusión de los mismos en cada tema, en donde se ha hecho una interpretación de los mismos, y se los ha complementado con observaciones y comparaciones con resultados en otros estudios.

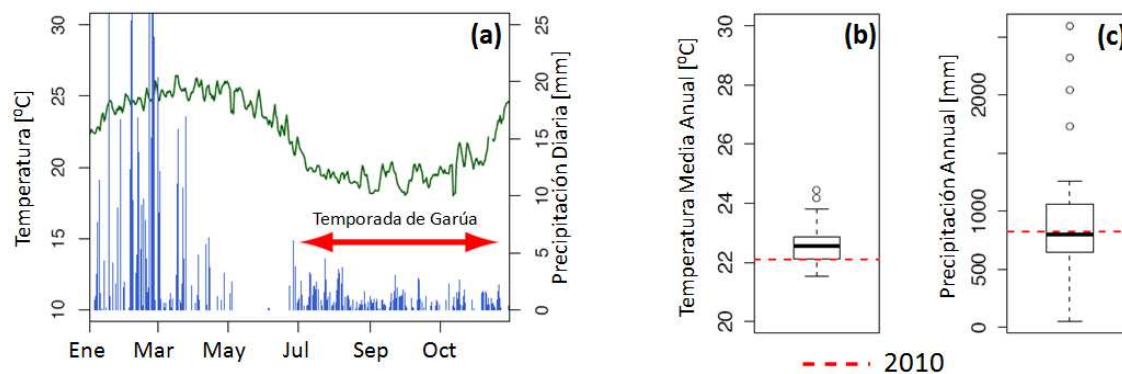
5.1. TEMPORADA DE GARÚA 2010

El año 2010 se caracterizó por la presencia del fenómeno de La Niña, sin embargo no presentó grandes variaciones con otros años (a excepción de la temperatura). Como se puede ver en la figura 5.1 la temporada de invierno empezó en Enero y finalizó en Mayo, teniendo las máximas lluvias en el mes de Marzo y la mayor temperatura en el mes de Abril. La mayor frecuencia de lluvias al igual que las máximas fue en el mes de Marzo. La temporada de garúa empezó en Julio y finalizó a finales del mes de Diciembre, presentando las máximas lluvias en el mes de Julio, y la mínima temperatura en el mes de Octubre. La frecuencia de lluvias fue prácticamente igual en todos los meses (a excepción de Noviembre y Diciembre), donde prácticamente todos los días llovió.

A partir los datos (registros desde 1987) de la Estación de Bellavista, se pudo determinar que la precipitación total del año 2010 (828 mm) estuvo cerca a la precipitación anual media de 804 mm. En contraste, la temperatura en el 2010 (22.1°C) no ha estado cercana a la media anual registrada de 22.6°C , ha sido más baja como consecuencia del fenómeno de La Niña, en donde el enfriamiento del mar influencia en las condiciones ambientales. Se podría decir que el año puede ser considerado representativo para la precipitación, pero no para la temperatura, sin embargo si la temperatura no es un factor de control en el throughfall (como se verá luego) el hecho de tener temperaturas menores a lo normal no sería un problema.

En Villacís, la temperatura media diaria fue de 17.6°C (bastante bajo), la radiación solar media diaria fue de 79 W/m^2 y la intensidad del viento medio diario fue de 0.87 m/s . La humedad relativa fue del 100 % la mayor parte del tiempo. En Media Luna, la tempera-

Figura 5.1: Registros de precipitación y temperatura de la Estación de Bellavista (alt. 180 m.s.n.m) desde 1985. (a) Registro de precipitación y temperatura diaria en el año 2010. (b) Posición de la temperatura del 2010 frente al resto de años registrados. (c) Posición de la precipitación en el 2010 frente al resto de años registrados.



Fuente: Domínguez et al. (2011).

tura media diaria fue de 15.9°C (mucho más bajo), la radiación solar media diaria fue de 115 W/m² y la velocidad del viento medio diario fue de 1.9 m/s.

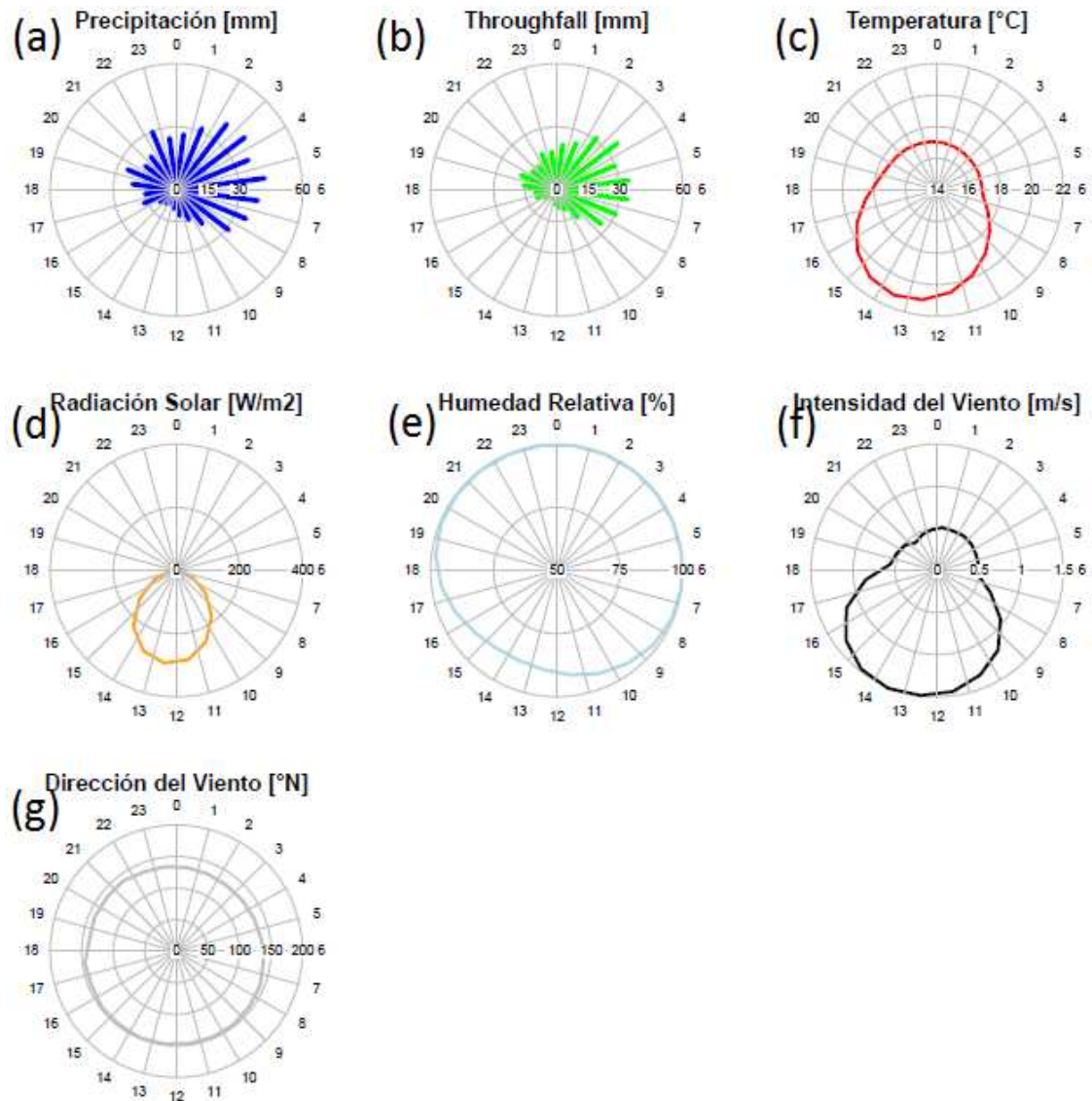
En la figura 5.2 se puede ver la variación horaria de las variables meteorológicas medidas más importantes, entre las 11 y 16 horas se puede notar en todas las variables cierta tendencia máxima (temperatura, radiación solar e intensidad del viento) o mínima (precipitación, throughfall y humedad relativa).

5.2. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

A partir del throughfall relativo de cada uno de los colectores en ambas parcelas se realizó un análisis estadístico principalmente para determinar la normalidad de las distribuciones. En la tabla 5.1 se presenta un resumen estadístico de ambas estaciones.

En Villacís, se obtuvo una media de throughfall relativo del 81 % y una mediana de 79 % a partir de 33 colectores, de donde existe una diferencia pequeña entre las dos, por lo que se advierte la existencia de un sesgo en la distribución. Viendo el histograma de frecuencias en la figura 5.3 se nota claramente que no se tiene una distribución normal ya que la distribución tiene una cola larga en la derecha con un pequeña pansa, que hasta se podría decir que puede ser una distribución bimodal, también la forma de la función de distribución acumulada no se ajusta con una normal. Se realizó la prueba Shapiro & Wilk para determinar la normalidad de la distribución se determinó que ésta

Figura 5.2: Variación horaria de las principales variables meteorológicas medidas en la parcela de Villacís. La precipitación y el throughfall corresponden a la altura acumulada en cada hora. Las demás variables corresponden a la media horaria.



Elaborado por: Autor.

Tabla 5.1: Resumen estadístico descriptivo de las parcelas de Villacís y Media Luna.

Variable	Unidad	Parcela	
		Villacís	Media Luna
Media	%	81	152
Des. Est ^a	%	31	72
Mediana	%	79	135
Mínimo	%	39	76
Máximo	%	175	282
g ^b	-	1.45	0.6
N ^c	-	33	13

^a Desviación estándar.
^b Coeficiente de asimetría.
^c Número de colectores usados en los cálculos.

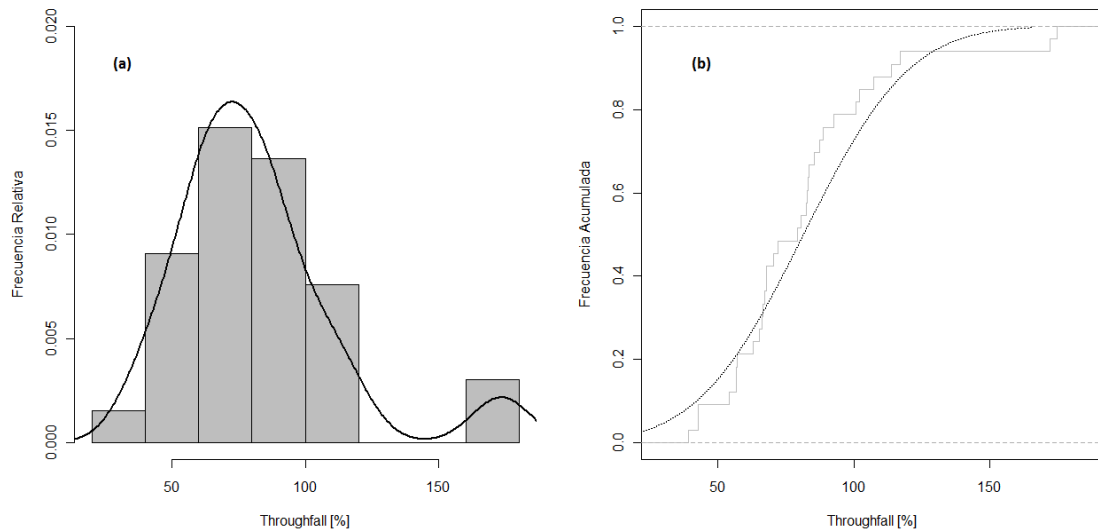
Elaborado por: Autor.

es significativamente diferente de una distribución normal ($p = 0.0006$).

En Media Luna, se obtuvo una media de 152 % y una mediana de 135 % a partir de 13 colectores, una diferencia mucho más grande. En la figura 5.4 se puede observar una función de distribución de probabilidades bimodal y una distribución acumulada muy alejada a lo que sería una distribución normal. Usando la prueba Shapiro and Wilk se determinó que es significativamente diferente de una distribución normal ($p = 0.007$).

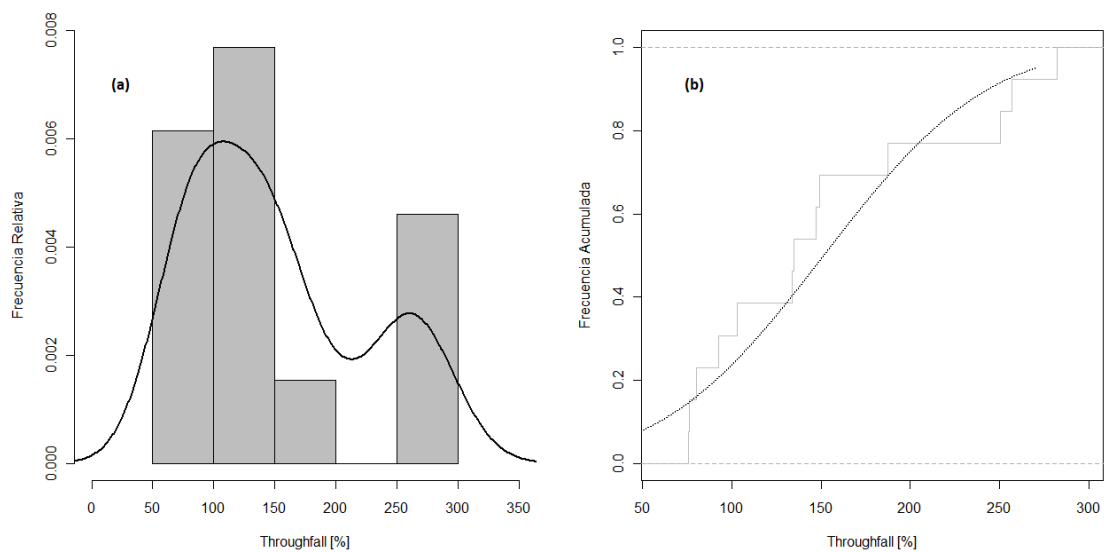
En general no existe sorpresa en las distribuciones, se esperaba de antemano distribuciones sesgadas positivamente con una cola larga debido a la presencia de puntos de goteo en el dosel de la parcela. En algunos estudios (Lloyd and Marques, 1988; Holwerda et al., 2006; Zimmermann et al., 2009) se muestra una distribución espacial sesgada positivamente igual que en este estudio, aunque estos con un mayor número de puntos medidos tienen colas sin pansas. Se podría decir que en Villacís se tiene una distribución común para el throughfall (distribución casi normal sesgada positivamente), sin embargo en Media Luna, no es el caso. Esta distribución bimodal advierte la presencia de un alto número de valores extremos en relación al total, y esto puede ser debido a que por consecuencia se colocaron este número de colectores en puntos de goteo o a la existencia de sectores dentro de la parcela donde existe valores más altos de throughfall.

Figura 5.3: Funciones de distribución para 33 colectores en la parcela de Villacís. (a) Histograma de frecuencias y función de distribución acumulada. (b) Gráfico de frecuencias acumuladas y función de distribución acumulada para una distribución normal de igual media y desviación estándar.



Elaborado por: Autor.

Figura 5.4: Funciones de distribución para 13 colectores en la parcela de Media Luna. (a) Histograma de frecuencias y función de distribución acumulada. (b) Gráfico de frecuencias acumuladas y función de distribución acumulada para una distribución normal de igual media y desviación estándar.



Elaborado por: Autor.

5.3. CLASIFICACIÓN DE LOS COLECTORES

Determinando la no normalidad de las distribuciones de los colectores se procedió a clasificar los colectores donde la clasificación se la realizó conforme a la figura 4.11.

En Villacís, se presentaron 3 colectores con un throughfall relativo menor a 52 % correspondientes a los colectores secos. Dos colectores mayores a 118 % correspondientes a colectores mojados. Finalmente se tuvieron 28 colectores en el grupo de colectores medios. En la tabla 5.2 se puede ver el área que representa cada grupo.

Tabla 5.2: Clasificación de los colectores en la parcelas de Villacís.

Tipo	Número	Porcentaje	
		Colectores ^a	Parcela ^b
Secos	3	9	0.4
Medios	28	85	3
Mojados	2	6	0.1
TOTAL	33	100	4

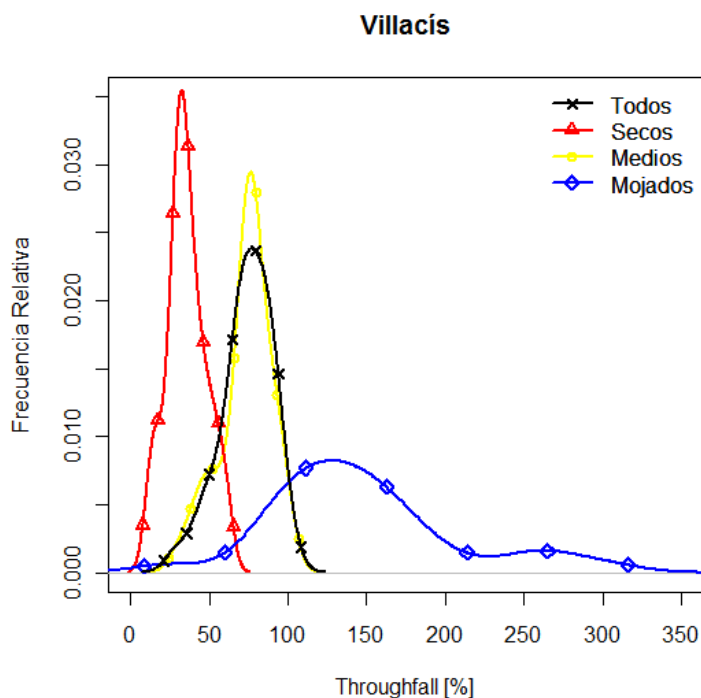
^a Porcentaje respecto al área total de colectores.
^b Porcentaje respecto al área de la parcela.

Elaborado por: Autor.

Una vez clasificados los colectores se realizó funciones de distribución de probabilidad temporal de cada uno de los grupos, usando la media de cada grupo de colectores en todos los periodos medidos. En la figura 5.5 se puede ver las distintas distribuciones de cada grupo de colectores. Las máximas frecuencias están claramente definidas y separadas conforme cada grupo. El grupo de colectores medios se presenta con una distribución normal y con valores concentrados. El grupo de colectores secos parece bastante regular y es donde se encuentra la mayor concentración, mientras que el de mojados presenta una dispersión muy grande. Todo esto quiere decir que cada grupo de colectores se comportan de distintas maneras comprobando la importancia de la clasificación.

En Media Luna, 3 colectores menores a 81 % formaron parte del grupo de los secos, 3 colectores mayores a 244 % están en el grupo de los mojados y 7 colectores forman el grupo de colectores medios. A pesar del número reducido de colectores comparado con Villacís, se tiene prácticamente el mismo número de colectores secos (3 en Villacís y Media Luna) y mojados (2 en Villacís y 3 en Media Luna), y esto es debido a la gran dispersión de los datos y a la existencia de valores muy extremos (en especial en el lado

Figura 5.5: Funciones de distribución de probabilidad de colectores clasificados en la parcela de Villacís.



Elaborado por: Autor.

de los mojados). En la tabla 5.3 se muestra el resumen.

Tabla 5.3: Clasificación de los colectores en la parcelas de Media Luna.

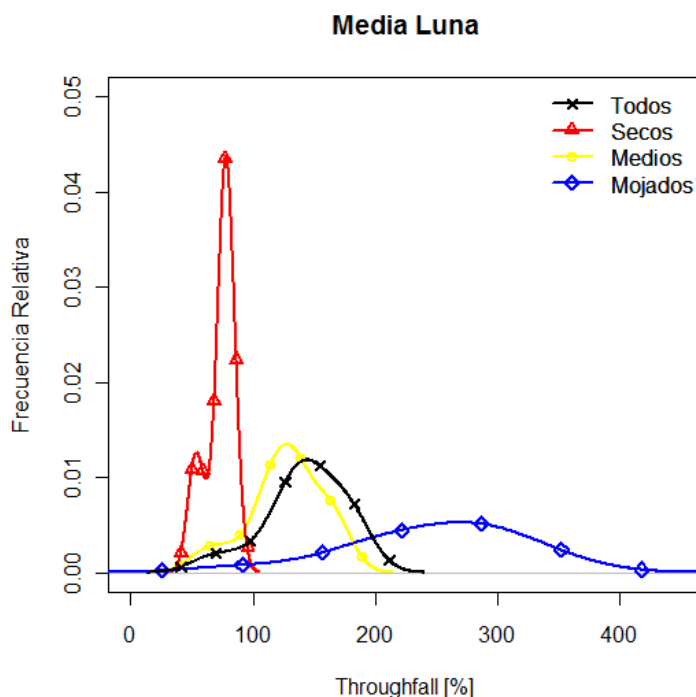
Tipo	Número	Porcentaje	
		Colectores ^a	Parcela ^b
Secos	3	23	0.6
Medios	7	54	1.4
Mojados	3	23	0.6
TOTAL	33	100	4

^a Porcentaje respecto al área total de colectores.
^b Porcentaje respecto al área de la parcela.

Elaborado por: Autor.

En la figura 5.6 se puede ver al igual que Villacís un comportamiento muy diferente entre cada grupo de colectores, notándose una clara diferencia entre los colectores secos (mucho menos dispersos) y los colectores mojados (dispersión muy grande), esta diferencia será explicada en la sección 5.11.

Figura 5.6: Funciones de distribución de probabilidad de colectores clasificados en la parcela de Media Luna.



Elaborado por: Autor.

5.4. COMPARACIÓN CANALES-COLECTORES

Tomando en cuenta que las distribuciones en todos los grupos de colectores son bastante diferentes, se realizó la comparación de todos los grupos con la distribución de los canales siguiendo el procedimiento resumido en la figura 4.12. Además de los grupos conocidos anteriormente, se realizó combinaciones entre ellos, en total se tuvieron 7 grupos a comparar con los canales. En la tabla 5.4 se presenta un resumen de las comparaciones.

En Villacís, de las pruebas realizadas se obtuvo que los grupos que no tienen una diferencia significativa son el grupo 1, 3 y 6. El que se asemeja más a los canales es el grupo de colectores medios, por lo que se podría decir que los canales representan este grupo. Sin embargo, no existe diferencia significativa entre el grupo de todos los colectores y los canales, por lo que se puede decir que los canales también representan a este grupo. Diciendo esto se concluye, que tanto las estimaciones de los canales como la de los colectores son parecidas y finalmente ya que se tiene mayores datos de los canales, el valor de throughfall de los canales se lo va a tomar en cuenta como el valor

Tabla 5.4: Comparación de las estimaciones de los grupos de colectores (secos, medios y mojados) y combinaciones con las estimaciones de los canales en las parcelas de Villacís y Media Luna.

Número ^a	Grupo	Villacís		Media Luna	
		Prueba ^b	valor-p ^c	Prueba ^b	valor-p ^c
1	Todos	W	0.181	T	0.007***
2	Secos	W	3×10^8 ***	W	0.016**
3	Medios	T	0.319	T	0.481
4	Mojados	W	6×10^9 ***	T	0.0002***
5	Secos-Medios	W	1×10^{10} ***	T	0.0004***
6	Medios-Mojados	T	0.142	T	0.0014***
7	Secos-Mojados	T	0.0199**	T	0.0011***

^a Número de grupo
^b Prueba estadística de comparación pareada. T se refiere a la *prueba t* de Student. W se refiere a la prueba *Wilcoxon de Signos*.
^c Probabilidad de tener un valor extremo como el observado asumiendo que no existe diferencia.
* Significante para el intervalo de confianza del 90 %.
** Significante para el intervalo de confianza del 95 %.
*** Significante para el intervalo de confianza del 99 %.

Elaborado por: Autor.

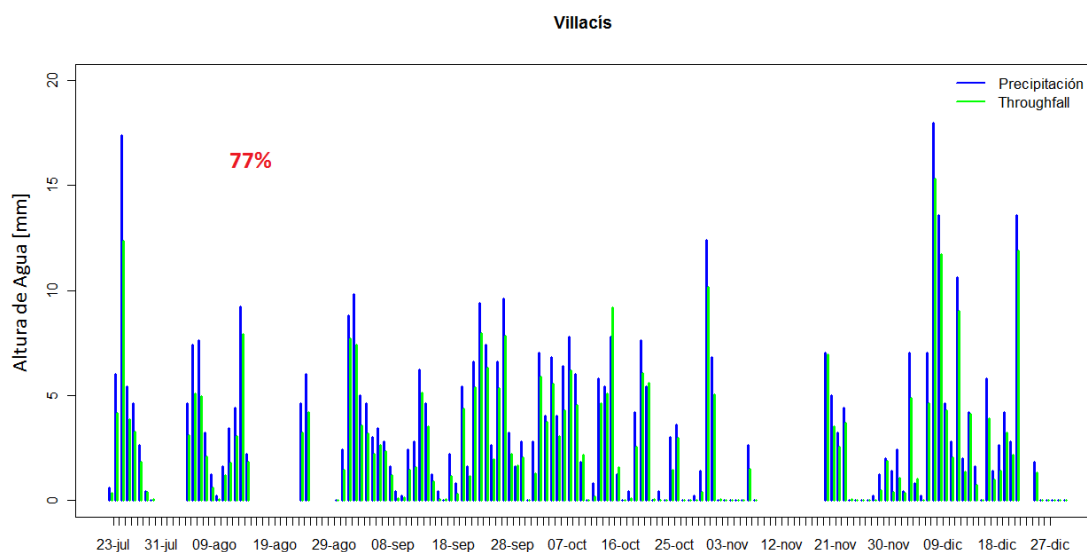
de referencia para análisis más detallados porque los datos son continuos.

En Media Luna, se debe tomar en cuenta que debido a malfuncionamiento de los canales durante el periodo de medición de los colectores solo se cuenta con 6 pares de datos, por lo que únicamente se usó estos datos para la comparación. El único grupo que no presenta una diferencia significativa es el de los colectores medios. Esto implica que, al diferir el grupo de todos los colectores con los canales no se puede tener estimaciones representativas de ninguno de los dos métodos, ya que no se sabe con certeza cual podría ser el más representativo o si ninguno de los dos es representativo. Sobre este tema se va a hablar más extendidamente en la sección 5.7.2. Las estimaciones de los canales, al tener un mayor número de datos y al representar el 54 % de los colectores, se las usó como valor principal de la parcela.

5.5. CUANTIFICACIÓN

Como resultado de la cuantificación en los canales se obtuvo un valor de throughfall relativo de 77 % en Villacís y de 122 % en Media Luna para cada uno de los respectivos periodos de medición. En la tabla 5.5 se resume la cuantificación. En Villacís, el throughfall relativo de 104 eventos varía entre 35 % y 113 %, donde aproximadamente el 5 % de los eventos tuvieron valores de throughfall relativo mayores al 100 % y el 6 % valores

Figura 5.7: Representación de valores diarios de throughfall y precipitación en la parcela de Villacís



Elaborado por: Autor.

menores al 50 %. En Media Luna, el throughfall relativo de 61 eventos varía entre 83 % y 175 %, en donde el 95 % de los eventos fueron mayores al 100 %.

Tabla 5.5: Resumen de cuantificación de throughfall en las parcelas de Villacís y Media Luna.

Variable	Unidad	Villacís	Media Luna
Periodo		Julio-Diciembre	Septiembre-Diciembre
Tiempo	días	134	84
Throughfall	mm	369.5	436.2
Precipitación	mm	478.8	357.2
Throughfall ^a	%	77.2	122.1

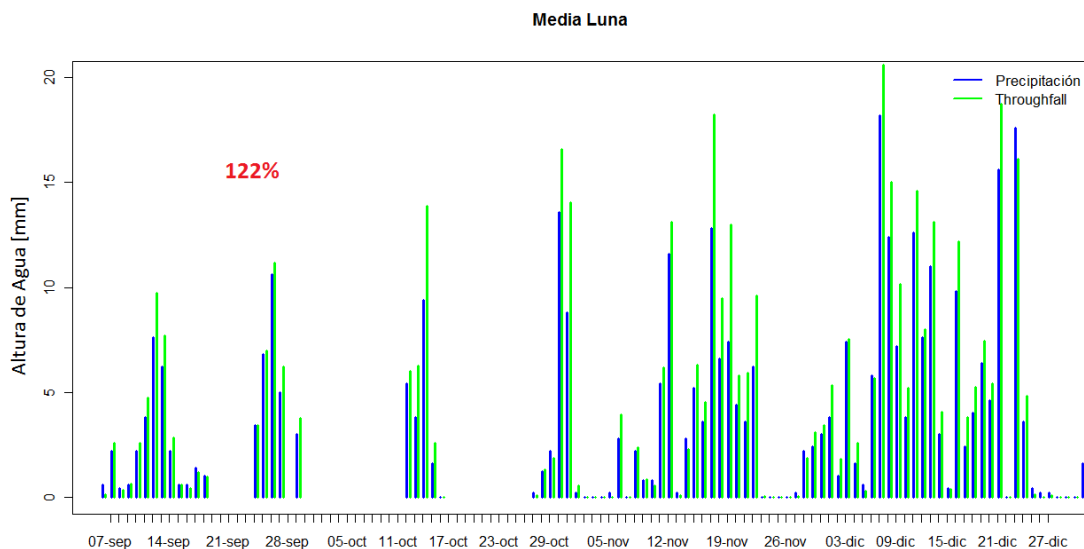
^a Throughfall relativo como porcentaje de la precipitación.

Elaborado por: Autor.

En la figura 5.7 y en la figura 5.8 se presenta la cantidad diaria de throughfall y precipitación en Villacís y Media Luna respectivamente.

Medias similares a Villacís se pueden ver en estudios como [Ziegler et al. \(2009\)](#), donde se obtuvo un valor de 81 % en un bosque siempreverde de Tailandia y un valor de 84 % en [Carlyle-Moses et al. \(2004\)](#) en un bosque de roble en el Noreste de México. La media de throughfall relativo parece ser un valor alto para otro estudio ([Fleischbein et al., 2006](#)) hecho en Loja (Ecuador), en un bosque siempreverde montano donde se obtuvo un 58 % aproximadamente. En cambio es un valor bajo en comparación al 91 %

Figura 5.8: Representación de valores diarios de throughfall y precipitación en la parcela de Media Luna.



Elaborado por: Autor.

obtenido en la selva tropical del amazonas (Brasil) (Lloyd and Marques, 1988) y en un bosque siempreverde no estacional en Cavalry (Costa de Marfil) (Hutjes et al., 1990).

Comparando el valor de Media Luna con otros estudios es bastante alto, pero la característica en Media Luna es la presencia de neblina y su intercepción. En el estudio de Holwerda et al. (2006) se obtuvo un valor de 121 % en un bosque de neblina tropical montano en Pico del Este (Puerto Rico), en donde las condiciones son similares al actual estudio.

Los valores de throughfall relativo en los canales para el periodo de medición de los colectores fueron de 80 % y 132 % en Villacís y Media Luna respectivamente.

5.6. REPRESENTATIVIDAD ESPACIAL

5.6.1. VILLACÍS

Para la determinación espacial, primero se usó el grupo de todos los colectores, ya que toman en cuenta todo tipo de puntos (secos, medios y mojados) cuya ocurrencia se desconoce, por lo tanto no se les puede obviar y se lo debe tomar en cuenta. Además el grupo de todos los colectores tiene una media espacial prácticamente igual al grupo de los colectores medios (81 % y 79 % respectivamente) que fueron los que menor

diferencia tuvieron con los canales.

Las variables que miden la representatividad se basan en el supuesto de una distribución normal, en este caso todos los colectores no presentan una distribución normal. Entonces tomando en cuenta que el 85 % de los colectores hacen una distribución normal, se asumió que todos los colectores tienen una distribución normal sumados valores extremos. Asumiendo esto se puede trabajar normalmente, sin embargo por la presencia de estos valores extremos algunos valores pueden estar sobreestimados.

Tabla 5.6: Resumen estadístico de las variables que determinan la representatividad espacial en la parcela de Villacís.

Variable	Unidad	Valor
$\bar{M} \pm tES^a$	% [*]	81.4 ± 10.9
CV ^b	% ^{**}	37.7
E ^c	% ^{**}	13.4
n_{min}^d	-	51

^a media ± error estándar para el intervalo de confianza del 95 % calculado con el estadístico *t* de Student y *n*-1 grados de libertad.

^b coeficiente de variación para la dispersión espacial como porcentaje de la media.

^c error expresado como porcentaje de la media.

^d número mínimo de colectores necesarios para tener un error deseado del 10 % con un intervalo de confianza del 95 %.

^{*} porcentaje referido al throughfall relativo.

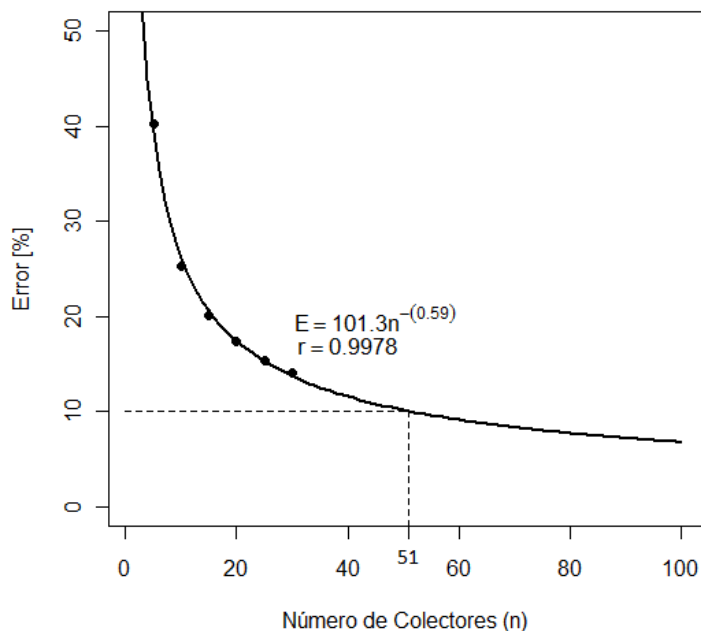
^{**} porcentaje obtenido de la relación de dos variables.

Elaborado por: Autor.

La representatividad de los colectores se expresa en el resumen estadístico de la tabla 5.6, en donde el intervalo de confianza del 95 % fue (70.5, 92.3). El coeficiente de variación muestra una gran dispersión espacial en los colectores, en estudios como Keim et al. (2005); Staelens et al. (2006) donde se estudió el throughfall a pequeña escala también se determinó la existencia de una gran variabilidad espacial. El error obtenido de 13.4 % es mayor al recomendado para tener una buena representatividad (10 %) pero sin embargo está cercano al mismo.

Se determinó la relación entre el número de colectores y el error. Para esto se usó muestras de varios números de colectores, de cada muestra se estimó el error y se sacó un promedio de todos los errores de cada muestra. Se necesitaron sacar 10000 muestras aleatorias para que la media tenga variaciones despreciables. Estas medias se las puso en la figura 5.9 en donde se determinó una función que se ajuste a estos puntos

Figura 5.9: Relación exponencial entre el número de colectores y el error determinado con 10000 muestras de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 colectores.



Elaborado por: Autor.

($r = 0.9978$). Finalmente obtenida la función se determinó el número de colectores para tener un error del 10 %, siendo 51 el número de colectores necesarios.

5.6.2. MEDIA LUNA

Existe un desconocimiento en la estimación del throughfall por medio de colectores o canales, por este motivo la estimación de la representatividad espacial está condicionada, los valores pueden no representar de manera adecuada a la parcela. Partiendo de esto, se usó el grupo de todos los colectores que representa una mayor área (el mayor número de colectores) que el resto de grupos a pesar que tiene una diferencia significativa con los canales.

En este caso no se puede asumir una distribución normal por ningún lado, ya que la mitad de los colectores son de distintos grupos (demasiados valores extremos), entonces no se pueden usar las variables comunes sino que se debe usar variables que representen de mejor manera la distribución.

Tabla 5.7: Resumen estadístico de las variables que determinan la representatividad espacial en la parcela de Media Luna de la forma robusta y la forma normal.

Forma Robusta			Forma Normal		
Variable	Unidad	Valor	Variable	Unidad	Valor
$\hat{M} \pm tES(\hat{M})^a$	% [*]	135 ± 28	$\bar{M} \pm tES$	% [*]	151.4 ± 43.5
CVM ^b	% ^{**}	38.7	CV	% ^{**}	47.5
E ^c	% ^{**}	20.7	E	% ^{**}	28.7
n_{min}^d	-	-	n_{min}^d	-	102

^a mediana ± error estándar para la mediana para el intervalo de confianza del 95 % calculado con el estadístico *t* de Student y *p* grados de libertad.
^b coeficiente de variación robusto, la desviación absoluta de la mediana como porcentaje de la mediana.
^c error expresado como porcentaje de la mediana.
^d número mínimo de colectores necesarios para tener un error deseado del 10 % con un intervalo de confianza del 95 %.
^{*} porcentaje referido al throughfall relativo.
^{**} porcentaje obtenido de la relación de dos variables.

Elaborado por: Autor.

Primero no se usó la media, se usó la mediana como una medida más robusta. Se determinó intervalos de confianza del 95 % respecto de la mediana un procedimiento (Olive, 2005) que permite tener intervalos más representativos (ya que son más resistentes a valores extremos). En vez de usar el CV se usó MAD/\hat{M} (CVM) el equivalente de forma robusta. El error se lo determinó de la misma manera que Villacís. El número mínimo de colectores depende de CV por lo que se lo debe obtener normalmente, sin embargo al existir pocos colectores la relación entre ellos y el error se ve comprometida, por lo que se calculó el número mínimo de colectores usando la fórmula descrita en la sección 4.3.3.4 obtuvo de la misma manera que para Villacís.

La tabla 5.7 presenta el resumen estadístico de los valores robustos y los valores normales que sirven solamente como comparación entre ellos. Claramente se puede apreciar como los métodos normales sobreestiman estos valores.

5.7. ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO

De la sección anterior, se pudo observar que existe una gran varibilidad espacial (dispersión espacial alta) en el throughfall, lo que se pretendió hacer aquí es determinar si existe autocorrelación espacial entre los colectores.

5.7.1. VILLACÍS

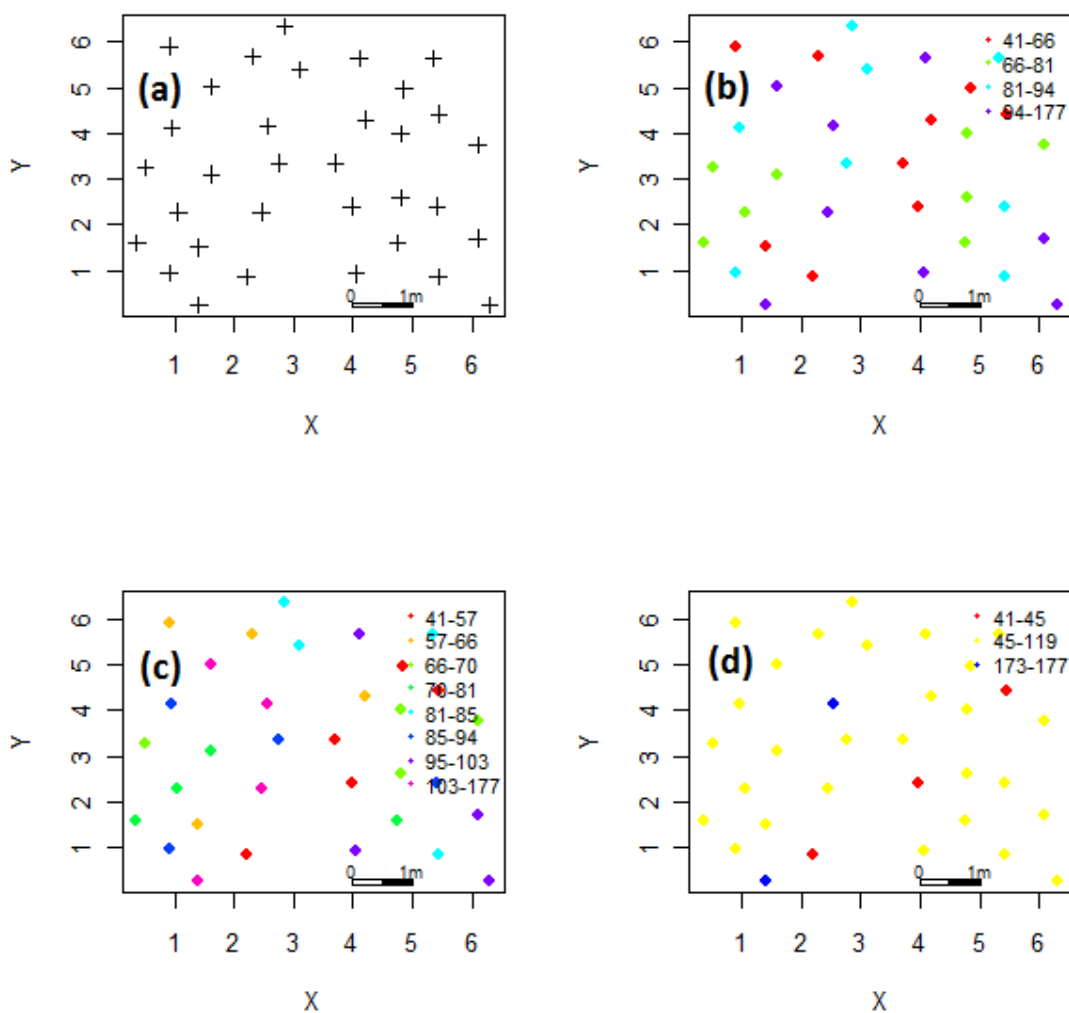
A partir del análisis exploratorio resumido en la tabla 5.1, se realizaron gráficos de la ubicación espacial de los colectores con sus respectivos valores de throughfall como se ve en la figura 5.10, donde al parecer de manera general el throughfall está distribuido aleatoriamente existen valores bajos y altos en todo sitio, a excepción de dos pequeños sectores que parecen concentrar valores bajos y altos de throughfall, y parece no existir anisotropía.

5.7.1.1. Variograma General

La distribución de los datos resultó no ser normal, sin embargo no se hizo transformación ($skew_8 = -0.05$). Revisando la nube de variograma se decidió construir un variograma con el estimador de Cressie como se explicó en la sección 4.3.3.5. Para el variograma teórico se usó un modelo esférico usando como ajuste el método de máxima verosimilitud. En la figura 5.11, se puede ver que el variograma teórico alcanza su meseta en un rango menor a 2.4 m, esto quiere decir que podría existir una autocorrelación espacial hasta un rango de 1.5-2.5 m. Algo similar se encontró en [Staelens et al. \(2006\)](#), donde se realizó un variograma en una parcela de 24x24 m, se sugirió una autocorrelación de 2-3 m para el periodo sin hojas (colectores de 14.2 cm de diámetro) y una autocorrelación de 3-4 m para el periodo de hojas (colectores de 24.2 cm de diámetro) en un bosque mixto deciduo. En cambio en [Zimmermann et al. \(2009\)](#) no se encontró autocorrelación en el 82 % de los eventos medidos en una parcela de 1 ha en un bosque húmedo semideciduo, y especulan que esta falta de autocorrelación es debido a la gran variabilidad de vegetación en el sotobosque.

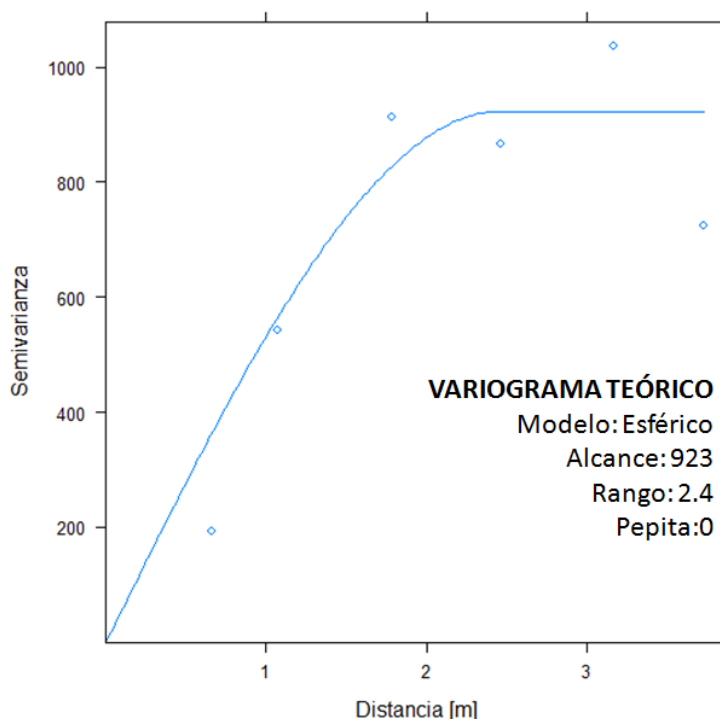
Algo importante que se debe tomar en cuenta, es la inexistencia de colectores a cortas distancias (menores a 0.8 m), causando incertidumbre en el inicio del variograma. Puede ocurrir que a distancias pequeñas no exista autocorrelación, y el modelo usado no sería válido. Debido a posibles errores en las estimaciones y a la posible existencia de microvariabilidad, lo más probable es que el variograma tenga efecto pepita, algo que no aparece en el modelo usado. Con el modelo teórico y el variograma experimental se realizó un krigeaje ordinario en el área de la parcela con una resolución de grilla de 10x10 cm (figura 5.12). En la figura se puede ver como uno de los puntos de goteo influencia una área relativamente grande a tener valores cercanos a éste, sin embargo, estos puntos de goteo no ocupan grandes áreas y solo modifican a la pequeña área

Figura 5.10: Distribución espacial de los colectores en la parcela de Villacís. (a) Posición aleatoria de los colectores en la parcela, donde los espacios grandes sin colectores son de troncos existentes. (b) Posición de los colectores en la parcela, donde los colectores han sido divididos en cuartiles representados por diferentes colores. Se puede apreciar una pequeña concentración de valores bajos por la derecha y de valores altos por la izquierda. (c) Posición de los colectores en la parcela, donde los colectores han sido divididos en octiles representados por distintos colores. Parece ser que existe varias parejas de colectores del mismo color juntos. (d) Posición de los colectores en la parcela, donde los colectores han sido divididos por grupo de seco, medios y mojados. Al parecer los colectores extremos, tanto secos como mojados no están concentrados en ningún sector.



Elaborado por: Autor.

Figura 5.11: Variograma experimental y modelo teórico de mejor ajuste por máxima verosimilitud en la parcela de Villacís.



Elaborado por: Autor.

en donde están. Su presencia parece modificar la distribución espacial del throughfall, y aumentar la variabilidad espacial.

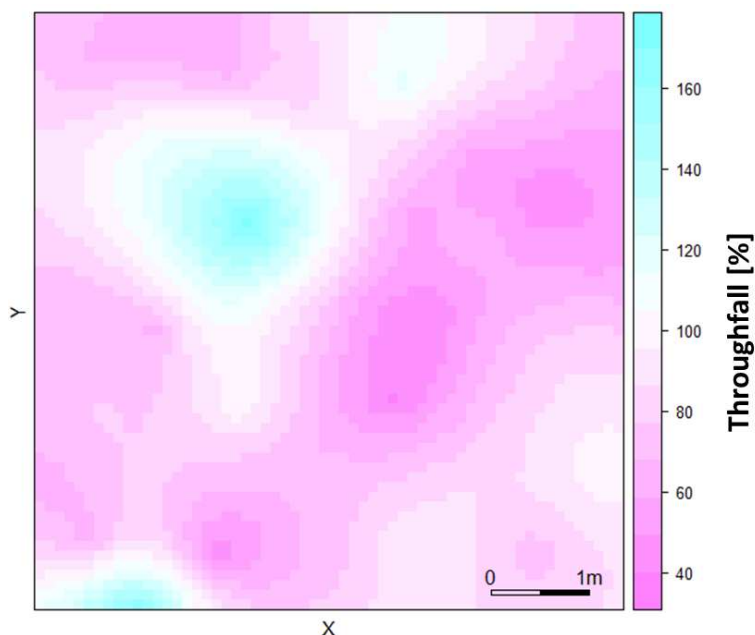
5.7.1.2. Variogramas Periódicos

Los datos se los dividió en semanas, de lo que se obtuvieron 13 variogramas. La tabla 5.8 presenta un resumen del análisis de los variogramas. El 30 % de las semanas tuvieron un $skew_8$ mayor a 0.2 por lo que se les aplicó una log transformación. No existe una relación aparente entre la altura de lluvia acumulada y el valor del sesgo octil.

En cuanto al estimador del variograma, se usó 6 veces el de Cressie y 7 veces el de Matheron, donde el de Cressie resultó ser más efectivo para magnitudes altas de throughfall, en donde el estimador de Matheron sobreestimaba la semivarianza en el 46 % de los datos como consecuencia de la existencia de valores extremos.

El modelo de ajuste más usado fue el exponencial, pero también se usó el modelo esférico y el de pepita puro. No existe ninguna relación entre el tipo de modelo y la magnitud de la precipitación, tampoco una relación con el tiempo. Aunque los modelos

Figura 5.12: Distribución espacial del throughfall en la parcela de Villacís con kriging ordinario a partir del variograma experimental y el modelo teórico con resolución de 10x10cm.



Elaborado por: Autor.

exponenciales fueron los que mejor se ajustaron muestran la inexistencia del efecto pepita, y asumen una forma en las distancias (0-1 m) que no puede ser corroborada por la falta de datos en esas distancias.

En cuanto, a los parámetros de los modelos, el alcance presenta gran variabilidad entre las distintas semanas. El efecto pepita solo se encuentra en el 30 % de los datos debido al problema de no tener datos a distancias pequeñas, y debido a la micro variabilidad y a errores de medición se esperaría la existencia de este efecto. El rango también es variable, pero se encuentra alrededor de 1 m para el modelo exponencial y para el modelo esférico está mayor que 2 m.

5.7.2. MEDIA LUNA

El análisis geoestadístico resulta difícil y poco confiable debido a la cantidad reducida de colectores, por lo que solamente se realizó un análisis superficial. A partir de la figura 5.13 se puede notar que existe una zona (derecha de la parcela) en donde se encuentran los valores más altos de throughfall. Además para ser que los valores más bajos están en la parte superior izquierda de la parcela. Tomando en cuenta esto, parece existir relación entre la posición del colector respecto a la cantidad de throughfall,

Tabla 5.8: Resumen del análisis de la obtención de los modelos de variograma para los datos de throughfall relativo ($n = 13$ semanas) en la parcela de Villacís.

Semana	Skew ₈	Estimador ^a	Modelo ^b	Pepita	Alcance	Rango	Ajuste ^c
1	0.14	C	Exp	0	1165	0.76	MC
2	0.07	C	Nug	1232	-	-	MC
3	0.03	M	Exp	0	1064	1.11	MV
4	-0.11	M	Nug	665	-	-	MC
5	0.06	M	Exp	0	1939	1.14	MC
6	0.51 ^{log}	C	Sph	0	0.057	1.95	MV
7	0.26 ^{log}	M	Sph	0	0.069	2.28	MV
8	0.15	M	Exp	0	1058	1.24	MC
9	0.19	C	Exp	0	1490	0.0.95	MV
10	0.20	C	Exp	0	1455	0.86	MC
11	0.10	M	Sph	381	775	3.80	MC
12	0.28 ^{log}	M	Nug	0.0229	-	-	MC
13	0.29 ^{log}	C	Exp	0	0.017	0.80	MC

^a M (Matheron), C (Cressie).
^b Exp (Exponencial), Sph (Esférico), Nug (Pepita Puro).
^c MC (Mínimos cuadrados), MV (Máxima verosimilitud).
^{log} Datos log-transformados.

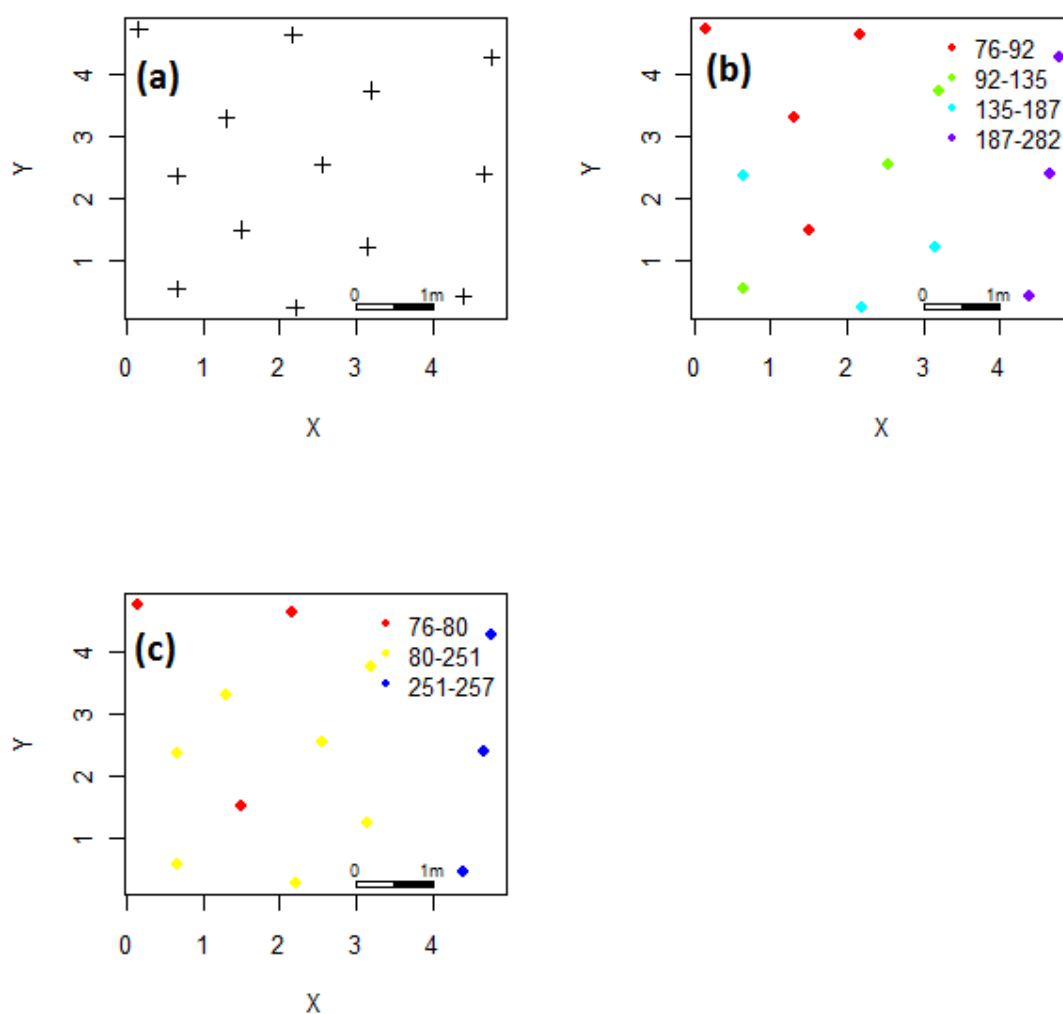
Elaborado por: Autor.

es decir parece existir anisotropía, los valores de throughfall van de mayor a menor en dirección de derecha a izquierda y de abajo hacia arriba.

La zona de magnitudes altas de throughfall corresponde al borde de los arbustos de miconia, la cual está expuesta al viento, resulta que el viento tiene dirección de derecha a izquierda de la parcela, por lo que solo esta zona tiene contacto con los vientos, mientras que el resto de la parcela está cubierta, y por este motivo prácticamente el viento no tendría influencia en ella.

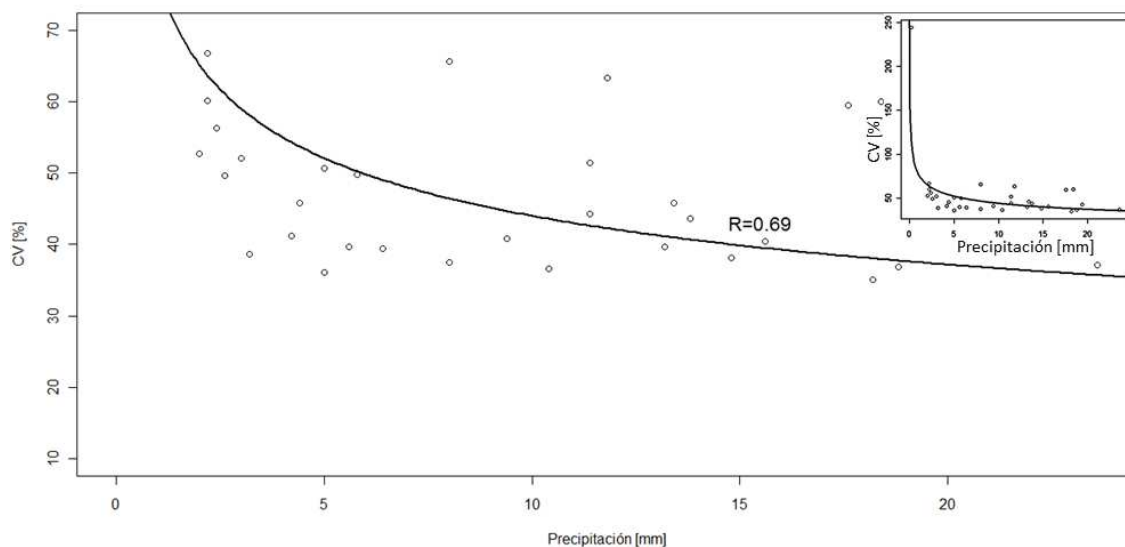
Los valores altos de throughfall se podrían explicar por la intercepción de neblina, en donde la posición perpendicular de las miconias a la dirección del viento, y su intensidad tienen gran influencia como está descrito en la sección 3.1.2.3. Al contrario, los valores más pequeños se encuentran donde el viento no tiene influencia.

Figura 5.13: Distribución espacial de los colectores en la parcela de Media Luna. (a) Posición aleatoria de los colectores en la parcela. (b) Posición de los colectores en la parcela, donde los colectores han sido divididos en cuartiles representados por diferentes colores. Se puede apreciar que los valores más altos están a la derecha y los más bajos a la izquierda. (c) Posición de los colectores en la parcela, donde los colectores han sido divididos por grupo de seco, medios y mojados.



Elaborado por: Autor.

Figura 5.14: Relación entre el coeficiente de variación y la precipitación en la parcela de Villacís. El gráfico grande es un acercamiento del gráfico completo en el mismo gráfico.



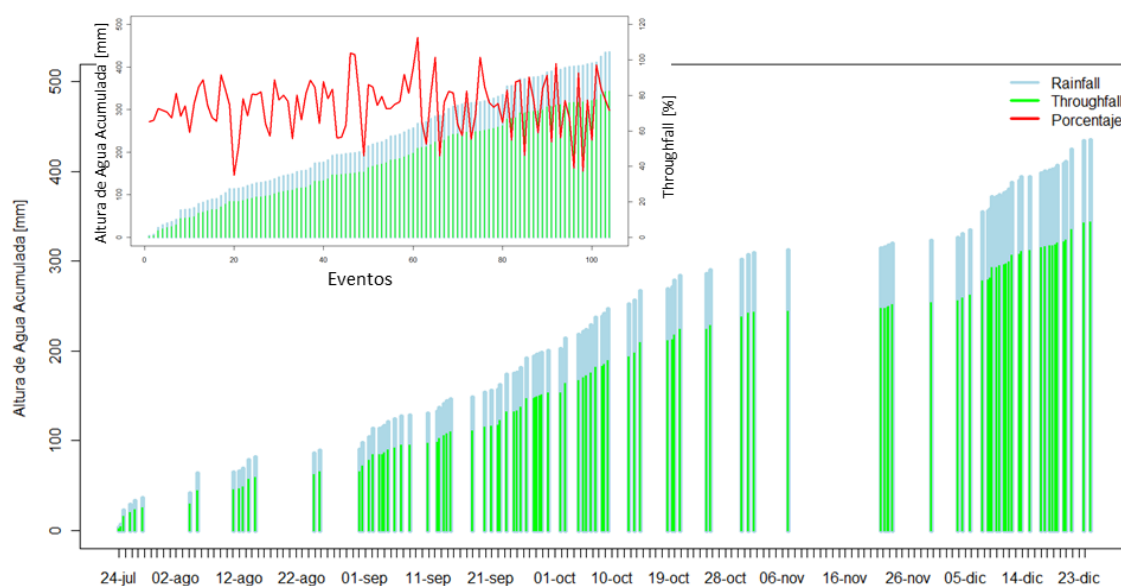
Elaborado por: Autor.

5.8. VARIABILIDAD ESPACIAL RESPECTO A LA PRECIPITACIÓN

Se trató de encontrar una relación entre la variabilidad espacial expresada por el coeficiente de variación (CV) y la precipitación. Ya es conocida la existencia de una relación negativa entre la variabilidad espacial del throughfall y la altura de precipitación (Staelens et al., 2006). En Villacís, al parecer el CV disminuye asintóticamente con el incremento de la cantidad de precipitación. En Zimmermann et al. (2009), también encontró dicha relación en un bosque tropical húmedo semidecídulo en la isla Barro Colorado en Panamá. Similarmente, en Staelens et al. (2006) se encontró una muy fuerte relación negativa en un bosque mixto caducifolia en Bélgica, en donde se explica que para pequeños cantidades de lluvia la capacidad de almacenamiento de agua de la canopea tiene diferencias relativamente altas, y por esto existe un alto grado de variabilidad espacial, mientras que para cantidades de lluvia mayores, la canopea se encuentra totalmente saturada.

En la figura 5.14 se puede ver dicha relación, donde la función que más se ajustó a los datos fue una función logarítmica ($r = 0.69$). No se tiene un buen ajuste posiblemente porque los datos son de cada periodo de medición, los cuales tienen duración de 2-3 días, en donde en cada periodo ocurrieron diferente número de eventos de precipitación y de distintas intensidades. Otro factor que puede influenciar a la poca relación existente

Figura 5.15: En Villacís, throughfall y precipitación acumulada en la fecha de inicio de cada evento de precipitación. En el gráfico pequeño está la variabilidad del throughfall relativo por evento.



Elaborado por: Autor.

son los puntos de goteo, ya que elevan los valores de CV, esto puede explicar que algunos valores en la gráfica son bastante altos para distintas cantidades de precipitación. A partir de los datos obtenidos, se podría suponer que existe relación entre la variabilidad espacial y la precipitación, pero no se puede afirmar su existencia.

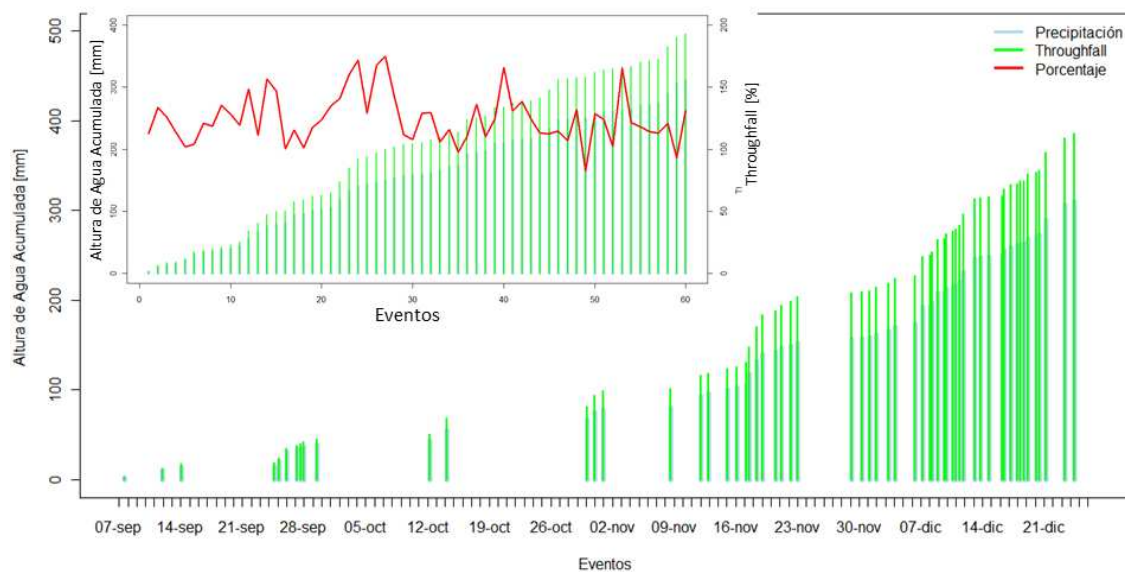
En Media Luna, no se encontró ninguna función que se ajuste con una correlación aceptable a los datos, por lo que no se encontró relación entre el CV y la precipitación. Nuevamente el número reducido de colectores y de mediciones no permite dar una explicación convincente.

5.9. VARIABILIDAD TEMPORAL

Para este análisis se utilizaron los eventos de throughfall. En Villacís, los valores de throughfall relativo por periodo varían desde 35 % hasta 113 %, con una media de 74 % y una mediana de 76 %. Solo el 4 % de los eventos tuvo un throughfall relativo mayor al 100 %. En Media Luna, el throughfall relativo varía entre 83 % y 175 %, con una media de 125 % y una mediana de 121 %. El 95 % de los eventos tuvo un throughfall relativo mayor al 100 %.

Como se puede ver en la figura 5.15 y la figura 5.16, la variación de throughfall relativo

Figura 5.16: En Media Luna, throughfall y precipitación acumulada en la fecha de inicio de cada evento de precipitación. En el gráfico pequeño está la variabilidad del throughfall relativo por evento.



Elaborado por: Autor.

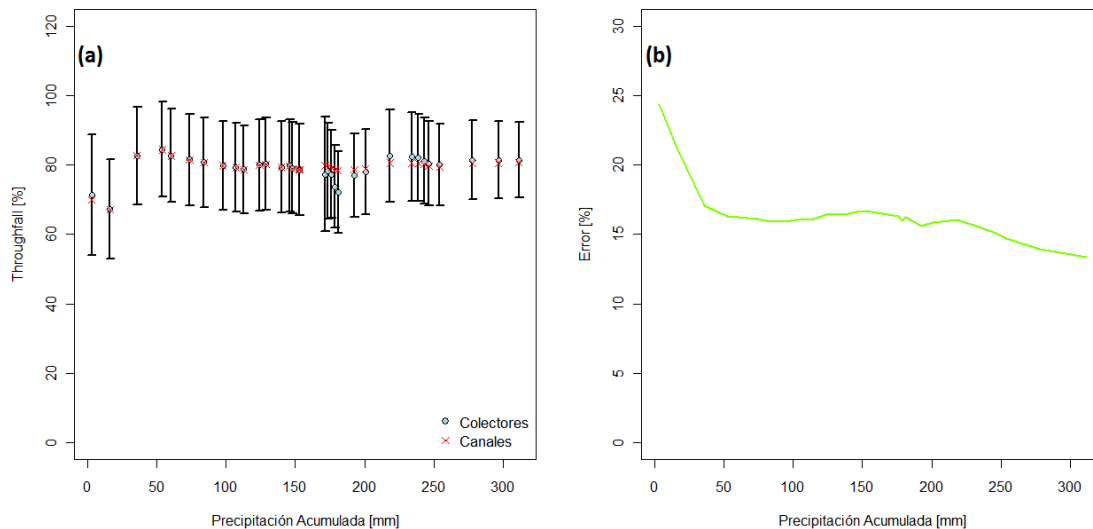
es independiente al día del evento, esto quiere decir que valores altos y bajos suceden a lo largo de todo el periodo de medición. Algo que se notó, es que en muchos días se tiene valores máximos de throughfall relativo en eventos de gran magnitud, mientras que los valores más bajos aparecen en eventos pequeños. Esto se podría explicar nuevamente por la capacidad de almacenamiento de agua de la canopea, en donde en eventos pequeños gran parte de la precipitación no llega a caer al suelo en comparación a eventos grandes.

5.9.1. ESTABILIDAD

El estudio de variabilidad espacial se lo realizó con los colectores, por 3 meses (36 mediciones) en Villacís y 1 mes (15 mediciones) en Media Luna.

En Villacís, según la figura 5.17 se logró un valor de throughfall relativo (el porcentaje de throughfall acumulada respecto a la precipitación acumulada en cada periodo) estable a partir de la 6ta medición (70 mm de precipitación), es decir después de 2 semanas de medición, en donde a partir de este valor no existe mucha variación tanto en los canales como en los colectores. La desviación estándar en los colectores parece disminuir relativamente poco con el aumento de la cantidad de precipitación, prácticamente este valor permanece estable a lo largo de todo el periodo de medición. El error disminuye

Figura 5.17: Estabilización del throughfall y del error en Villacís. (a) Estabilización del throughfall relativo respecto a la precipitación acumulada en los periodos de medición de los colectores. Las barras representan el intervalo de confianza para el 95 % de la media de throughfall de los colectores. (b) Variación del error como porcentaje de la media respecto a la precipitación acumulada en los periodos de medición de los colectores.



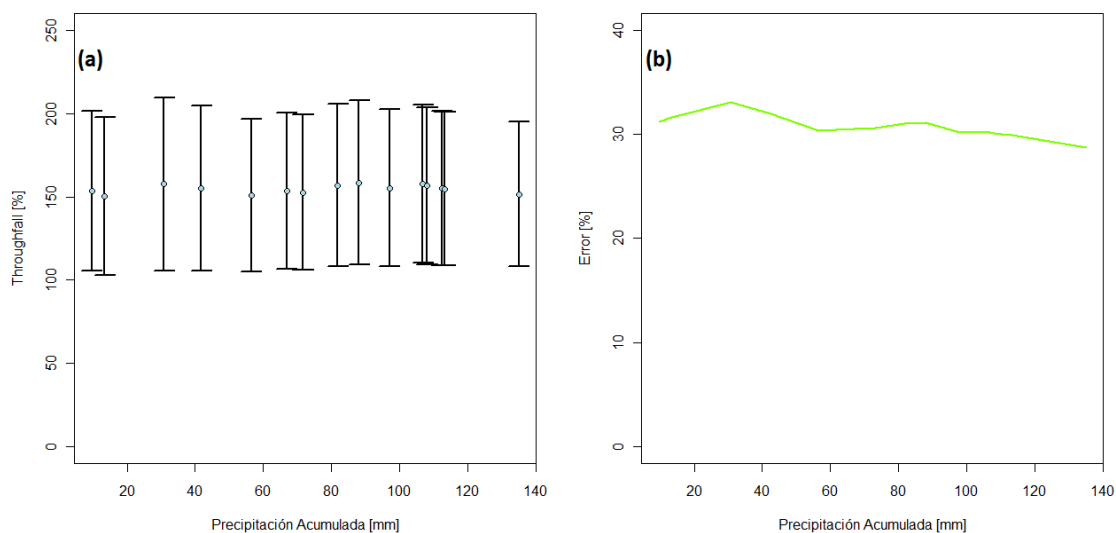
Elaborado por: Autor.

rápidamente en las tres primeras mediciones, y para el resto disminuye lentamente. El tiempo de medición no fue suficiente para llegar al 10%, pero tomando en cuenta la gráfica sería necesario un tiempo de medición mucho mayor.

En Media Luna, la estabilización es mucho mayor a Villacís como muestra la figura 5.18, donde prácticamente desde la primera medición se mantiene el mismo throughfall relativo para todo el periodo, las variaciones son mínimas. Lo mismo ocurre con el error, la diferencia entre la primera medición y la final es de apenas 2%, y posiblemente nunca se llegue a tener un error del 10%.

La presencia de esta estabilidad (en especial en el caso de Media Luna) sugiere haber utilizado un cambio de estrategia de diseño de medición. En vez de haber usado colectores fijos, se pudo haber usado colectores móviles, los cuales se los hubiera cambiado de posición cada cierto tiempo (cada vez que se haya observado que el throughfall relativo haya llegado a estabilizarse hubiera sido un buen criterio), permitiendo de esta manera cubrir una mayor área y tener una mayor número de puntos de medición que posiblemente hubiera ayudado con el problema de tener un error espacial mayor al 10% y un variograma más convincente, por la falta de número de colectores y de ubicación de colectores a distancias pequeñas respectivamente.

Figura 5.18: Estabilización del throughfall y del error en Media Luna. (a) Estabilización del throughfall relativo respecto a la precipitación acumulada en los periodos de medición de los colectores. Las barras representan el intervalo de confianza para el 95 % de la media de throughfall de los colectores. (b) Variación del error como porcentaje de la media respecto a la precipitación acumulada en los periodos de medición de los colectores.



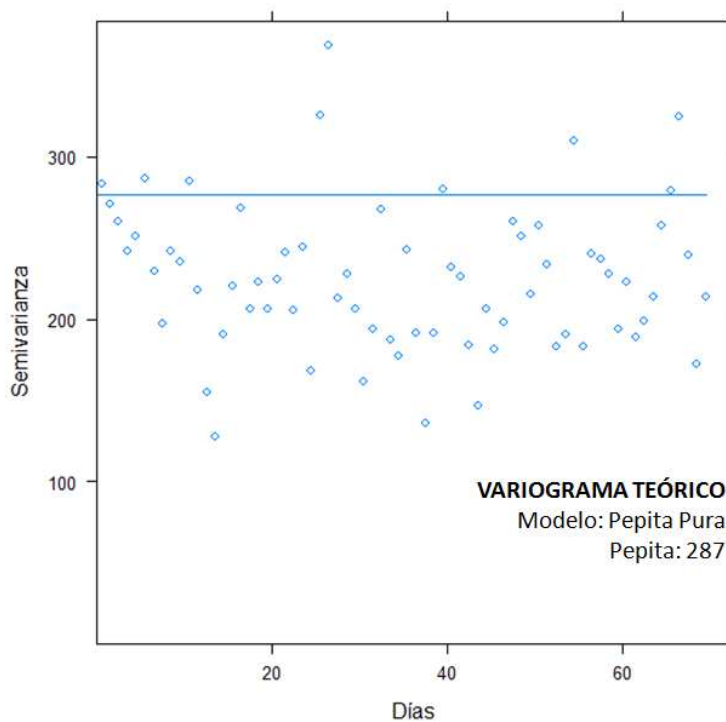
Elaborado por: Autor.

5.10. VARIOGRAMA TEMPORAL

5.10.1. VILLACÍS

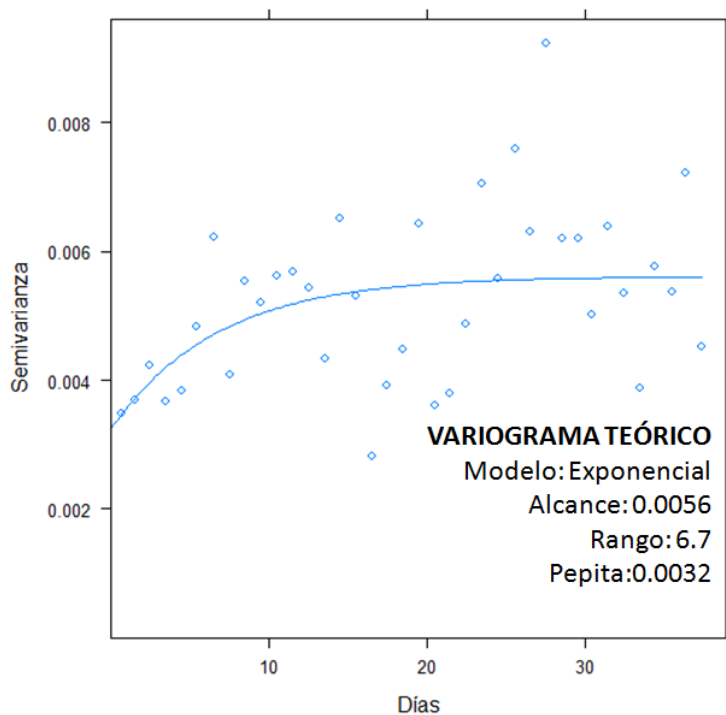
La distribución del throughfall relativo para los 104 eventos de lluvia registrados resultó ser normal según la prueba de Shapiro Wilk ($p = 0.35$) por lo que no fue necesaria una transformación. Se construyó el variograma experimental ($\text{lag}=1$ día) que no tuvo demasiados valores extremos, por lo que se decidió usar el estimador de Matheron (sección 3.4.4.1) para hacer el ajuste con un modelo teórico. En la figura 5.19 se puede ver los puntos del variograma experimental que están muy dispersos, claramente se aprecia que no existe autocorrelación en ningún tiempo, por lo que se usó el modelo de efecto pepita puro ajustado con el método de Máxima Verosimilitud. Esto quiere decir que no existe autocorrelación a ningún nivel temporal (no existe correlación entre eventos consecutivos) durante la época de estudio por lo que se puede decir que no existe persistencia ni a corto plazo (días) ni a largo plazo (meses).

Figura 5.19: Variograma temporal experimental (104 eventos) con el estimador de Matheron y modelo teórico de mejor ajuste por Máxima Verosimilitud en la parcela de Villacís.



Elaborado por: Autor.

Figura 5.20: Variograma temporal experimental (60 eventos) con el estimador de Cressie y modelo teórico de mejor ajuste por Máxima Verosimilitud en la parcela de Media Luna.



Elaborado por: Autor.

5.10.2. MEDIA LUNA

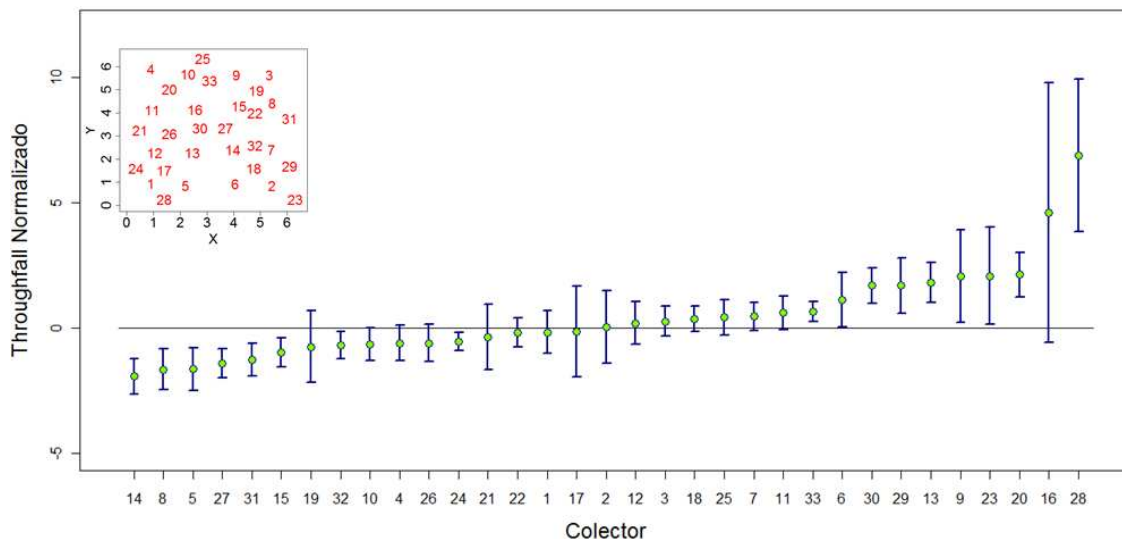
La distribución de throughfall relativo para 60 eventos de lluvia resultó no ser normal (Prueba Shapiro Wilk, $p = 0.015$) y tampoco estuvo dentro del rango del sesgo octil aceptable ($skew_8 = 0.24$) por lo que se usó una log-transformación. En la nube de variograma no se vio gran cantidad de valores extremos por lo que se usó el estimador de Matheron para la construcción del variograma experimental ($lag = 1$ día). En la figura 5.20 el variograma experimental presenta una gran cantidad de puntos dispersos, sin embargo un modelo de pepita puro sería erróneo ya que se puede ver una tendencia en los primeros puntos, la dispersión irregular sucede desde los 10 días. El modelo teórico que mejor se ajustó al variograma experimental fue uno exponencial con el método de Máxima Verosimilitud. Esto quiere decir que existe autocorrelación entre eventos consecutivos, teniéndose un rango efectivo de aproximadamente 20 días.

5.11. TIME STABILITY PLOTS

Los *time stability plots* del throughfall normalizado muestran la persistencia de los distintos colectores. En Villacís, el time stability plot en la figura 5.21 muestra la existencia de persistencia extrema tanto en los colectores bajo el primer cuartil (secos), como en los colectores sobre el tercer cuartil (mojados). En la zona bajo el primer cuartil los colectores 14, 8, 5, 27, 31, 15 y 32 presentan esta persistencia extrema solo el colector 19 no la tiene. En la zona sobre el tercer cuartil también existe esta persistencia extrema en los colectores 30, 29, 13, 9, 23, 20, 16 y 28, solo el colector 16 no la tiene. Al parecer no existe persistencia general (igual que con el variograma temporal), apenas 3 colectores (24, 33 y 6) dentro del rango intercuartil no se cruzan con la mediana absoluta, esto quiere decir que apenas el 82 % de los colectores dentro del rango intercuartil no la tienen. Otra cosa a tomar en cuenta es la variabilidad espacial de los colectores, donde los colectores 16 y 28 están mucho más alejados al resto de colectores. De igual manera, los colectores mojados, tienen una desviación más grande con la mediana que los colectores secos. Los colectores mojados presentan mucha más variabilidad que los colectores secos y que los colectores dentro del rango intercuartil, posiblemente esta irregularidad en los colectores mojados sea debido a la presencia de puntos de goteo que se activan discontinuamente.

En Media Luna, la figura 5.22 muestra persistencia extrema tanto en los colectores secos como en los colectores mojados. También se presenta persistencia general ya que

Figura 5.21: Time stability plot del throughfall normalizado a la mediana y varianza como unidad en la parcela de Villacís. Los colectores están ordenados según su media. Las barras de error representan \pm una desviación estándar. El cuadro superior representa la posición de los colectores en la parcela de Villacís.



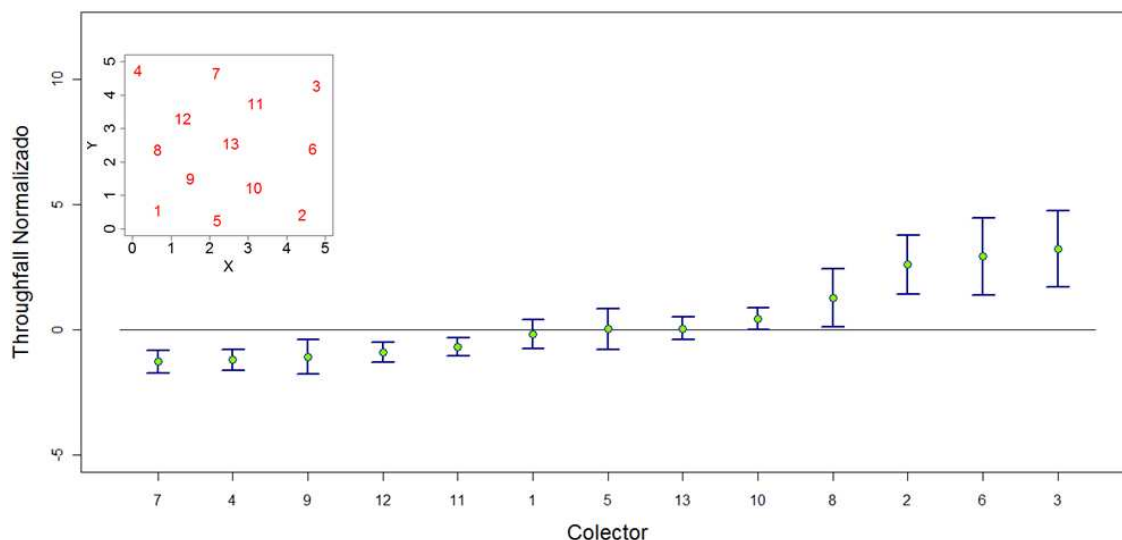
Elaborado por: Autor.

el 57% de los colectores en el rango intercuantil la tienen. Igual que en Villacís, los colectores mojados se encuentran mucho más alejados a la mediana absoluta y tienen mucha más variabilidad que los demás colectores. En este caso, la explicación puede ser que debido a que los colectores mojados están en la franja de influencia del viento, la intercepción de neblina aporta una cantidad adicional de agua (desviación de la mediana), y la variabilidad puede ser debido a la variabilidad de la intensidad del viento y a la presencia o no de la neblina.

En algunos estudios donde se investigó la persistencia del throughfall se encontró aparentemente una estabilidad temporal sobre algunos meses usando time stability plots (Raaf et al., 2002; Staelens et al., 2006; Zimmermann et al., 2007) y variogramas temporales (Zimmermann et al., 2009). En bosques caducifolios parece existir una baja persistencia temporal, que puede ser explicada por cambios en el follaje del dosel (Staelens et al., 2006). Al contrario bosques de coníferas parecen tener una alta persistencia temporal (Raaf et al., 2002). En la sección 5.13.2 se tratará de dar una explicación a la variabilidad temporal del estudio.

El uso de un variograma temporal requiere una gran cantidad de datos para que sea confiable, y la ventaja es que muestra el periodo de tiempo al cual los datos son correlacionados, es decir, el periodo de tiempo en que se mantiene la persistencia en los datos. Además sirven para datos a largo tiempo ya que no es afectado por cambios de

Figura 5.22: Time stability plot del throughfall normalizado a la mediana y varianza como unidad en la parcela de Media Luna. Los colectores están ordenados según su media. Las barras de error representan \pm una desviación estándar. El cuadro superior representa la posición de los colectores en la parcela de Media Luna.



Elaborado por: Autor.

temporada (Zimmermann et al., 2009). Los time stability plots son útiles para datos a corto plazo o dentro de una temporada (al terminarse la correlación de temporada puede detectarse baja persistencia) como en este caso, además permiten conocer tanto la persistencia general y la persistencia extrema. El uso de ambos métodos permitió tener una mayor amplitud de resultados, y confirmar los resultados del uno con el otro, sin embargo para el caso de este estudio los time stability plots son más apropiados.

5.12. RELACIÓN DEL THROUGHFALL CON VARIABLES METEOROLÓGICAS

5.12.1. PRECIPITACIÓN

5.12.1.1. Villacís

Comparando la precipitación con el throughfall se encontró una fuerte correlación. Se usó un modelo lineal al cual se le realizó un diagnóstico de residuos para determinar puntos que podrían venir de datos erróneos (malfuncionamiento de los aparatos), siendo este el caso se los eliminó. Se eliminó 3 puntos (3%) que parecían tener valores corruptos. El nuevo modelo, se lo diagnosticó como se ve en la figura 5.23, aparente-

mente el modelo parece correcto.

Se realizó un análisis de regresión (tabla 5.9), de donde se determinó que la estimación de la pendientes es estadísticamente significativa ($p = 2 \times 10^{-16}$) concluyendo que existe una relación positiva entre la precipitación y el throughfall. Otra cosa interesante es que el coeficiente de intersección es significativamente diferente de 0 (menor que 0) como se ve en la figura 5.24, esto quiere decir que en eventos muy pequeños de precipitación (menor a 0.3mm) no existen valores de throughfall, esto se explica nuevamente con la capacidad de retención de agua del dosel. Existe una gran correlación entre los datos ($r = 0.992$), donde el 99 % de los datos pueden ser explicados por este modelo lineal (figura 5.25).

Tabla 5.9: Resumen del análisis de regresión en la parcela de Villacís.

Coefficiente	Estimación	Error Est.	valor t	valor p
Intersección	-0.2556	0.0513	-4.984	2.66×10^{-6}
Pendiente	0.8565	0.0101	85.116	2×10^{-16}
Correlación	0.9932			
Determinación	0.9864			

Elaborado por: Autor.

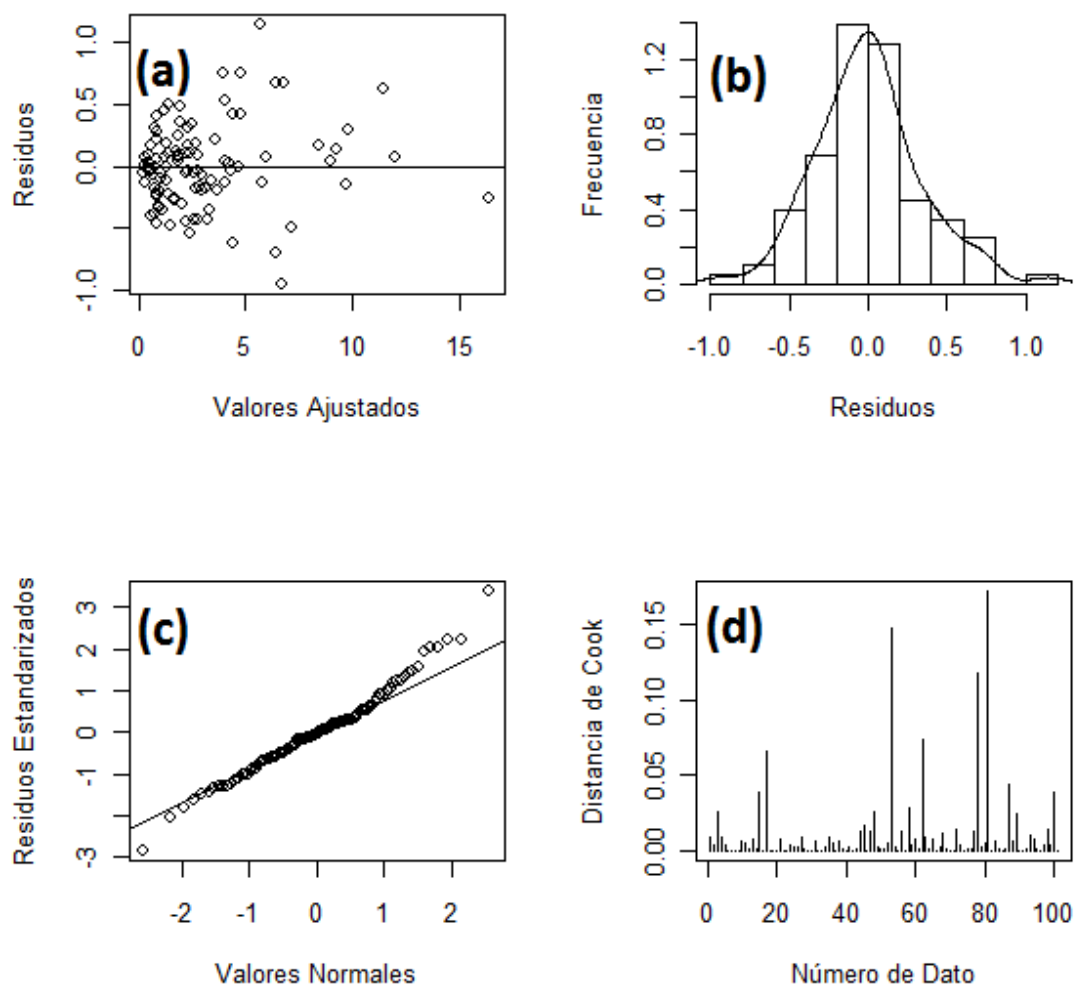
También se calculó el intervalo de confianza para el 95 % de la recta de regresión, de esta forma se pudo ver hasta donde se puede extender la recta de regresión (figura 5.25), donde prácticamente es fija. Apenas el 2 % de los datos cae fuera de las bandas de predicción.

5.12.1.2. Media Luna

Igual que en Villacís también se encontró una fuerte relación (aunque menor que en Villacís). Se determinó 3 puntos (5 % del total) posiblemente corruptos por los que no se los tomó en cuenta para el modelo. De los gráficos de diagnóstico (figura 5.26) se determinó que aunque algunos valores parecen estar un poco alejados no hay evidencia para eliminarlos, a pesar de esto, todos los puntos están dentro de los límites.

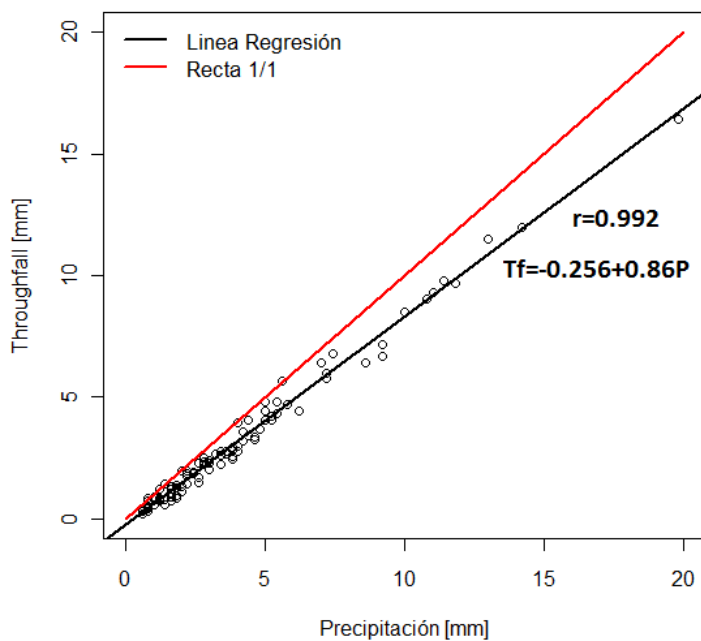
El análisis de regresión (tabla 5.10) mostró que que existe dependencia positiva entre la precipitación y el throughfall, la estimación de la pendientes es significativa ($p = 2 \times 10^{-16}$). El coeficiente de intersección no es significativamente diferente de 0 ($p = 0.367$), sin embargo la estimación es positiva, es decir se podría tener throughfall a

Figura 5.23: Gráficos de diagnóstico de la regresión entre la precipitación y el throughfall en la parcela de Villacís. (a) Valores Ajustados por el modelo vs los residuos. (b) Histograma de frecuencias y distribución de probabilidad de los residuos. (c) QQPlot, valores normales vs residuos estandarizados. (d) Distancia Cook de cada dato, si es mayor a 1, el dato tiene enorme influencia sobre el modelo.



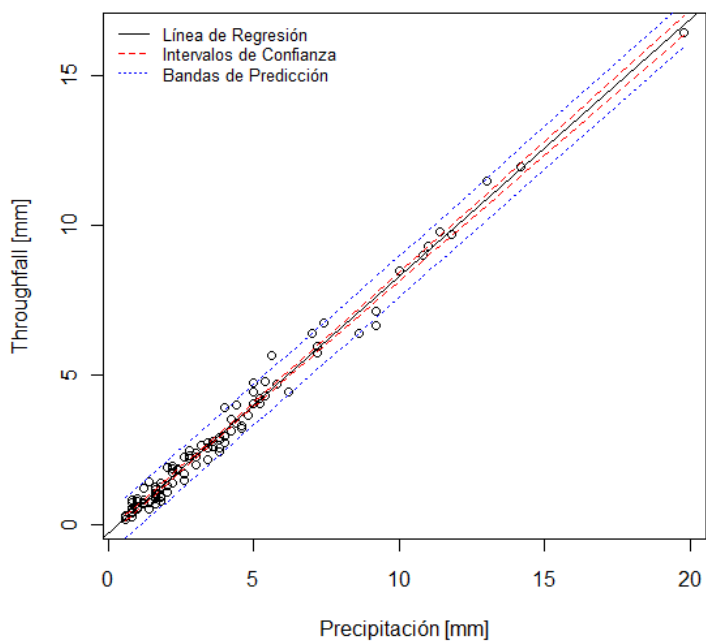
Elaborado por: Autor.

Figura 5.24: Relación entre la precipitación y el throughfall en la parcela de Villacís.



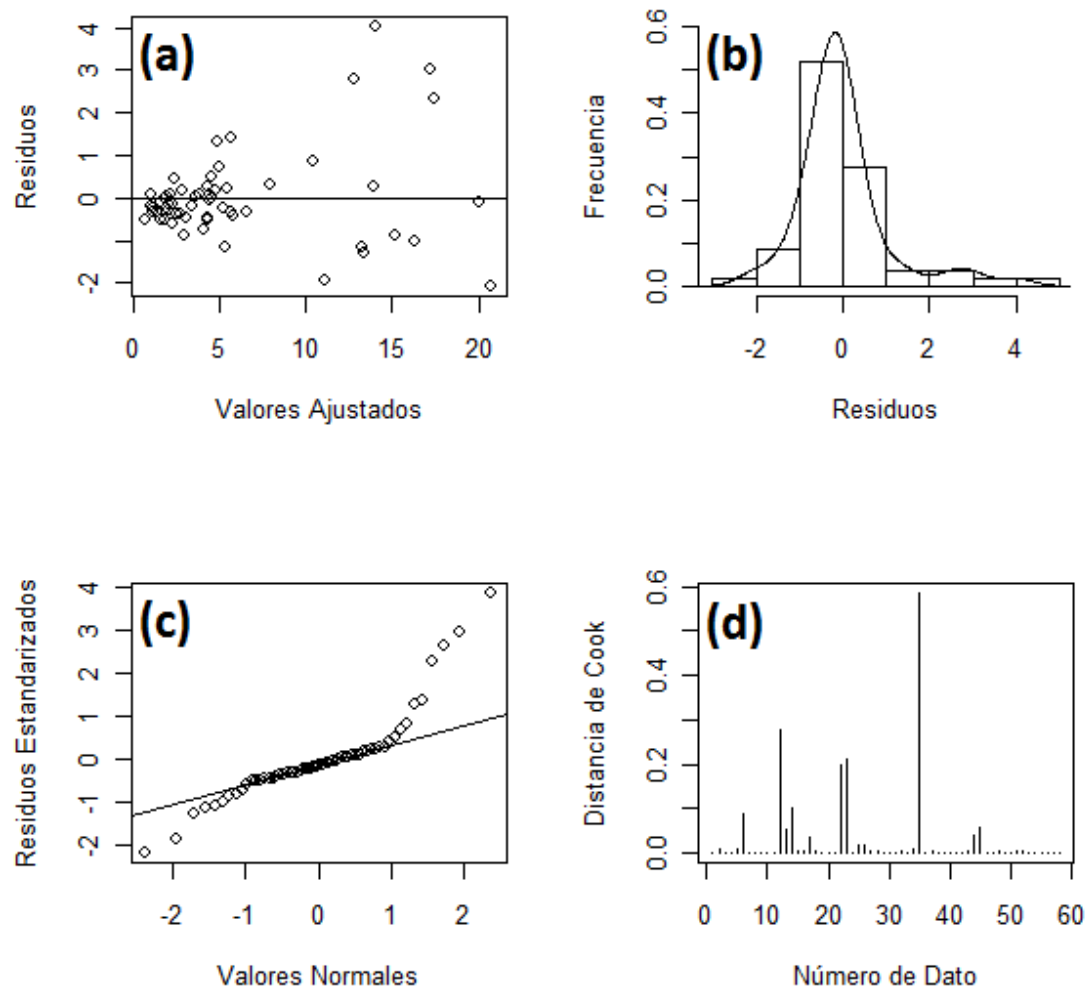
Elaborado por: Autor.

Figura 5.25: Intervalos de confianza del 95 % de la recta de regresión para la precipitación y el throughfall en Villacís. Además las bandas de predicción para el 95 % de confianza.



Elaborado por: Autor.

Figura 5.26: Gráficos de diagnóstico de la regresión entre la precipitación y el throughfall en la parcela de Media Luna. (a) Valores Ajustados por el modelo vs los residuos. (b) Histograma de frecuencias y distribución de probabilidad de los residuos. (c) QQPlot, valores normales vs residuos estandarizados. (d) Distancia Cook de cada dato, si es mayor a 1, el dato tiene enorme influencia sobre el modelo.



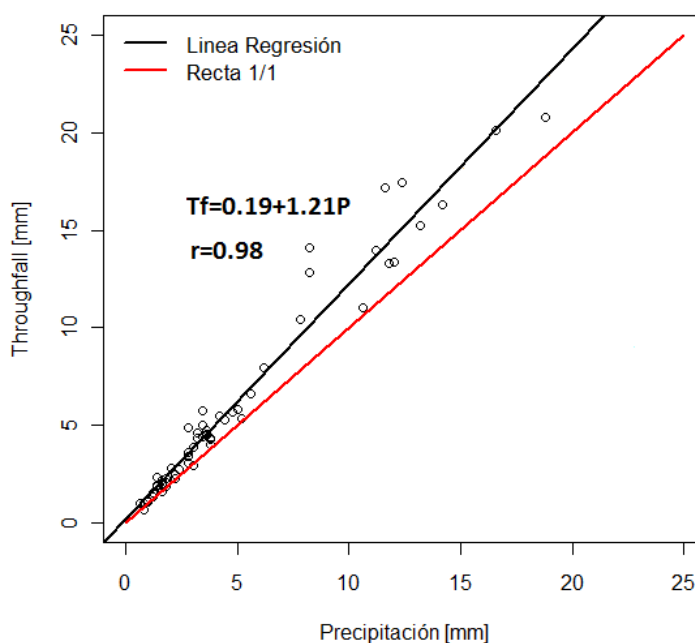
Elaborado por: Autor.

Tabla 5.10: Resumen del análisis de regresión en la parcela de Media Luna.

Coeficiente	Estimación	Error Est.	valor t	valor p
Intersección	0.1895	0.2082	0.91	0.367
Pendiente	1.2054	0.0322	37.47	2×10^{-16}
Correlación	0.9803			
Determinación	0.961			

Elaborado por: Autor.

Figura 5.27: Relación entre la precipitación y el throughfall en la parcela de Media Luna.

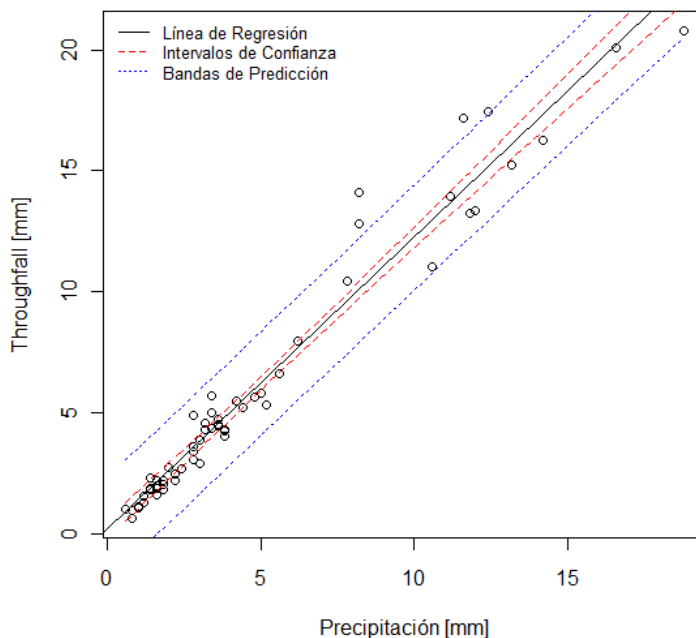


Elaborado por: Autor.

pesar de no existir precipitación, lo que se podría explicar por la intercepción de la neblina, aunque no en todos los casos existe este escenario. Existe gran correlación entre los datos, donde el 96 % de los datos pueden ser explicados por la línea de regresión (figura 5.27).

Los intervalos de confianza de la recta de regresión resultan ser un poco más abultados, en especial la recta parece tener mayor libertad de movimiento en la parte final como se puede ver en la figura 5.28. Apenas 3 datos (5 % de los datos) están fuera de las bandas de predicción.

Figura 5.28: Intervalos de confianza del 95 % de la recta de regresión para la precipitación y el throughfall en Media Luna. Además las bandas de predicción para el 95 % de confianza.



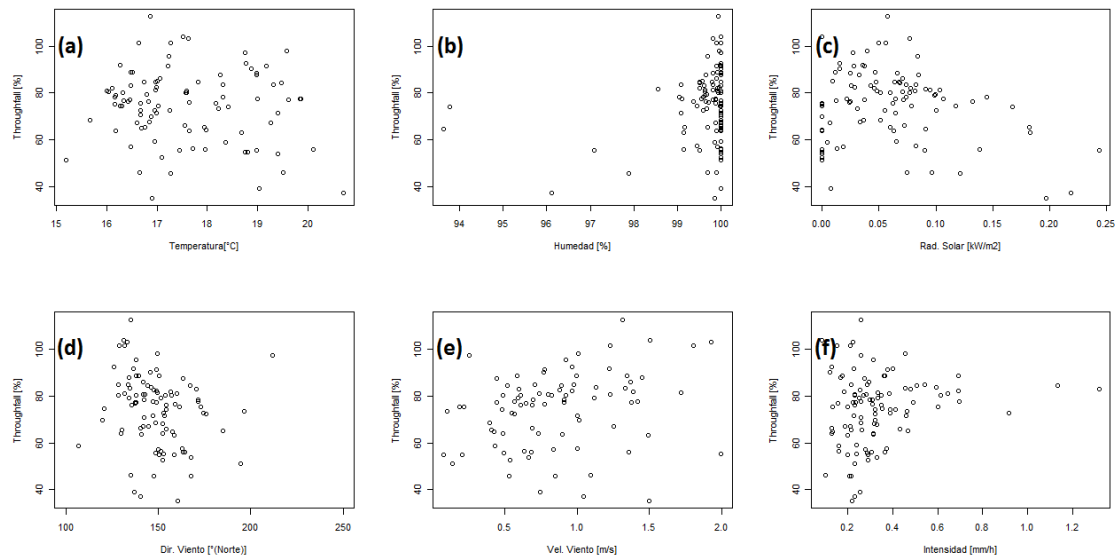
Elaborado por: Autor.

5.12.2. OTRAS VARIABLES METEOROLÓGICAS

La relación entre el throughfall con el resto de variables meteorológicas resultó bastante débil, no se pudo determinar un modelo confiable para ninguna variable.

En Villacís, para todas las variables el coeficiente de correlación resultó bastante bajo (tabla 5.11), por lo que el grado de asociación es muy bajo (figura 5.29). La estimación de la pendiente de la relación temperatura y la dirección del viento con el throughfall no es estadísticamente significativa (pendiente igual a 0), por lo que no se presenta ninguna relación con el throughfall. Parece existir una débil relación positiva (pendiente diferente de 0) entre la humedad, velocidad del viento e intensidad de precipitación con el throughfall y una débil relación negativa entre la radiación solar y el throughfall (estimación de las pendientes estadísticamente significantes a distintos niveles). Estas débiles tendencias parecen lógicas, pues a mayor intensidad y humedad y a menor radiación solar, hay más posibilidad que el dosel se encuentre saturado, permitiendo que éste no retenga la precipitación y dejando que el agua pase al suelo. En cambio, la intensidad del viento ayuda en los procesos de intercepción de neblina (aunque en Villacís la presencia de neblina es mucho más baja).

Figura 5.29: Relación entre las variables meteorológicas y el throughfall relativo en Villacís. (a) Temperatura vs Throughfall Relativo. (b) Humedad Relativa vs Throughfall. (c) Radiación Solar vs Throughfall. (d) Dirección del Viento vs Throughfall. Siendo 0° grados el Norte, la dirección va en sentido antihorario. (e) Velocidad del Viento vs Throughfall. (f) Intensidad de la Precipitación vs Throughfall.



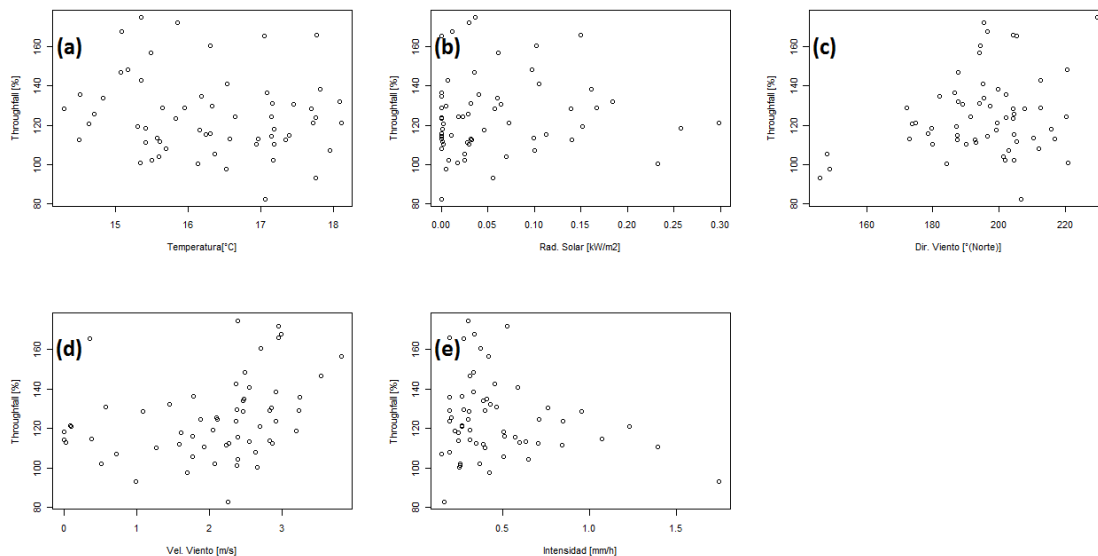
Elaborado por: Autor.

En Media Luna, al igual que en Villacís el grado de asociación de las variables es débil (figura 5.30), por los bajos coeficientes de correlación. La temperatura y la radiación solar no tienen relación con el throughfall, mientras que la dirección y velocidad de viento y la intensidad presentan una débil relación (positiva para el viento y negativa para la intensidad). Normalmente el viento aumenta la evaporación y disminuye el throughfall. En este caso, encontrar una leve tendencia entre el viento (magnitud y dirección) y el throughfall parecería correcto, ya que por la presencia semipermanente de neblina en Media Luna existe interceptación, la cual depende directamente del viento.

Algo para tomar en cuenta en los gráficos de intensidad de la precipitación vs throughfall tanto de Villacís como de Media Luna, es la variabilidad. Parece existir mayor variabilidad en intensidades bajas (menor a 0.5 mm/h) en ambos sitios (figura 5.31). En Villacís, esto se puede explicar nuevamente por la capacidad de retención de agua del dosel. En Media Luna, los mayores valores de throughfall relativo se presentan con bajas intensidades de precipitación, esto se puede explicar por la presencia de neblina (viene acompañada de bajas intensidades de precipitación) que es interceptada bajo estas condiciones, la variabilidad a bajas intensidades puede depender de la presencia o no de neblina.

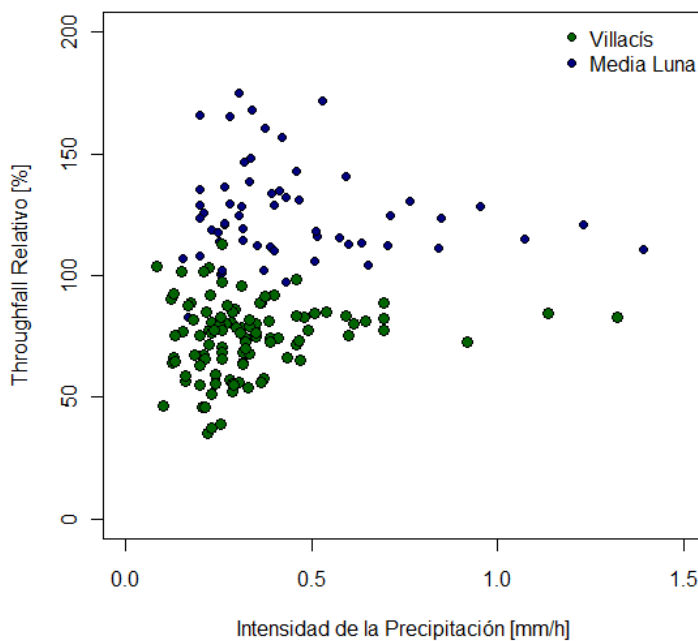
Debido a la baja correlación y a las estimaciones de las pendientes con bajas signi-

Figura 5.30: Relación entre las variables meteorológicas y el throughfall relativo en Media Luna. (a) Temperatura vs Throughfall Relativo. (b) Radiación Solar vs Throughfall. (c) Dirección del Viento vs Throughfall. Siendo 0° grados el Norte, la dirección va en sentido antihorario. (d) Velocidad del Viento vs Throughfall. (e) Intensidad de la Precipitación vs Throughfall.



Elaborado por: Autor.

Figura 5.31: Relación entre la intensidad de la precipitación y el throughfall relativo en las parcelas de Villacís y Media Luna.



Elaborado por: Autor.

Tabla 5.11: Relación de las variables meteorológicas con el throughfall.

Variable	Villacís			Media Luna		
	r ^a	S ^b	valor p ^c	r ^a	S ^b	valor p ^c
Temperatura	0.002	-	0.283	0.023	-	0.246
Humedad Relativa	0.039	+	0.043**			
Radiación Solar	0.041	-	0.046**	0.003	+	0.675
Dir. Viento	0.011	-	0.289	0.077	+	0.032**
Vel. Viento	0.066	+	0.017**	0.099	+	0.014**
Intensidad Prec.	0.027	+	0.096*	0.040	-	0.124

^a Coeficiente de correlación.
^b Signo de la pendiente.
^c Probabilidad que la pendiente estimada sea igual a 0.
* Significante al 90 % de confianza.
** Significante al 95 % de confianza.

Elaborado por: Autor.

ficancias se debe decir que es ciertas variables tienen una relación muy débil con el throughfall, o solamente se tendría que decir que existen posibles tendencias que no pueden ser comprobadas. En [Wullaert et al. \(2009\)](#) se trató de encontrar la influencia de las variables meteorológicas en la variabilidad espacial del throughfall en un bosque siempreverde de baja montaña en Loja, Ecuador; donde no se detectó ninguna influencia tomando datos semanales durante 4 años. Un factor muy importante a considerar es el tiempo de duración de los eventos. En este estudio se registran eventos desde 3 horas hasta eventos de 36 horas. Por este motivo, durante un evento de throughfall pueden ocurrir cambios significativos en todas las variables meteorológicas, por lo que la media de cada variable puede incluir un sesgo que no permite ser concluyente en el análisis. Ésta podría ser una explicación a la baja relación entre el throughfall y algunas variables de donde se esperaba una relación más fuerte, como es el caso de la velocidad del viento y la intensidad de la precipitación.

5.13. VEGETACIÓN Y EL THROUGHFALL

A partir de las fotografías tomadas en cada parcela se determinó el porcentaje de cobertura vegetal (PCV) para cada parcela y el área de índice folial (AIF) (tabla 5.12, éste trabajo fue realizado por Pilar Fuente-Tomai siguiendo la metodología descrita en [MacFarlane et al. \(2007\)](#)). Al parecer el AIF y el PCV es mayor en la parcela de Media Luna, sin embargo, Villacís presenta mayor densidad (varias especies unas encima de otras), y es posible que muchas hojas hayan sido cubiertas por otras hojas (algo que no se ve

en las fotografías). En Media Luna, parece que a pesar de existir menor densidad, las hojas y ramas ocupan el espacio más eficientemente que Villacís.

Tabla 5.12: Porcentaje de Cobertura Vegetal (PCV) y Área de Índice Folial (AIF) en las parcelas de Villacís y Media Luna.

Variable	Parcela	
	Villacís	Media Luna
PCV ^a	70.6 % ± 7.5	74.1 % ± 10.8
AIF ^b	2.1 ± 0.48	2.79 ± 0.56

^a Porcentaje de cobertura vegetal ± desviación estándar.
^b Área de índice folial ± desviación estándar.

Elaborado por: Autor.

5.13.1. RELACIÓN PCV-THROUGHFALL

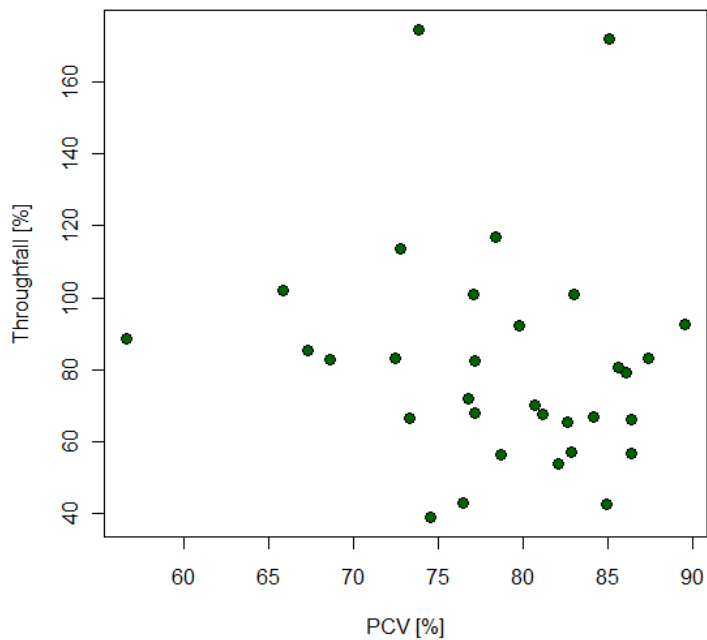
5.13.1.1. Villacís

Se realizó la comparación del PCV con el throughfall relativo (figura 5.32) a partir de 32 fotografías, de donde no se obtuvo ninguna relación aparente ($r = -0.014$). En la figura 5.33 se puede ver un ejemplo de una de las fotografías ya procesadas para obtener el PCV. Al parecer el PCV no influye en la cantidad de throughfall medido para este estudio. Sin embargo, el PVC no distingue características del dosel que pueden ser importantes en la cantidad del throughfall. Al revisar las fotografías se notó ciertas coincidencias entre las características del dosel y el throughfall de cada colector.

En el 31 % de las fotografías (9) se puede observar la presencia de epífitas sobre los colectores, y el 56 % de éstas (5 fotografías) corresponden a colectores (16, 23, 9, 29 y 17) que presentan la mayor variabilidad de throughfall como se ve en la figura 5.21. El 80 % de estos colectores corresponde a los colectores mojados (ej. figura 5.34). En [Zimmermann et al. \(2007\)](#) se encontró que los sitios con menor cantidad de throughfall recolectado fueron los que estuvieron bajo musgo y epífitas, sin embargo se dice que en los periodos más lluviosos los puntos con estas características de vegetación se pueden comportar como puntos de goteo, es decir que en las condiciones más húmedas estos puntos podrían recolectar mayores cantidades de throughfall.

En varias fotografías de los colectores mojados, se pudo observar mayor cantidad de ramas que cantidad de hojas. También se observó que en las fotografías de los co-

Figura 5.32: Relación entre el porcentaje de cobertura vegetal y el throughfall relativo en la parcela de Villacís.



Elaborado por: Autor.

Figura 5.33: Ejemplo de una fotografía recortada y transformada a modo binario para obtener el porcentaje de cobertura vegetal. La fotografía corresponde al colector 6 de la parcela de Villacís.



Elaborado por: Autor.

Figura 5.34: Ejemplo del proceso de una fotografía para transformarla a modo binario y obtener el porcentaje de cobertura vegetal. La fotografía es del colector 16 de la parcela de Villacís, uno de los que más cantidad de throughfall tiene. (a) Fotografía hemisférica completa. (b) Recorte de la fotografía, representando el área de influencia sobre el colector. Nótese la presencia de epífitas. (c) Fotografía recortada de modo binario. Nótese que no se puede diferenciar las ramas, hojas y epífitas de la fotografía.



Fuente: Noémi d'Ozouville, Andrés González.
Elaborado por: Autor.

lectores secos, el 75 % de ellas tenían la presencia de troncos o ramas relativamente grandes sobre los colectores (ej. figura 5.35). De las fotografías de los colectores medios no se puede decir mucho, solamente que en general presentan más cantidad de hojas que los colectores mojados, y que en algunos de éstos se ve la presencia de helechos (sotobosque) sobre los colectores.

5.13.1.2. Media Luna

La comparación entre el PCV y el throughfall relativo a partir de 11 fotografías resultó ser parecido a Villacís. No existe ninguna relación ($r = -0.05$), sin embargo al ver la figura 5.36, se puede ver una leve tendencia negativa sin tomar en cuenta uno de los puntos. La relación entre estas variables se ve fuertemente afectada por este valor extremo, pero no existe evidencia para no tomarla en cuenta. Obviando el punto extremo antes mencionado, al parecer, mientras existe mayor cobertura el throughfall relativo es menor, algo que podría ser lógico.

Revisando las fotografías no existe ninguna suposición aparente sobre el efecto de alguna característica de la vegetación sobre la cantidad de throughfall, pues prácticamente

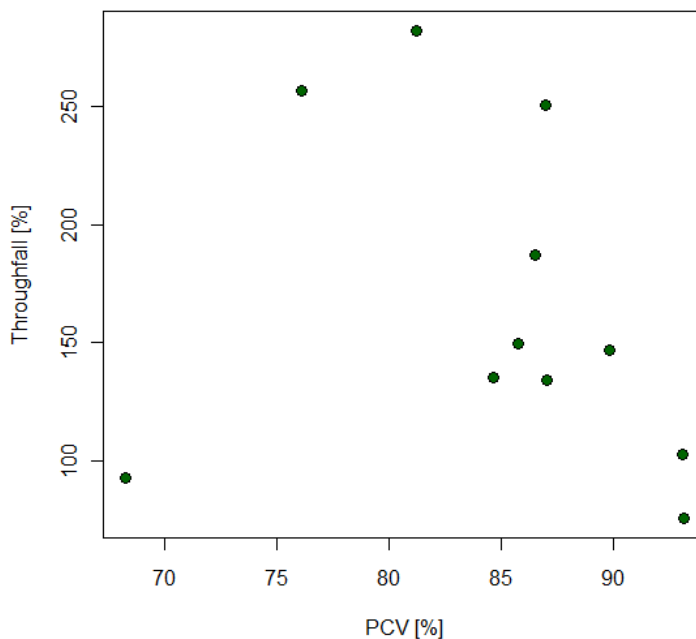
Figura 5.35: Ejemplo del proceso de una fotografía para transformarla a modo binario y obtener el porcentaje de cobertura vegetal. La fotografía es del colector 15 de la parcela de Villacís, uno de los que menos cantidad de throughfall tiene. (a) Fotografía hemisférica completa. (b) Recorte de la fotografía, representando el área de influencia sobre el colector. Nótese la presencia de ramas gruesas. (c) Fotografía recortada de modo binario.



Fuente: Noémi d'Ozouville, Andrés González.

Elaborado por: Autor.

Figura 5.36: Relación entre el porcentaje de cobertura vegetal y el throughfall relativo en la parcela de Media Luna.



Elaborado por: Autor.

Figura 5.37: Ejemplo del proceso de una fotografía para transformarla a modo binario y obtener el porcentaje de cobertura vegetal. La fotografía es del colector 2 de la parcela de Media Luna, uno de los que más cantidad de throughfall tiene. (a) Fotografía hemisférica completa. (b) Recorte de la fotografía, representando el área de influencia sobre el colector. (c) Fotografía recortada de modo binario.



Fuente: Noémi d'Ozouville, Andrés González.

Elaborado por: Autor.

todas las fotografías tienen las mismas características (ej. figura 5.37, figura 5.38), algo evidente ya que toda la parcela se encuentra bajo arbustos de miconia, los cuales son similares. Si existiera esta relación, ésta no explica la existencia de valores de throughfall relativo tan altos (mayores al 100 %), algo característico en esta parcela.

5.13.2. INFLUENCIA DE LA VEGETACIÓN EN EL THROUGHFALL

En Zimmermann et al. (2007) se concluye que la estructura compleja del bosque y las características de la lluvia afectan la variabilidad del throughfall en un bosque tropical de montaña. La estructura y arquitectura del dosel se considera como el factor de control más importante en la redistribución del throughfall (Keim et al., 2005), sin embargo es difícil estimar su participación. En Loescher et al. (2002) se obtuvo una débil relación entre el porcentaje de cubierta y el volumen de throughfall. En Staelens et al. (2006) se encontró una relación negativa entre el dosel de haya y la cantidad de throughfall en el periodo de hojas (cuando los árboles tienen todo su follaje). En este estudio no se encontró ninguna relación entre el porcentaje de cobertura vegetal y el throughfall tanto en Villacís como en Media Luna, sin embargo atribuimos a ciertas características de la vegetación la capacidad de influenciar en el throughfall, como se explicará a

Figura 5.38: Ejemplo del proceso de una fotografía para transformarla a modo binario y obtener el porcentaje de cobertura vegetal. La fotografía es del colector 11 de la parcela de Media Luna, uno de los que menos cantidad de throughfall tiene. (a) Fotografía hemisférica completa. (b) Recorte de la fotografía, representando el área de influencia sobre el colector. (c) Fotografía recortada de modo binario.



Fuente: Noémi d'Ozouville, Andrés González.

Elaborado por: Autor.

continuación.

En Villacís, el throughfall parece ser afectado por las características de la vegetación. Los sitios más secos parecen tener estabilidad temporal, ya que la mayoría de puntos se encuentran bajo troncos grandes que se mantienen estables en su posición. Los puntos medios no presentan persistencia temporal y podría ser debido a que la mayoría se encuentran ubicados bajo hojas mayormente, y cambios en el dosel se ven reflejados principalmente por la caída de hojas (observación directa). También podría jugar un papel preponderante la presencia del sotobosque, el cual puede presentarse en poco tiempo y causar fuertes cambios en la redistribución del throughfall. Los puntos con más throughfall se han caracterizado por estar bajo epífitas. En [Carlyle-Moses et al. \(2004\)](#) se dice que la variabilidad espacial del throughfall permanecería casi constante durante eventos de lluvia relativamente altos debido a que la capacidad de retención de agua del dosel está satisfecha, y que en este caso la variabilidad espacial posiblemente dependería únicamente de la distribución y frecuencia de puntos de goteo. En [Wullaert et al. \(2009\)](#) se dice que una alta carga epífita y cierta morfología de las hojas afectan a la variabilidad del throughfall. Entonces en Villacís, las epífitas actúan como grandes contenedores de agua que una vez saturados se convierten en puntos de goteo. Entonces se podría decir que la presencia de epífitas afecta tanto a la variabilidad espacial como

a la temporal debido a la discontinua activación de puntos de goteo.

En Media Luna, el throughfall no parece ser afectado por las características del dosel, más bien por las condiciones meteorológicas y la posición. El throughfall parece ser estable temporalmente debido a prácticamente un solo tipo de vegetación (no tiene gran complejidad como es la de Villacís), que presenta una estructura similar y no tiene grandes cambios. La vegetación que está expuesta al viento actúa como obstáculo para las precipitaciones de baja intensidad acompañadas con la presencia de garúa, produciéndose probablemente la intercepción de neblina. Esto explicaría la enorme diferencia entre cantidades de throughfall en un pequeño espacio, así como la diferencia de sectores, donde los sitios más alejados a la influencia del viento presentan las menores cantidades de throughfall mientras los sitios donde existe la mayor acumulación de throughfall coinciden con el sector de influencia del viento. De todas maneras, la presencia de vegetación en el sitio es fundamental para que exista el proceso de intercepción y por ende el aumento en la cantidad de throughfall en la zona.

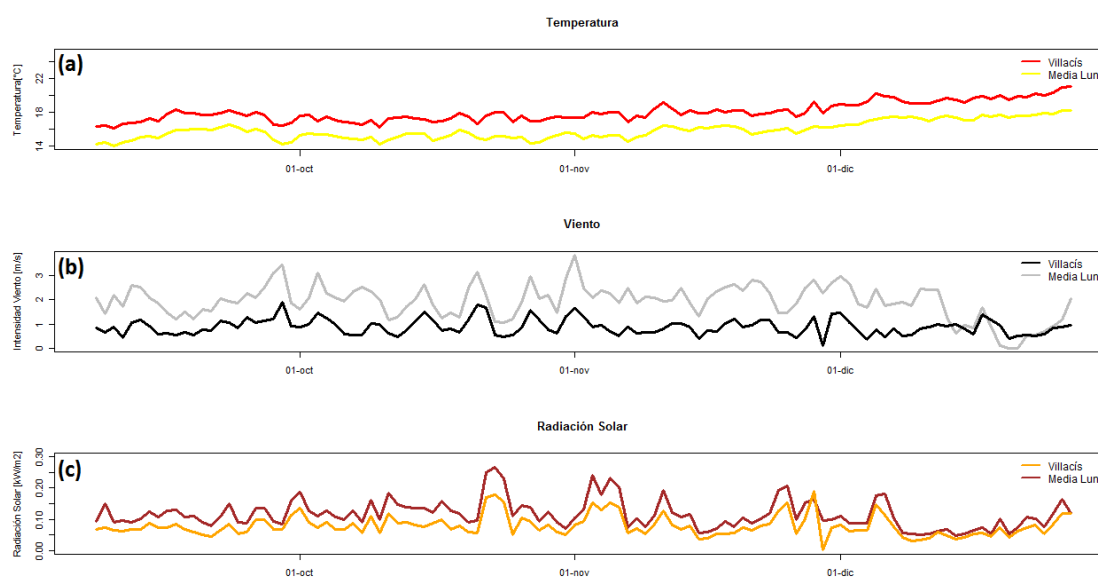
5.14. COMPARACIÓN ENTRE VILLACÍS Y MEDIA LUNA

La estación de Villacís y Media Luna están separadas por menos de 2km y tienen una diferencia de altura de 250 m, a pesar de estar bastante cerca tienen grandes diferencias. Como se puede ver en la figura 5.39, en Villacís la temperatura media diaria es mayor por un poco más de 2°C (en Villacís es de 16°C mientras en Media Luna es de 18°C). La intensidad del viento medio diario en Media Luna (1.9 m/s) es más del doble que en Villacís (0.9m/s). Y la radiación solar media diaria en Villacís es de 80 Watts/m² mientras que en Media Luna es de 110 Watts/m².

En cuanto a la precipitación, comparando los mismos días de datos de ambas estaciones se encontró que la precipitación en Media Luna es el 128 % de la precipitación en Villacís. Sin embargo, el throughfall en Media Luna es el 199 % del throughfall en Villacís. Comparando los datos en los mismos periodos de medición de la redes de neblina en ambas estaciones, se encontró que el volumen de agua acumulado en Media Luna es el 430 % del volumen en Villacís.

La gran diferencia de throughfall entre las dos estaciones se podría explicar por la presencia de neblina en Media Luna. Mayores intensidades de viento benefician la intercepción de neblina, mientras que menores temperaturas disminuyen la evaporación. La diferencia de volumen de agua de la red de neblina entre las dos estaciones es una

Figura 5.39: Comparación entre las estaciones de Villacís y Media Luna con las principales variables meteorológicas. (a) Temperatura. (b) Intensidad del Viento. (c) Radiación Solar.



Elaborado por: Autor.

evidencia que indica que los procesos de intercepción de neblina en Media Luna son mucho mayores.

5.15. INFLUENCIA DE LA NEBLINA EN LA HIDROLOGÍA REGIONAL

La presencia de la vegetación influye en el balance hídrico regional debido a la redistribución de la precipitación en throughfall y stemflow. En Fuente-Tomai (2011) se calculó el stemflow en todos los árboles de la parcela de Villacís (Septiembre-Diciembre) y tres arbustos de miconia en la parcela de Media Luna (Octubre-Diciembre), de donde se determinó que el stemflow representa menos del 1 % de la precipitación en ambas parcelas. Esto quiere decir que el aporte de agua por parte del stemflow es muy pequeño comparada con el de throughfall, el error en la medición de throughfall es mucho mayor en ambos casos por lo que se despreció el aporte del stemflow y se consideró al throughfall igual a la precipitación neta.

En Pryet et al. (subm) se calculó la evaporación en Villacís y en Media Luna, durante 75 días donde se tuvieron datos simultáneos de ambas estaciones. Se usó el modelo de pérdidas de intercepción de Rutter modificado para intervalos de tiempo cortos. En Villacís, se estimó a la evaporación (45 mm) como el 21 % de la precipitación (209 mm),

y por lo tanto se determinó que no existe intercepción de neblina. En Media Luna, se estimó a la evaporación (34 mm) como el 13 % de la precipitación (269).

Usando la ecuación 3.7 para el balance hídrico, y tomando en cuenta la inexistencia de intercepción de neblina en Villacís, y la evaporación como el 13 % de la precipitación en Media Luna, se determinó el resto de variables como se ve en la tabla 5.13.

Tabla 5.13: Resumen de la variables del balance hídrico para todo el periodo de estudio en las parcelas de Villacís y Media Luna.

Villacís	Variable	Media Luna
[%] ^a		[%] ^a
100	P_b^b	100
0	I_N^c	35
23	E_v^d	13
77	T_f^e	122

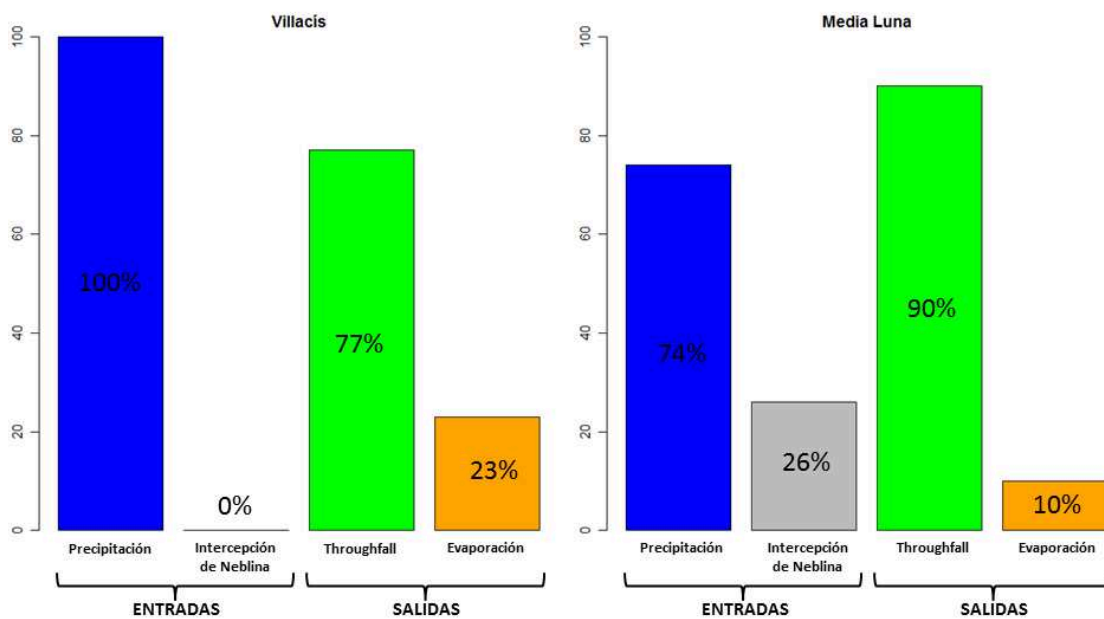
^a Porcentaje respecto a la precipitación.
^b Precipitación incidente.
^c Intercepción de neblina.
^d Evaporación.
^e Throughfall.

Elaborado por: Autor.

En la figura 5.40 se puede apreciar con claridad las entradas y salidas del balance hídrico, en donde se puede decir que la presencia de vegetación en Villacís reduce la cantidad de agua que llega al suelo, mientras que en Media Luna, la vegetación agranda la cantidad de agua que llega al suelo, y por ende a los posibles acuíferos.

La estimación de la precipitación neta es un dato valioso para determinar la recarga de los acuíferos, sin embargo la estimación de la recarga también depende de los procesos que suceden en el suelo, donde también existe una intervención por parte de la vegetación. El proyecto *GIIWS* realiza un monitoreo de los flujos de agua dentro del suelo y de la captación de agua por parte de las raíces de los árboles, para de esta manera determinar la recarga, en donde la precipitación neta es la entrada del sistema.

Figura 5.40: Balance hídrico en las parcelas de Villacís y Media Luna. Los valores de las variables están presentados como el porcentaje respecto al total de la entrada o salida. (a) Balance hídrico en Villacís, nótese la inexistencia de intercepción de neblina, siendo la precipitación la única entrada al sistema. (b) Balance hídrico en Media Luna, la intercepción de neblina resulta una considerable entrada al sistema, y prevalece sobre la evaporación.



Elaborado por: Autor.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- En el año 2010 existieron bajas temperaturas debido a la anomalía de La Niña pero precipitaciones cercanas a la media anual durante los años de 1987-2010. La temporada de garúa se caracterizó por la presencia semipermanente de neblina a alturas mayores a los 400 m.s.n.m acompañadas con precipitaciones de baja intensidad.
- El diseño experimental resultó ser adecuado para ciertos aspectos del estudio e inadecuado para otros aspectos. Los canales permitieron hacer una cuantificación continua con un área representativa, determinar la persistencia temporal y relacionar el throughfall con las variables climatológicas. El uso de colectores (33 en Villacís y 13 en Media Luna) permitió determinar la variabilidad espacial y la comparación entre el throughfall y la vegetación, sin embargo la cantidad y distribución de éstos no permitió obtener valores más representativos (en Villacís el error fue de de 13.4 % necesitándose 51 colectores para tener un error del 10 %. En Media Luna, el error fue del 20.7 % necesitándose 102 colectores para reducir el error al 10 %.) ni definir de forma confiable la autocorrelación espacial.
- La distribución espacial del throughfall fue sesgada positivamente en ambos sitios de estudio debido a la existencia de puntos de goteo, por lo que el uso de estimadores robustos permitió no sobreestimar ciertos datos.
- En Villacís, no existe diferencia significativa entre el throughfall recolectado por los colectores y por los canales por lo que se puede validar ambos métodos, mientras que en Media Luna si existe diferencia, sin embargo los canales tienen un área más representativo por lo que su estimación es la más confiable.
- En Villacís, el throughfall cuantificado para el periodo de estudio (Julio-Diciembre) es el 77 % de la precipitación, donde la intercepción de la vegetación es positiva, reduciéndose la cantidad de agua para la recarga de los posibles acuíferos. En Media Luna, el throughfall para el periodo de Septiembre-Diciembre es del 122 %, donde la intercepción de la vegetación es negativa, siendo ésta un aporte adicional de agua para la recarga.

- Existe una alta variabilidad espacial de throughfall que puede ser explicada por:
 - En Villacís, una estructura muy compleja de la vegetación (caponea y sotobosque) debido a la diversidad de plantas y árboles y a la alta cantidad de epífitas que pueden crear potenciales puntos de goteo, los cuales se activan discontinuamente.
 - En Media Luna, la posición frente a la exposición del viento, en donde existe una franja con la máxima cantidad de throughfall, que está mayormente expuesta al viento en donde ocurre la intercepción de neblina y otros sectores no tan expuestos al viento donde se tienen cantidades menores de throughfall.

Para ambos sitios, el tipo de lluvia (baja intensidad) presente en Santa Cruz durante esta temporada, pudo haber influenciado en la alta variabilidad espacial presente, al igual que en varios estudios donde se encontró una mayor variabilidad espacial con eventos de pequeña intensidad.

- En cuanto a la variabilidad temporal: En Villacís, no se encontró persistencia general y esto puede ser por la complejidad de la vegetación, cambios dentro del bosque (crecimiento de sotobosque), varios procesos de redistribución (varias alturas de árboles) y principalmente a la presencia de epífitas por los mismos motivos que en la sección anterior. Los puntos más secos tienen menor variabilidad temporal que los puntos mojados, esto puede ser porque la mayoría de ellos está bajo un escudo (tronco o ramas grandes) que está permanentemente sobre ellos, mientras que la mayoría de puntos mojados están bajo puntos de goteo. En Media Luna, se encontró persistencia temporal menor a un mes (un mes para los time stability plots y hasta 20 días para el variograma temporal), puede ser debido a la homogeneidad de la vegetación (solamente arbustos de miconias) y a que las condiciones meteorológicas son similares durante varios días.
- Se encontró una fuerte relación entre el throughfall y la precipitación en ambos sitios de estudio, como se esperaba el throughfall tiene una fuerte dependencia de la precipitación. Con el resto de variables meteorológicas no se encontró ninguna relación en ninguno de los sitios de estudio, sin embargo esto no quiere decir que no exista tal relación, ya que la comparación se hizo con eventos de larga duración donde las variables pueden cambiar significativamente debido a la duración.
- La metodología para determinar la influencia de la vegetación no resultó confiable, ya que no se encontró relación entre la cobertura de vegetación y el throughfall, sin embargo, en Villacís, por observación en las fotografías las características

de la vegetación tienen influencia en la distribución espacial del throughfall. En Media Luna no se observó lo anterior, pero la presencia de la vegetación es la que promueve el proceso de intercepción de neblina (precipitación horizontal) y modifica la cantidad de throughfall.

- A pesar de que las dos estaciones están relativamente cerca (3 km), existe una gran diferencia en las cantidades de throughfall en ambas. Esto se puede explicar por los bajos niveles de evaporación (condiciones meteorológicas) y a la presencia semipermanente de neblina(intercepción) que existen en Media Luna.
- Este estudio permite resaltar la importancia de las mediciones de throughfall para la estimaciones de la recarga de los acuíferos durante la época de garúa.

6.2. RECOMENDACIONES

Para mejorar y ampliar el conocimiento actual del throughfall en la Isla Santa Cruz, es necesario seguir con el estudio del mismo. Para estudios futuros se recomienda:

- Sería necesario seguir con este estudio tanto en la temporada de garúa para poder validar los resultados obtenidos y durante la temporada de invierno para comparar los resultados.
- Para el diseño experimental, es necesario aumentar el número de colectores en ambos sitios y sería conveniente ubicar los colectores juntos formando líneas, para de esta manera reducir el error y tener distancias mínimas que permitan construir un variograma confiable para determinar la autocorrelación espacial. En Media Luna, se debería tomar en cuenta la posición de los colectores, en especial si no se va a usar un número abundante de ellos, esto también se debería tomar en cuenta para los canales.
- En Media Luna, sería preferible cambiar el diseño experimental, mejor usar transectos largos en dirección Sur-Norte, ya que en Media Luna podría ser más interesante conocer la variación del throughfall con la altura y el efecto del viento y la neblina.
- Las mediciones de los colectores se deberían realizar después de cada evento, aunque para la época de garúa resultaría muy complicado debido la cantidad y a la larga duración de los eventos (además de que la mayoría se presentan en la noche), por lo que se recomienda hacerlo diariamente.

- Continuar con la construcción del variograma temporal, ya que con un mayor número de datos se puede construir un variograma más confiable y tener datos en distintas temporadas, de esta manera se podría determinar la duración de la autocorrelación temporal para un año.
- Desarrollar una mejor metodología para determinar la influencia de la vegetación en el throughfall, donde parte de ella sería tomar fotografías continuamente de la vegetación que se encuentra sobre los colectores, para de esta manera evidenciar los posibles cambios en la vegetación.
- Integrar en la investigación la cuantificación adecuada de la evaporación, ya que las estimaciones muestran que la evaporación es significativa, y si es posible cuantificar de forma más precisa la interceptación de la neblina para tener un real conocimiento del aporte de la neblina en los procesos hidrológicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alpert, L. (1946). Notes on the weather and climate of Seymour Island, Galapagos Archipelago. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 27:200-209.
- Beard, J. (1955). The classification of tropical American Vegetations Types. *Ecology* 26, pages 89-100.
- Belmonte, F., Romero, A., and López, F. (1996). Volumen y variabilidad espacial de la lluvia trascolada bajo bosque y matorral mediterráneo semiarido. *Ecología* #10.
- Bivand, R., Pebesma, E., and Gómez-Rubio, V. (2008). Applied Data Analysis with R. Springer+Science Business Media, LLC.
- Carlyle-Moses, D., Flores, J., and Price, A. (2004). Throughfall and throughfall spatial variability in Madrean oak forest communities of northeastern Mexico. *Journal of Hydrology*, 297:124-135.
- Cavalier, J., Jaramillo, M., Solis, D., and de León, D. (2007). Water balance and nutrient inputs in bulk precipitation in tropical montane cloud forest in Panama. *Journal of Hydrology*, 193:83-96.
- Chica-Olmo, M. (1987). Análisis Geoestadístico en el Estudio de la Explotación de Recursos Minerales. PhD thesis, Universidad de Granada, España.
- Cressie, N. (1991). Statistic for Spatial Data. John Wiley & Sons, Inc.
- Crockford, R. and Richardson, D. (1990). Partitioning of rainfall in a eucalypt forest and pine plantation in southeastern Australia: I. Throughfall measurement in a eucalypt forest: effect of method and species composition. *Hydrological Processes*, 4(2):169-188.
- Crockford, R. and Richardson, D. (2000). Partitioning in rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes*, 14:2903-2920.
- Domínguez, C., Pryet, A., Fuente-Tomai, P., d'Ozouville, N., Violette, S., and Villacís, M. (2011). Interception and redistribution of rainfall by vegetation as controlling factors recharge rates: a case-study in Galápagos Islands. European Geoscience Union. Poster.

- d'Ozouville, N. (2007a). Agua dulce: la realidad de un recurso crítico. Informe Galápagos 2006-2007, pages 150-155.
- d'Ozouville, N. (2007b). Étude du Fonctionnement Hydrologique dans les Iles Galápagos: Caractérisation d'un Milieu Volcanique Insulaire et préalable à la Gestion de la Ressource. PhD thesis, Université Paris, Paris.
- d'Ozouville, N., Deffontaines, B., Jérôme, B., Wegmuller, U., Violette, S., and de Marsily, G. (2008). DEM generation using ASAR (ENVISAT) for addressing the lack of fresh-water ecosystems management, Santa Cruz Island, Galapagos. *Journal of Hydrology*, 112:4131-4147.
- Epler, B. (2007). Turismo, Economía, Crecimiento Poblacional y Conservación en Galápagos. Technical report, Charles Darwin Foundation.
- Fleischbein, K., Wilcke, W., Valarezo, C., Zech, W., and Knoblich, K. (2006). Water budgets of three small catchments under montane forest in Ecuador: experimental and modelling approach. *Hydrological Processes*, 20(12):2491-2507.
- Frost, H. (2004). El Ciclo del Agua. Coughlan Publishings.
- Fuente-Tomai, P. (2011). Water budget components study during fog season: Vegetation, Stemflow, Sapflow. Technical report, Galápagos Island Water Studies.
- Funes, H. N. (2004). Métodos Estadísticos en Problemas Espaciales. Estadística aplicada, Universidad Nacional de Tucuman.
- Hamann, O. (1979). On Climatic conditions, vegetation types, and leaf size in the Galapagos Islands. *Biotropica*, 11:101-122.
- Harraway, J. (1997). Introductory Statistical Methods for Biological, Health and Social Sciences. University of Otago Press, Dunedin.
- Herrera, J. (2008). Introducción al estudio de la hidrología: Balance Hídrico. <http://www.slideshare.net/hidrologia/1-introduccion-al-estudio-de-la-hidrologia-balance-hidrico-presentation>. Universidad de Oriente, Venezuela.
- Holwerda, F., Brujinzeel, L., Muños-Villers, L., Equijua, M., and Asbjornsen, H. (2010). Rainfall and cloud water interception in mature and secondary lower montane cloud forests of central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology*, 384:84-96.

- Holwerda, F., Burkard, R., Eugster, W., Scatena, F., Meesters, A., and Bruijnzeel, L. (2006). Estimating fog deposition at a Puerto Rican elfin cloud forest site: comparison of the water budget and eddy covariance methods. *Hydrological Processes*, 20:2669-2692.
- Hutjes, R., Wierda, A., and Veen, A. (1990). Rainfall interception in the tai forest, Ivory Coast: Application of two simulation models to a humid tropical system. *Journal of Hydrology*, 114:259-275.
- Huttel, C. (1995). Vegetación en Coladas de Lava. ORSTOM.
- INEC (2010). Encuesta de Condiciones de Vida 2009-2010. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.
- INGALA-PRONAREG-ORMSTOM (1989). Inventario Cartográfico de los Recursos Naturales, Geomorfología, Vegetación, Hídricos, Ecológicos y Biofísicos de las Islas Galápagos, Ecuador. INGALA.
- Ingraham, N. and Matthews, R. (1988). Fog Drip as a Source of Groundwater Recharge in Northern Kenya. *Water Resources Research*, 24(8):1406-1410.
- Jäguer, H., Kowarik, I., and Tye, A. (2009). Destruction without extinction: long-term impacts of an invasive tree species on Galápagos highland vegetation. *Journal of Ecology*, 97:1252-1263.
- Journel, A. and Huijbregts, C. (1978). Mining Geoestatics. Academic Press, New York.
- Juvik, J. and Nullet, D. (1995). Comments on "A proposed standard fog collector for use in high elevation regions". *Journal of Applied Meteorology*, 34(9):2108-2110.
- Keim, R., Skagset, A., and Weiler, M. (2005). Temporal persistence of spatial patterns in throughfall. *Journal of Hydrology*, 314:263-274.
- Kimmins, J. (1973). Some Statistical Aspects of Sampling Throughfall Precipitation in Nutrient Cycling Studies in British Columbian Coastal Forest. *Ecological Society of America*, 54(5):1008-1019.
- Krajewski, S. and Gibbs, B. (1993). A Variogram Primer. Gibbs Associates.
- Laruelle, J. (1966). Study of a soil sequence on Indefatigable Island. *The Galápagos, Proceedings of the Symposia of the Galápagos International Scientific Project*, pages 87-92.

- Lloyd, C. and Marques, A. (1988). Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in amazonian rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 42:63-73.
- Loescher, H., Powers, J., and Oberbauber, S. (2002). Spatial variation of throughfall volume in an old-growth tropical wet forest, Costa Rica. *Journal of Tropical Ecology*, 18:397-407.
- MacFarlane, C., Hoffman, N., Eamus, D., and Kerp, N. (2007). Estimation of leaf area index in eucalypt forest using digital photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143:176-188.
- McJannet, D. and Wallace, J. (2006). Methodology for estimating cloud interception inputs to tropical rainforest. Technical report, CSIRO Land and Water Science.
- McJannet, D., Wallace, J., and Redell, P. (2007). Precipitation interception in Australian tropical rainforests: I. Measurement of stemflow, throughfall and cloud interception. *Hydrological Processes*, 21:1692-1702.
- Monsalve, G. (1995). Hidrología en la Ingeniería. Departamento de Publicaciones Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá.
- Nieuwolt, S. (1991). Climatic uniformity and diversity in the Galapagos Islands and the effects on agriculture. *Erdkunde*, 45:134-142.
- Olive, D. (2005). A Simple Confidence Interval for the Median. Department of Mathematics, Southern Illinois University.
- Palmer, C. and Pyle, R. (1966). The climatological setting of the Galapagos. *The Galapagos: Proceedings of the symposia of the Galapagos international scientific project*, pages 93-99.
- PNG (2010). Parque Nacional. www.galapagospark.org. Dirección del Parque Nacional Galápagos.
- PNG (2011). El Valor de los Ecosistemas en Galápagos. <http://www.galapagospark.org>. Parque Nacional Galápagos.
- Pourrut, P. (1995). El Agua en el Ecuador. Clima, precipitaciones, escorrentía, volume 7. ESTUDIOS DE GEOGRAFÍA.
- Pryet, A. (prep). Hydrogeology of volcanic islands: a case-study in the Galapagos Archipelago. PhD thesis (In prep). Université Pierre et Marie Curie, Paris.

- Pryet, A., Domínguez, C., Fuente-Tomai, P., Chaumont, C., d'Ozouville, N., Villacís, M., and Violette, S. (subm). Quantification of cloud water interception along the windward slope of Santa Cruz Island, Galapagos (Ecuador). Submitted for revision to *Agricultural and Forest Meteorology*.
- Raat, K., Draaijers, G., Schaap, M., Tietema, A., and Verstraten, J. (2002). Spatial variability of throughfall water and chemistry and forest floor water content in a Douglas fir forest stand. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(3):363-374.
- Rodrigo, A. and Ávila, A. (2000). Influence of sampling size in the estimations of mean thoroughfall in two Mediterranean holm oak forest. *Journal of Hydrology*, 243:216-227.
- Ruiz, D. (2004). Manual de Estadística. eumed.net.
- Santos, E. (2009). Geomática aplicada en la determinación de la estructura y funcionamiento del sistema hídrico hidrogeológico de la isla Santa Cruz, Galápagos. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Tesis de Licenciatura.
- Saravia, E. (2008). Sistema autónomo de adquisición de datos portátil data logger. Technical report, Universidad Mar del Plata, Argentina.
- SEFO (2010). Las pruebas estadísticas. Metodología de la investigación científica. <http://scientific-european-federation-osteopaths.org/es/prueba-estadisticas>. Scientific European Federation of Osteopaths.
- Shapiro, S. and Wilk, M. (1965). An analysis of variance test for normality. *Biometrika*, 52:591-611.
- Snell, H. and Rea, S. (1999). The 1997-1998 El Niño in Galápagos: can 34 years of data estimate 120 years of pattern? *Noticias de Galápagos*, 60:11-20.
- Staelens, J., De Schrivjer, A., Verheyen, K., and Verhoest, N. (2006). Spatial variability and temporal stability of throughfall water under a dominant beech (*Fagus sylvatica* L.) tree in relationship to canopy cover. *Journal of Hydrology*, 330:651-662.
- Thimonier, A. (1998). Measurement of atmospheric deposition under forest canopies: some recommendations for equipment and sampling design. *Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research*.
- Trueman, M. (2010). First pass assessment of climate change impacts for terrestrial biodiversity in Galapagos. Technical report, Charles Darwin Foundation.

- Trueman, M. and d'Ozouville, N. (2010). Characterizing the Galapagos terrestrial climate in the face of global climate change. Technical report, Charles Darwin Foundation.
- UMA (2010). Bioestadística: Métodos y Aplicaciones. <http://www.bioestadistica.uma.es/libro/node106.htm>. Facultad de Medicina, Universidad de Málaga, España.
- UNESCO (2011). Galápagos Islands. <http://whc.unesco.org/en/list/1/>. UNESCO-ERI.
- USGS (2009). El Ciclo del Agua. <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html#oceans>. U.S Geological Survey.
- Villegas, J. C., Tobón, C., and Breshears, D. (2008). Fog interception by non-vascular epiphytes in tropical montane cloud forests: dependencies on gauge type and meteorological conditions. *Hydrological Processes*, 22:2484–2492.
- White, W., McBirney, A., and Duncan, R. (1993). Petrology and geochemistry of the Galápagos Islands: Portrait of a pathological mantle plume. *Journal of Geophysical Research*, 98(11):19533-19563.
- Wiggins, I. and Porter, D. (1971). Flora of the Galápagos Islands. Stanford University Press.
- Wullaert, H., Pohlert, T., Boy, J., Valarezo, C., and Wilcke, W. (2009). Spatial throughfall heterogeneity in a montane rain forest in Ecuador: Extent, temporal stability and drivers. *Journal of Hydrology*, 377:71-79.
- Ziegler, A., Giambelluca, T., Nullet, M., Sutherland, R., Tantasarin, C., Vogler, J., and Negishi, J. (2009). Throughfall in an evergreen-dominated forest stand in northern Thailand: Comparison of mobile and stationary methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 49:373-384.
- Zimmermann, A., Wilcke, W., and Elsenbeer, H. (2007). Spatial and temporal patterns of throughfall quantity and quality in a tropical montane forest in Ecuador. *Journal of Hydrology*, 343:80-96.
- Zimmermann, A., Zimmermann, B., and Elsenbeer, H. (2009). Rainfall redistribution in a tropical forest: Spatial and temporal patterns. *Water Resources Research*, 45(W11413).
- Zimmermann, B., Zimmermann, A., Murray, R., and Elsenbeer, H. (2010). Sampling procedures for throughfall monitoring: A simulation study. *Water Resources Research*, 46(W01503).

ANEXOS

ANEXOS A

RECOLECCIÓN DE DATOS

Debido a la alta variabilidad espacial y temporal del throughfall, es difícil determinar de forma apropiada el diseño de muestreo más adecuado. Actualmente no existe ninguna normativo para la instrumentación de este tipo de investigación, el diseño experimental que se usa depende principalmente del tipo de bosque en donde se van a realizar las mediciones, y de las condiciones climáticas. Por este motivo, existen contradicciones en los resultados de varios estudios. Esto ha provocado que no exista un convenio para el diseño de muestreo. El diseño implementado en esta tesis, ha sido a partir de las recomendaciones que se han hecho en otros estudios respecto a este tema alrededor del mundo (Lloyd and Marques, 1988; Carlyle-Moses et al., 2004; Keim et al., 2005; Holwerda et al., 2006; Staelens et al., 2006; McJannet et al., 2007; Ziegler et al., 2009; Zimmermann et al., 2010), sin embargo, el documento que da una mejor propuesta sobre la instrumentación es Thimonier (1998). Otra cosa a considerar, es que se usó únicamente los materiales disponibles dentro de la isla, y por estar tan apartada del continente, algunos materiales fueron muy limitados.

A.1. EQUIPOS

A.1.1. ESTACIÓN METEOROLÓGICA

Para la construcción de las estaciones meteorológicas se mandó a construir la estructura principal (consistió en un poste principalmente). La ubicación fue fundamental, se la puso al aire libre y a una distancia lo suficientemente alejada del bosque para que no interfiera en las mediciones y relativamente cerca al bosque para que las mediciones no varían respecto al bosque.

El datalogger de la estación tiene un batería de 12 voltios, que se la debía cambiar aproximadamente cada 15 días debido a la cantidad de sondas conectadas a éste, y al volumen de mediciones. El datalogger está dentro de una caja que no permite el ingreso de humedad, sin embargo la humedad dentro de la caja fue un problema constante. Se usó una gran cantidad de desicantes que se los cambiaba periódicamente para resolver este problema. Alrededor de la estación se construyó una cerca, para evitar el ingreso de animales grandes que puedan dañarla.

Figura A.1: *Proceso de construcción de la estación Villacís.*



Fuente: Alexandre Pryet.

Figura A.2: *Fotografía del DataLogger Campbell CR1000.*



Fuente: Alexandre Pryet.

Figura A.3: Canales de recolección de la Estación Villacís. Nótese la caja que cubre el pluviómetro automático.



Fuente: Alexandre Pryet.

A.1.2. CANALES

La elección del uso de canales semicirculares de PVC se debió a la falta de otro tipo de materiales y formas. Sin embargo, haciendo pruebas de drenaje de agua, se determinó que no existe una gran diferencia con otras formas como triangulares (una de las formas que más se usa).

La implementación de los canales resultó complicada, ya que se trató de ponerlos lo más bajo posible (para que pueda estar bajo el sotobosque) y que tengan la mayor pendiente posible (requiere mayor altura). Para esto, se tuvo que hacer un hueco en el suelo e instalar el pluviómetro donde se drenaban los canales en este hueco. Al pluviómetro se le fabricó una caja para taparlo completamente, de manera que solo entre el agua de los canales por el embudo que los conectaba.

La medición de la proyección del área horizontal se la hizo con mucho detalle. Tomando en cuenta las medidas exactas de los canales, su diámetro, longitud, pendiente, y la porción de área que ocupaban sobre el embudo de drenaje.

Una de las cosas más importantes respecto al uso de los canales, es su calibración. Una calibración adecuada es fundamental para una estimación adecuada del throughfall. Para la calibración se usó 1 litro de agua, que fue regada en todos los canales por

Figura A.4: Detalle del interior del pluviómetro automático.



Fuente: Alexandre Pryet.

medio de una jeringa. Durante este proceso se midió el número de tips que realizó el balancín. A partir del volumen de agua y la proyección horizontal del área se determinó cuantos mm de altura de agua representaba un tip del balancín. El tiempo en regar el agua en los canales, también es importante, ya que debe simular una intensidad de throughfall similar a la que se da regularmente durante los eventos. Por este motivo, se usó la mediana de las intensidades registradas para obtener el tiempo equivalente en la calibración.

Otro asunto importante fue el mantenimiento. Se requirió hacer constantes limpiezas, tanto a los canales como al pluviómetro, los cuales se llenaban de material orgánico constantemente, impidiendo una medición acertada por parte del balancín.

A.1.3. COLECTORES

Para la fabricación de los colectores también su tuvo limitantes, pues no se pudo encontrar un tanque de almacenamiento adecuado, por lo que se tuvo que usar jarras plásticas. Los embudos se los consiguió paulatinamente en todas las ferreterías de Puerto Ayora, dejando *out of stock* a este producto en la Isla.

Figura A.5: *Detalle de la calibración de los canales con una jeringa.*



Fuente: Alexandre Pryet.

Se determinó la parcela de estudio alrededor de los canales, y se realizó una grilla con piolas para tener una noción de la ubicación de los canales y posteriormente de los colectores. Los colectores se los puso aleatoriamente en la grilla. Se usó una identificación en cada uno, se determinó sus coordenadas en la grilla y su peso vacío.

Sus mediciones se las hizo con una balanza electrónica, ubicándola completamente horizontal sobre el suelo. Para cada visita, se realizaba una medición al inicio, cuando el colector tenía agua. Luego se vaciaba el agua, y se lo volvía a medir sin agua. De la diferencia entre la primera medición y la segunda medición del periodo anterior se obtenía el peso de agua para aquel periodo. El peso se lo transformaba en volumen tomando en cuenta que la densidad del agua era de 1 gr/cm^3 . Igual que con los canales, el volumen se lo transformaba a mm de altura de agua, a partir del volumen y el área del colector (la misma para todos los colectores).

La limpieza también fue fundamental, frecuentemente se encontraba dentro de los colectores material orgánico, ramas y hojas; los cuales se sacaba para la medición del peso del colector, ya que su peso podía tener una influencia considerable.

Figura A.6: Parcela de medición con la grilla para medir la posición de los colectores. Nótese alrededor del tronco la manguera de recolección del stemflow que termina en un tanque.



Fuente: Pilar Fuente-Tomai.

Figura A.7: Medición de un colector usando la balanza electrónica.



Fuente: Pilar Fuente-Tomai.

A.2. PROTOCOLO DE CAMPO

Para poder ir a hacer las mediciones en campo y realizar el mantenimientos de las estaciones fue necesario tener un protocolo de campo.

A.2.1. MATERIALES

El encargado de las estaciones debe tener los siguientes materiales para hacer su visita de campo:

- Computadora portátil
- Cable USB de conexión con la estación
- Balanza electrónica
- Tensiometro
- Navaja
- Destornilladores
- Cuaderno de anotación
- Ropa impermeable
- Plástico
- Mochila
- Batería
- Botas
- 4 Litros de agua
- Celular
- Comida (si se va a estar por un largo tiempo)
- Botiquín de primeros auxilios
- GPS

A.2.2. REQUERIMIENTOS

El encargado de las estaciones debe:

- Conocer perfectamente el objetivo de las actividades a realizar en campo.
- Revisar las estaciones por lo menos 3 veces por semana.
- Conocer todas las conexiones y diagramas de los circuitos eléctricos para resolver cualquier problema en campo.
- Conocer la programación del DataLogger y en caso de necesitarlo hacer modificaciones.
- Anotar cualquier eventualidad durante la visita de campo.
- En caso de ocurrir un problema avisar al encargado del tratamiento de datos.
- Condición física adecuada.

A.2.3. ACTIVIDADES

Las actividades que debe realizar el encargado de las estaciones son:

- Descarga de datos
- Limpieza de canales y colectores
- Medición de colectores
- Medición de tensiometros
- Revisar el buen funcionamiento de todas las sondas de las estaciones
- Revisar el nivel de la batería
- Cambiar desicantes
- Resolver problemas en cuanto al mal funcionamiento de los equipos

A.2.4. PERMISOS

Para poder visitar las estaciones el encargado debe:

- Tener el permiso actualizado del Parque Nacional Galápagos patrocinado por la Estación Científica Charles Darwin.
- Ir siempre con un acompañante.
- Plan de viaje.
- Plan de seguridad.
- Plan de primeros auxilios.
- Avisar a la Estación Científica Charles Darwin cada vez que se va a hacer una visita de campo.

ANEXOS B

EJEMPLO DEL PROCEDIMIENTO DEL ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO

Para este ejemplo se usó los datos de los colectores, correspondientes a la novena semana de medición. El coeficiente de sesgo octil resultó ser 0.195. Este valor es menor a 0.2, por lo tanto no se realizó la transformación logarítmica a los datos.

Tabla B.1: Datos de los 33 colectores en Villacís para la novena semana de medición.

Colector	Thfall ^a	Colector	Thfall ^a	Colector	Thfall ^a
1	72.69	12	60.92	23	97.39
2	67.77	13	105.80	24	69.46
3	65.96	14	20.31	25	69.46
4	44.88	15	46.82	26	58.07
5	37.12	16	245.36	27	37.77 [*]
6	92.87	17	46.95	28	191.17
7	78.90	18	63.64 ^{**}	29	89.63
8	24.06	19	36.73	30	80.84
9	102.05 ^{***}	20	104.51	31	53.03
10	52.64	21	55.88	32	54.58
11	75.15	22	55.10	33	72.30

^a Throughfall relativo como porcentaje de la precipitación.

^{*} Primer Octil.

^{**} Mediana.

^{***} Séptimo Octil.

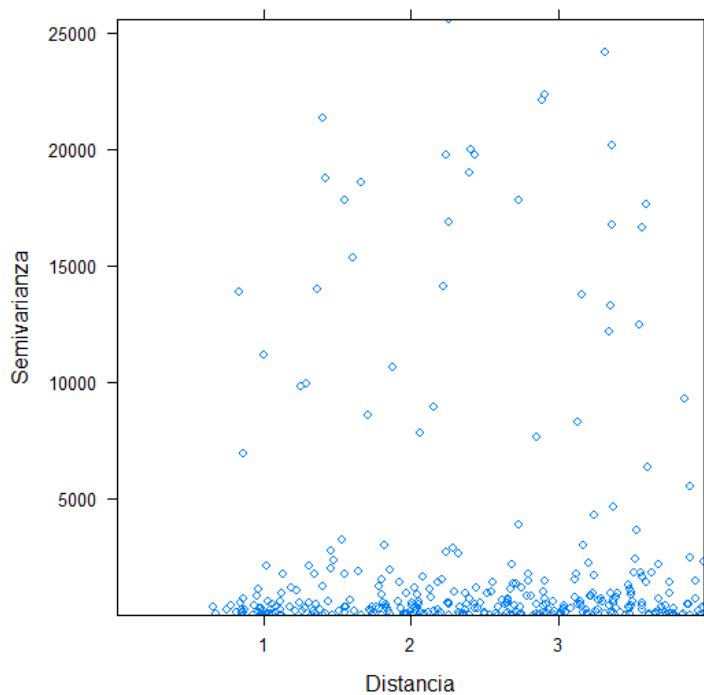
Elaborado por: Autor.

Se realizó la construcción de la nube de variograma, con una separación de 0.5m y una longitud máxima de 4m.

Debido a la cantidad de valores extremos se decidió utilizar el estimador de Cressie para el variograma experimental.

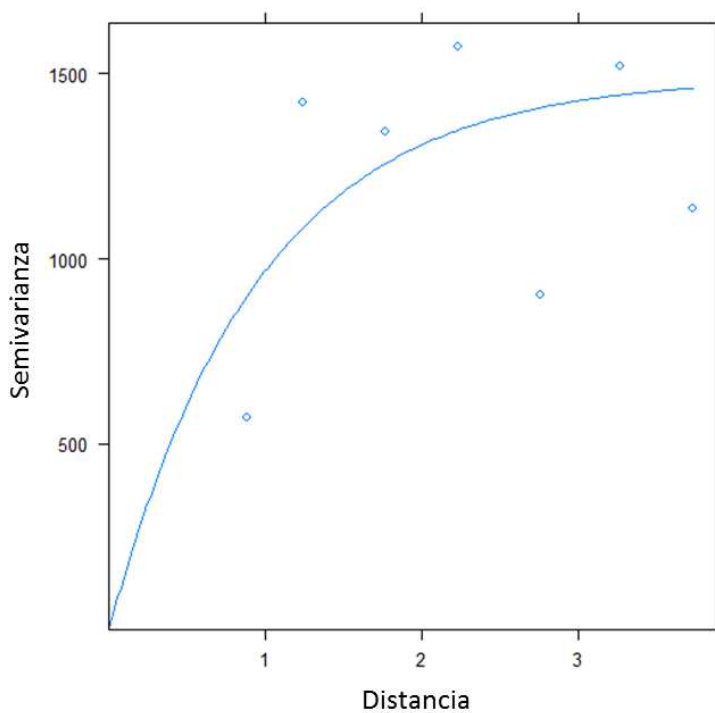
Tomando en cuenta la forma del variograma experimental, se se notó cierta tendencia hacia un modelo exponencial, sin embargo se vio puntos que podían tener influencia en la forma, por lo que se usó el método de máxima verosimilitud. Finalmente se encontraron los valores del modelo.

Figura B.1: Nube de variograma para la novena semana de medición. Nótese la existencia de varios valores extremos a distintas longitudes.



Elaborado por: Autor.

Figura B.2: Variograma experimental y modelo de variograma teórico para la novena semana de medición.



Elaborado por: Autor.

Tabla B.2: Datos del variograma experimental de la novena semana de medición usando el estimador de Cressie.

Número	Puntos	Distancia	Semivarianza
1	25	0.88	572
2	45	1.23	1422
3	44	1.77	1342
4	59	2.22	1573
5	57	2.76	903
6	60	3.27	1518
7	54	3.73	1136

Elaborado por: Autor.

Tabla B.3: Características del variograma teórico para la novena semana de medición.

Modelo	Exponencial
Pepita	0
Alcance	1490
Rango	0.95

Elaborado por: Autor.