

Régimen de precipitación en la cuenca de Huarinilla-Cotapata, La Paz-Bolivia

Precipitation regimen in the Huarinilla-Cotapata basin,
La Paz-Bolivia

Jorge Molina-Carpio

Instituto de Hidráulica e Hidrología,
Universidad Mayor de San Andrés, La Paz - Bolivia
jmolina_ihh@accelerate.com

Resumen

Se ha estudiado el régimen de precipitación en la cuenca del río Huarinilla mediante el análisis de registros de ocho estaciones pluviométricas instaladas a partir de 1995. Esta cuenca está situada en la falda oriental de la cordillera de Los Andes entre los 5.600 y 1.100 m. Forma parte de la región de Los Yungas y es en su mayor parte área protegida. Por lo corto del periodo de registro y con el objeto de inferir el comportamiento a largo plazo, se realizó un análisis estadístico usando una estación próxima a la cuenca, que cuenta con un periodo de registro mucho más largo. Los resultados indican que la precipitación supera los 3.000 mm/año en la mayor parte de la región de bosque nublado, con lluvias continuas y de intensidad moderada. En las regiones de páramo yungueño y bosque húmedo montañoso la precipitación está en el rango de 1.500 a 2.200 mm/año. Se observa también una gran variación espacial, que se relaciona con la gran complejidad del relieve.

Palabras clave: Clima, régimen pluviométrico, Andes orientales, bosque nublado.

Abstract

The precipitation regime in the Huarinilla river basin was studied through the analysis of data collected by eight rainfall gauges installed since 1995. The basin is located on the humid eastern side of the Andes, between 5.600 and 1.100 m. As the period of measurement was short and with the aim of inferring the long term pattern, a statistical analysis was carried out using a gauge with a much longer record. The results obtained show that total annual precipitation exceeds 3.000 mm in most of the cloud forest region, where the rain is continuous and of moderate intensity. It is in the range of 1.500 to 2.200 mm/year in the "paramo yungueño" and mountain forest regions. A great spatial variability was observed, which is associated with the complex relief.

Key words: Climate, precipitation regime, Eastern andes, cloud forest.

Introducción

Existen pocos estudios sobre el régimen de precipitación de regiones montañosas húmedas e hiperhúmedas de Bolivia, situadas casi todas sobre el flanco oriental de la cordillera de los Andes. La mayor parte de la información existente se limita a la región del Chapare en el departamento de Cochabamba. En el caso del departamento de La Paz, sólo existen los estudios de Campos (1990) sobre el clima de la cuenca andina del río Beni y más recientemente, de Calle (1999) sobre la región de los Yungas. Ninguno de estos estudios incluye información sobre la ecoregión del bosque nublado.

En esta región, la mayor parte de la precipitación cae durante el verano, entre diciembre y marzo, coincidiendo con la inflexión hacia el sur de la Zona Intertropical de Convergencia (ZITC). Lo esencial del vapor precipitable se origina en el Atlántico, que es reciclado ampliamente por evapotranspiración en la Amazonía y transportado por los vientos alisios del este/noreste. Estos vientos se desvían a lo largo de los Andes siguiendo la dirección sureste de la cadena montañosa. Al mismo tiempo se observa al sur y sobre el Altiplano la formación de un centro de alta presión ("alta de Bolivia") en la troposfera superior. Durante el invierno este anticiclón desaparece y la ZCIT se mueve hacia el norte, lo que coincide con una menor disponibilidad de agua en la atmósfera. Como consecuencia de este comportamiento estacional y espacial, el vector medio anual de flujo de vapor de agua al pie de los Andes tiene sentido sur/sureste o lo que es lo mismo, las masas de aire húmedo ingresan a la región por el norte/noroeste (Zeng 1999).

Con frecuencia, la falta de registros meteorológicos en regiones montañosas húmedas se debe a las dificultades de acceso y a la escasa población, lo que ha sido el caso de la cuenca del río Huarinilla. Sin embargo, a partir de 1995 se instalaron los primeros pluviómetros a lo largo de la nueva carretera Cotapata-Santa Bárbara, que se desarrolla por el sector sur de la

cuenca. En diciembre de 1996 y debido a los requerimientos de otro proyecto de infraestructura de desarrollo hidroenergético de la cuenca del río Coroico, se instalaron cuatro pluviómetros en la parte alta al oeste de la cuenca. Se cuenta entonces con 5-8 años de registros insuficientes para definir un comportamiento a largo plazo o distribuciones de frecuencia estables. Sin embargo, los datos existentes fueron contrastados con los de la estación climatológica de Chulumani, que cuenta con cerca de 40 años de información continua. En base a ello, se realizó un primer análisis del régimen de precipitación en la cuenca, cuyos resultados se presentan en este trabajo.

Área de estudio

La cuenca del río Huarinilla (figura 1, en coordenadas geográficas), que aguas abajo se denomina río Coroico, se encuentra ubicada en el departamento de La Paz. Forma parte de la cuenca andina del río Beni y por tanto de la cuenca amazónica. Las cumbres de la Cordillera Real, de 6.000 m del altitud, la separan del Altiplano a 3.800 m, situado 25 km al suroeste, donde la precipitación es de solamente 600 mm/año. Entre la planicie amazónica situada 200 km al noreste y la cuenca de Huarinilla, se ubican los valles y serranías (con una altitud máxima de 2.500 m) de los Yungas húmedos. Las coordenadas límite de la cuenca son: 68°02' y 16°20' al sudoeste, 68°03' y 16°05' al noroeste, 67°43' y 16°10' al noreste y 67°47' y 16°18' al sudeste.

Los 490 km² de superficie de la cuenca cubren un rango altitudinal de 4.500 m, desde 5.519 m en el sector occidental a 1.100 msnm en el extremo oriental, donde el curso del río principal cambia bruscamente hacia el norte. Dos cadenas montañosas, cuya altitud descende de oeste a este delimitan la cuenca por el norte y el sur (ver figura 2 en coordenadas UTM PSAD56). Debido precisamente a ese rango, existen al menos cuatro regiones ecológicas, la pradera

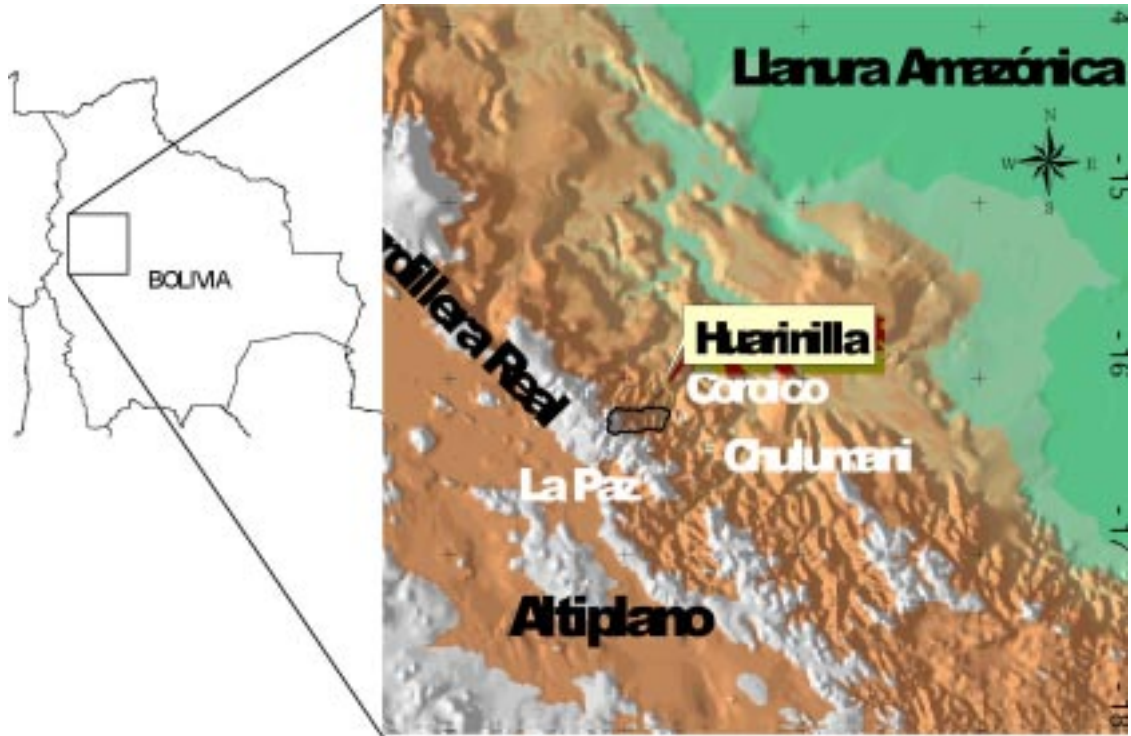


Fig. 1: Ubicación del área de estudio.

altoandina húmeda entre 4.900 y 4.200 m, la pradera parámica o páramo yungueño entre los 4.200 y 3.400 m, el bosque nublado de ceja entre 3.400 y 2.400 m y el bosque húmedo montañoso de Yungas por debajo de los 2.400 m (Ribera 1995). Por encima de los 4.900 m, se encuentra el desierto helado periglaciario. El área ha tenido actividad humana desde épocas precolombinas, pero actualmente esa actividad es de intensidad moderada y concentrada en la parte central y baja del valle del río Huarinilla. Una importante proporción del área permanece inalterada o poco intervenida debido a la dificultad de acceso y la topografía abrupta.

No se conoce con precisión las características hidrológicas de la cuenca por falta de datos

hidrométricos. El estudio de impacto ambiental de la carretera Cotapata-Santa Bárbara (PCA-CEEDI 1991) estimó por comparación con otras cuencas, un caudal medio anual de 22 m³/s para el río Huarinilla antes de la confluencia con el río Elena (cuenca de 435 km²), lo que corresponde a un caudal específico de 50 l/s-km². El río Huarinilla se forma por la confluencia de los ríos Chucura y Tiquimani que nacen por encima de los 4.700 m (Fig. 2). Después de la confluencia, recibe a los ríos Coscapa, Bellavista, Chairó y Elena, casi todos ellos con nacientes en la zona de bosque nublado.

Las condiciones físicas descritas y la variedad climática han dado origen a una gran biodiversidad, con la presencia no sólo de un gran número de especies de flora y fauna, sino

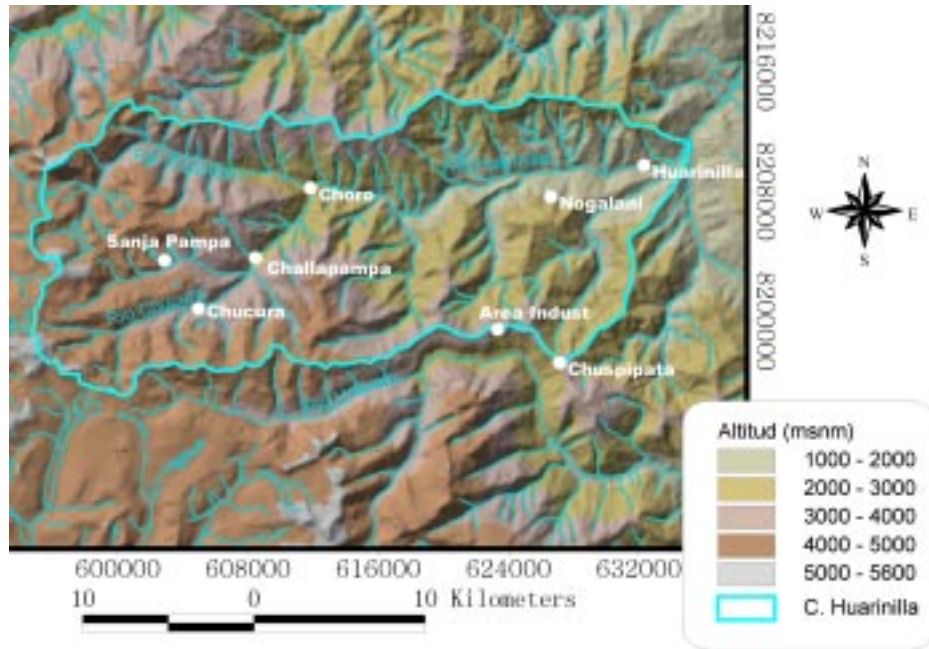


Fig. 2: Relieve local y estaciones pluviométricas.

un alto grado de endemismo (Ribera 1995), lo que unido a su importancia arqueológica y potencial turístico, impulsó la creación del Parque Nacional y Área Natural de Manejo Integrado Cotapata, que cubre no sólo la cuenca del Huarinilla, sino una parte de la cuenca del río Cielo-Jahuira al norte, con una extensión total de 600 km².

La puesta en marcha de varios proyectos de infraestructura ha aumentado las presiones y riesgos sobre el área, pero al mismo tiempo ha permitido disponer de los primeros registros climatológicos. La tabla 1 y figura 2 describen la ubicación geográfica, altitud, cuenca y subcuenca hidrológica y región ecológica a la que pertenecen las ocho estaciones. Cuatro de ellas se encuentran próximas al trazo de la nueva carretera entre 3.200 y 1.100 m. Las otras cuatro se ubican en las subcuencas de los ríos Chucura y Tiquimani entre 3.850 y 2.150 m. Los pluviómetros instalados son de tipo

convencional: superficie de recepción 200 cm², colocados a 1.5 m del suelo.

Métodos

Para el análisis se usó el año hidrológico de septiembre a agosto. Se aplicó el método del vector regional para analizar la consistencia de los datos y para evaluar si las estaciones exhiben un mismo comportamiento regional. Este método crea un vector de índices de precipitación anual, correspondientes a una estación ficticia, en base a la información de las estaciones consideradas en el estudio. La hipótesis de partida es que las estaciones pertenecen a una misma zona climática y tienen totales anuales de precipitación seudo-proporcionales (cualquiera sea la fluctuación climática de la zona). Esta hipótesis es la misma en que se basa el método de la doble acumulada.

En base a los resultados del vector regional,

Tabla 1: Relación de estaciones pluviométricas de la cuenca Huarinilla-Cotapata.

Estación	Latitud S	Longitud O	Altitud m	Cuenca	Subcuenca	Región ecológica
Area Indust.	16°16'58"	67°50'52"	3.180	Huarinilla	Huarinilla	Bosque nublado
Chuspipata	16°18'01"	67°48'50"	3.000	Tamampaya	Unduavi	Bosque nublado
Nogalani	16°12'45"	67°48'09"	2.100	Huarinilla	Huarinilla	Bosque yungueño
Huarinilla	16°11'44"	67°46'06"	1.100	Huarinilla	Huarinilla	Bosque yungueño
Sanja Pampa	16°14'50"	68°01'48"	3.845	Huarinilla	Ilampu	Páramo yungueño
Chucura	16°16'22"	68°00'41"	3.555	Huarinilla	Chucura	Páramo yungueño
Challapampa	16°14'45"	67°58'49"	2.775	Huarinilla	Chucura	Bosque nublado
Choro	16°12'31"	67°57'02"	2.155	Huarinilla	Chucura-Tiq	Bosque yungueño
Chulumani	16°24'29"	67°31'16"	1.750	Tamampaya	Solacama	Bosque yungueño

se recurrió a correlación y regresión múltiple entre estaciones para completar y eventualmente corregir la información a nivel mensual. Los datos a nivel mensual de las ochos estaciones entre 1.995 y 2.000 fueron comparados con los de la estación de Chulumani para el mismo periodo. No se pudo utilizar la estación de Coroico, a pesar de ser más próxima a la cuenca de Huarinilla, por no disponer de registros para el periodo de análisis. La estación de Chulumani dejó de funcionar a fines del 2000, por lo que la comparación solo pudo extenderse hasta el año hidrológico 1999-2000. Se incluye también un análisis preliminar sobre el número de días de lluvia y la precipitación máxima en 24 horas.

Resultados

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos con el método del vector regional para cinco estaciones con varios años de datos. Se utilizaron solamente años hidrológicos con

registros completos. Del índice de correlación r se puede inferir si una estación pertenece a una región climática. Los valores próximos a 1 y la coincidencia entre medias observada y calculada en las estaciones de la tabla 2 indican que ese es el caso para cuatro estaciones. Solamente la estación de Chuspipata presenta un comportamiento diferente.

Los vectores de la última columna de la tabla 2 reflejan el comportamiento regional de un año determinado con respecto a la media del periodo de siete años. Un valor de 1 corresponde a una precipitación igual a la media del periodo. Se observa que en los años 1996-97, 2000-01 y 2001-02, la precipitación estuvo por encima del promedio 1995-2002. En los cuatro años restantes, la precipitación estuvo por debajo de la media, con un mínimo para el año hidrológico 1997-98.

Con el objeto de analizar si existe una relación entre la precipitación anual y el fenómeno de El Niño (ENSO), se calculó la desviación anual centralizada del vector regional. Un valor negativo indica un año seco.

Tabla 2: Vector regional en la región de estudio

	N	Media observada	Media calculada	r	Año	Vector
Chuspipata	6	4130	4102	0.64	95-96	0.937
Huarinilla	7	1839	1837	0.74	96-97	1.087
Chulumani	5	1459	1523	0.94	97-98	0.889
Area Industrial	3	3419	3504	1.00	98-99	0.952
Nogalani	4	2388	2384	0.98	99-00	0.950
					00-01	1.068
					01-02	1.116

N=número de años

La figura 3 muestra las medias cuatrimestrales del índice de oscilación sur (SOI) y la desviación anual centrada sobre el segundo cuatrimestre, para los siete años de estudio. Un SOI fuertemente negativo indica la presencia de El Niño, como es el caso del año 1997-98, que correspondió al Niño más fuerte desde 1982-83. Efectivamente ese año la precipitación estuvo claramente por debajo de la media en la cuenca de Huarinilla. Sin embargo, esa relación no se observa para los otros años: se tienen SOI negativos para los años más lluviosos 1996-97 y 2001-02, aunque en el primer caso el SOI fue positivo durante el primer semestre. El SOI positivo (La Niña) de 1998-99 correspondió a un año ligeramente deficitario en la cuenca. Zeng (1999) encontró una correlación positiva ($r=0.6$) entre la precipitación sobre el conjunto de la Amazonía y el índice SOI, considerando un retraso de 3 meses de la precipitación con respecto al SOI. Sin embargo, al sudoeste de la Amazonía en la cuenca del río Madera, donde se ubica el área de estudio, la correlación es nula e incluso negativa.

La tabla 3 muestra la precipitación anual para cada una de las estaciones. Los números en cursiva indican años con datos corregidos o completados. La estación de Área Industrial

dejó de funcionar en abril de 2000 y la de Nogalani en diciembre de 2001. Para las estaciones de Sanja Pampa, Chucura, Challapampa y Choro sólo se dispuso de un año de información (estas estaciones continúan funcionando). Los datos de la tabla 3 ayudan a explicar las diferencias de comportamiento de la estación de Chuspipata, evidenciadas a través del vector regional. Por ejemplo, el año 1999-00 Chuspipata registró una precipitación casi 10% superior a su promedio del periodo, frente al valor de 0.95 del vector regional (tabla 2).

La tabla 4 muestra los promedios mensuales de precipitación del periodo 1995-00 (5 años) en las primeras cuatro estaciones, así como el promedio del mismo periodo y el de largo plazo (38 años) en Chulumani. La figura 4 muestra la precipitación mensual del periodo 1995-00 como porcentaje del promedio anual.

No se observan diferencias significativas en el comportamiento mensual ni estacional de las cinco estaciones. Existe estacionalidad, pero menos marcada que en otras regiones del país. En promedio, el 54.3% de la precipitación se produce entre diciembre y marzo, el 14.5% entre mayo y agosto y el 31.2% en los restantes cuatro meses, valores que están dentro del rango de registros en la región de los Yungas.

Régimen de precipitación en la cuenca de Huarinilla-Cotapata

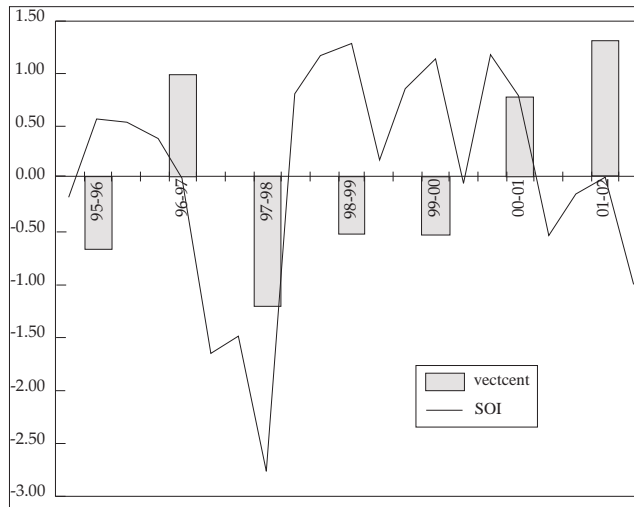


Fig. 3: Desviación del vector anual de precipitación e índice SOI. Fuente: Elaboración propia.

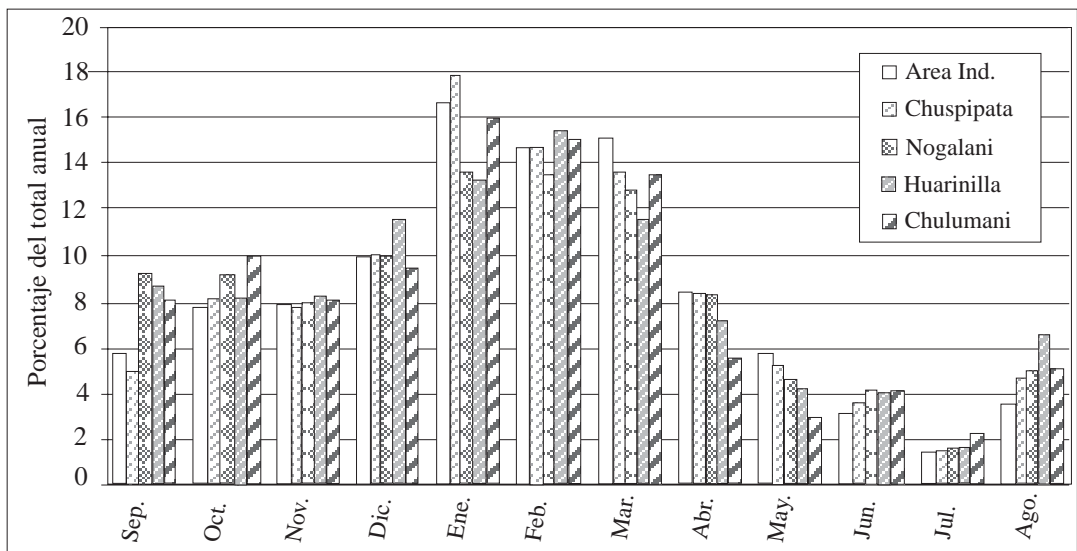


Fig. 4: Precipitación media mensual expresada como porcentaje del total anual.

Tabla 3: Precipitación anual (mm) del área de estudio.

	A. Ind	Chusp	Nogalan	Huarin	Sanja P	Chucura	Challap	Choro	Chulum
1995-96	3334	3528	2474	1969					1316
1996-97	3691	4081	2681	1858	1750	1767	1797	1881	1905
1997-98	3231	3927	2122	1505					1307
1998-99	3088	3682	2088	1718					1476
1999-00	3440	4340	2199	1786					1290
2000-01		4322	2552	1987					
2001-02		4580		2049					
Prom 95-00	3357	3911	2313	1767					1459
Promedio	3357	4066	2353	1807					1459

Fuente: Elaboración propia en base a datos de SNC-Supervisión del proyecto, SENAMHI y ELECTROPAZ , abreviaciones: A. _Ind.= Area industrial; Chusp.= Chuspipata, Huarin.= Huarinilla; Sanja P.= Sanja Pampa; Challap.= Challapampa; Chulum.= Chulumani.

Tabla 4: Precipitación media mensual (mm) del área de estudio.

Estación	Periodo	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Año
Area Ind.	1995-00	196	264	266	340	568	501	519	287	194	104	47	119	3406
Chuspipata	1995-00	193	320	295	395	699	575	535	326	202	137	53	180	3911
Nogalani	1995-00	213	212	183	230	316	314	298	193	106	96	35	117	2313
Huarinilla	1995-00	153	144	145	205	236	272	207	127	72	66	26	116	1767
Chulumani	1995-00	118	147	118	138	233	220	198	80	43	60	32	73	1459
Chulumani	1963-00	101	110	130	186	229	197	161	73	40	35	29	75	1366

Fuente: Elaboración propia en base a datos de SNC-Supervisión del proyecto, SENAMHI y ELECTROPAZ

El mes de menor precipitación es julio y enero el de mayor precipitación, excepto en Huarinilla. Las estaciones de bosque nublado (Chuspipata y Area Industrial) no son menos estacionales que las otras: se observa que Chuspipata registra en enero un porcentaje más alto de la lluvia anual.

La tabla 5 muestra el número medio de días de lluvia durante el periodo de estudio. El total medio anual para la estación de Chuspipata

(267 días) es el más alto registrado en el país, superando incluso a las estaciones del pie de monte en el Chapare, que reciben precipitaciones del orden de 5.000 mm/año. Es también superior a la media de Chulumani (109 días/año), que es muy próxima a la media de 108 días/año estimada por Calle (1999) para la región de los Yungas. A nivel mensual, se observa que en las estaciones de Área Industrial y Chuspipata llueve casi todos los días entre diciembre y

Tabla 5: Número de días de lluvia mensual y anual

Estación	Periodo	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Año
Area Ind.	1995-00	16	20	21	27	27	26	28	23	18	11	8	11	235
Chuspipata	1995-02	18	24	23	29	29	27	29	25	20	14	12	17	267
Nogalani	1995-01	17	16	18	25	24	25	25	19	15	12	7	12	213
Huarinilla	1995-02	13	15	14	19	24	21	21	16	9	9	6	10	177
Chulumani	1965-94	17	15	13	7	4	3	3	6	8	8	9	14	109

Fuente: Elaboración propia en base a datos de SNC-Supervisión del proyecto, Calle (1999).

marzo. El mes con menos días lluviosos, julio, es también el de menor precipitación.

Durante el periodo de estudio, la precipitación máxima registrada en 24 horas fue de 78.5 mm en Área Industrial, 128 mm en Chuspipata, 101.1 mm en Nogalani y 120 mm en Huarinilla. Para Chuspipata se tienen tres registros diarios superiores a 100 mm en siete años, en Huarinilla dos, Nogalani uno y en Área Industrial ninguno. Estos valores muestran que las precipitaciones máximas no son muy intensas en relación a la magnitud de la precipitación anual, lo que es común a la mayor parte de la región de los Yungas (en Chulumani no se tuvieron registros superiores a 100 mm durante el periodo 1965-94). Por contraste, en La Jota, una estación representativa del Chapare donde llueve un promedio de 4.300 mm/año, casi todos los años se tienen uno o más registros superiores a 100 mm/día y la máxima histórica es de 390 mm/día. Valores similares se presentan en Rurrenabaque, Beni, donde sólo llueve 2.200 mm/año.

Discusión

La tabla 3 muestra que el promedio de precipitaciones del periodo 1995-00 en la estación de referencia de Chulumani fue de 1.459 mm, 6.8% superior al promedio interanual del periodo 1962-2000 (38 años), que fue de

1.366 mm. Sin embargo, el comportamiento fue muy diferente en cada uno de esos años. Mientras que en los años 1995-96, 1997-98, 1999-2000 la precipitación estuvo ligeramente por debajo de la media, el año 1998-99 fue húmedo y el año 1996-97 fue el más lluvioso de todo el periodo de funcionamiento de la estación de Chulumani.

Las consideraciones anteriores permiten suponer que los promedios que aparecen en la tabla 3 son superiores a la media de largo plazo en las estaciones de Área Industrial, Chuspipata, Nogalani y Huarinilla. Se puede estimar preliminarmente que la media estaría alrededor de los siguientes valores: 3.150 mm en Área Industrial, 3.650 mm en Chuspipata, 2.150 mm en Nogalani y 1.650 mm en Huarinilla. Aceptando como válido el valor medio obtenido para Chuspipata, se tendría que esta estación registra la mayor precipitación no sólo de la región de los Yungas, sino de toda la cuenca andina del río Beni, ya que hasta ahora los registros más altos eran de 2.750 mm/año. La figura 5 muestra esos valores en relación a la altitud de las estaciones, todas ubicadas sobre la ladera sur. Se observa un incremento de la precipitación con la altitud, con un máximo aparente a los 3.000 m, aunque debe notarse que tanto Chuspipata como Área Industrial están ubicadas sobre la divisoria de cuenca o sea, sobre cumbres.

En las áreas húmedas montañosas de los trópicos y a escala sinóptica, la precipitación se ve favorecida por la ascensión forzada de las masas de aire húmedo y caliente debido al efecto de barrera de la cadena montañosa, lo que provoca que al elevarse y enfriarse, el aire se sature y se produzca condensación (Barry 1992). Bajo este mecanismo, cabe esperar que en la ladera expuesta a los vientos húmedos predominantes (vertiente húmeda), la precipitación se incremente con la altitud, hasta alcanzar un máximo y luego decrecer, si la montaña es suficientemente alta. El máximo de precipitación ($P_{máx}$) coincide con la base nubosa, donde se produce el número y tamaño máximo de las gotas precipitables. Alpert (citado por Barry 1992) estableció una expresión que relaciona la altitud, donde se sitúa ese máximo con el gradiente térmico altitudinal y la altura de la montaña. Para una atmósfera saturada y un gradiente de $6.5^{\circ}\text{C km}^{-1}$, la altitud límite de $P_{máx}$ es de 3.800 m, según su expresión. El decrecimiento posterior de la precipitación se asocia a que el aire más frío a altitudes superiores

retiene menos humedad. En cambio, la ladera opuesta al abrigo del viento, recibe generalmente menos precipitación (efecto de sombra de lluvia). A escala local, se observan otros efectos orográficos de carácter térmico. Por ejemplo, el calentamiento diurno de las laderas provoca un viento ladera arriba durante el día y el enfriamiento nocturno un viento ladera abajo durante la noche. Los vientos en dirección del valle principal tienen un comportamiento similar. Es también frecuente la formación de neblina orográfica a cierta altitud.

La descripción anterior parece corresponder a la ladera sur de la cuenca de Huarinilla, expuesta a los frentes de aire húmedo proveniente del norte y que tiene detrás una cadena montañosa que se extiende de oeste a este, es decir perpendicularmente al flujo regional predominante. Sin embargo, la cadena montañosa que limita la cuenca por el norte es de similar altitud, lo que parece indicar que las masas de aire amazónico la atraviesan manteniendo un contenido de vapor precipitable suficiente para provocar las fuertes

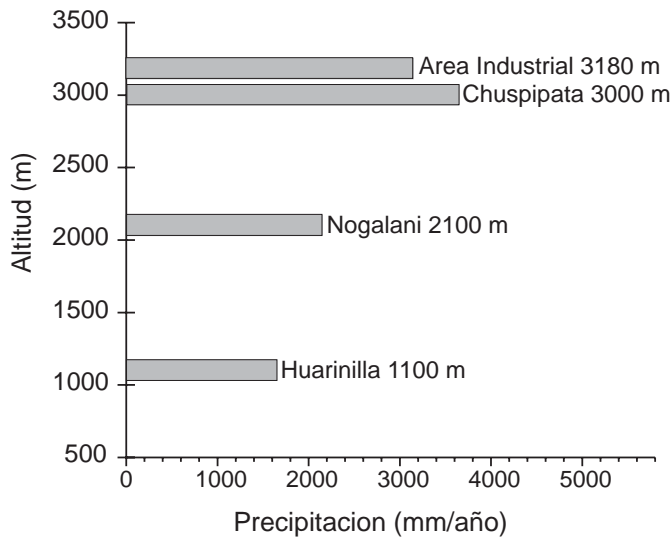


Fig. 5: Gradiente pluviométrico en la ladera sur de la cuenca de Huarinilla.

precipitaciones en la ladera sur de Huarinilla e incluso en el valle del río Unduavi (ver figura 2). El efecto de sombra de lluvia se percibe recién más al sur, en la cuenca del río La Paz, donde las precipitaciones disminuyen a menos de 900 mm/año. Debe también tomarse en cuenta que a 16° S la ladera sur de Huarinilla recibe más radiación solar que la ladera norte, un efecto incrementado por el hecho de que el invierno austral coincide con la estación seca y de menos nubosidad. La presencia de bosque de neblina en la ladera norte de los profundos valles de los ríos Huarinilla y Unduavi indica que la precipitación es de la misma magnitud que en la ladera sur y/o que la evapotranspiración potencial es menor.

La figura 6 muestra la relación precipitación-altitud siguiendo el valle del río principal para el año 1996-97, usando los datos de cuatro estaciones: Huarinilla, Choro, Challapampa y Chucura. A diferencia de la figura 5, no se observa un gradiente altitudinal de precipitación en el rango de 1.100 a 3.555 m de esas estaciones. Se hace notar que: a) los datos corresponden a un solo año hidrológico, que

además fue húmedo; b) la pendiente longitudinal media del valle es del orden del 8%, muy inferior a la transversal de las laderas (25% y más), donde se forman acantilados casi verticales en algunos puntos. A la derecha de la figura 6 se muestra la misma relación en el valle contiguo del río Zongo, situado al oeste de Huarinilla, usando el promedio 1971-98 de nueve estaciones pluviométricas situadas junto al río principal. Se observa que entre 1.400 y 2.700 m, la precipitación varía muy poco de 2.000 mm/año. Los registros más altos de las estaciones de Cahua (1.195 m) y Huaji (945 m), situadas 15 km al norte de la cuenca de Huarinilla, 1 son atribuibles a un efecto orográfico local: entre las dos estaciones el valle sufre un fuerte cambio de dirección y aparece la primera cadena montañosa de más de 4.000 m, en posición casi frontal a la dirección del flujo que sube por ese valle. Por encima de los 3.000 m (estaciones de Botijlaca y Plataforma), se observa un decrecimiento de la precipitación con la altitud. En el valle de Zongo, que sigue una dirección norte/noreste (casi perpendicular a Huarinilla), no se cuentan con

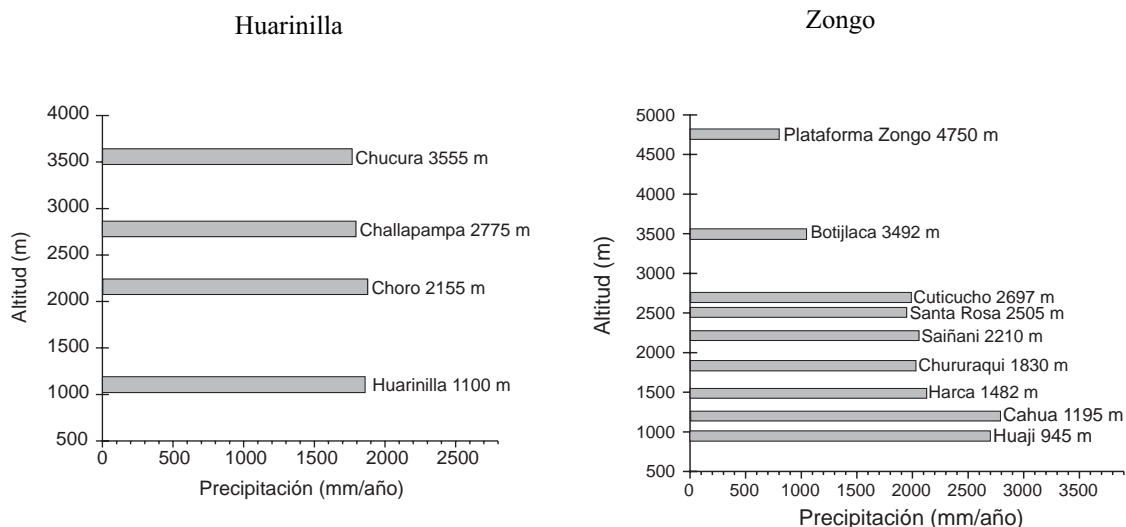


Fig. 6: Gradiente pluviométrico en fondos de valle.

registros que permitan evaluar el comportamiento de la precipitación en dirección transversal al valle. Sin embargo, los datos hidrométricos y de balance hídrico presentados por Caballero (2000) hacen suponer que la precipitación aumenta ladera arriba.

Los registros de algunas estaciones hidrométricas instaladas por Electropaza a partir de diciembre de 1996 en la cuenca del río Chucura ilustran otro problema. Durante el periodo enero-diciembre 1997, en la estación hidrométrica de Challapampa (ver figura 2) sobre el río Chucura, que controla una cuenca de 105 km² de superficie, se midió un volumen de escurrimiento equivalente a una lámina de 2.308 mm. Durante ese mismo periodo, las tres estaciones pluviométricas situadas en esa cuenca (Sanja Pampa, Chucura y Challapampa) registraron una precipitación promedio de solamente 1.587 mm, es decir que aparentemente el escurrimiento superó a la precipitación en aproximadamente 45%. Esta anomalía fue atribuida a posibles problemas en la medición de la precipitación en las tres estaciones pluviométricas. Los datos presentados sugieren que la causa principal es que las estaciones están ubicadas de tal manera que no representan la pluviometría media en la cuenca, al estar ubicadas en fondos de valle, que reciben menos precipitación que las laderas y cumbres adyacentes. También es probable que exista un aporte de agua proveniente de la niebla, que no es registrado por los pluviómetros convencionales (Bruijnzeel & Proctor 1995), además de una posible subestimación en la medición de la precipitación con estos aparatos, especialmente en presencia de viento.

Conclusiones

Los datos presentados muestran que el relieve, extremadamente complejo, de los valles andinos húmedos conocidos como Yungas, influye más que la altitud sobre parámetros climáticos como la circulación del viento,

radiación solar y en particular, precipitación. La orientación de las cadenas montañosas y su disección por valles profundos crea un complejo patrón de facetas en las laderas, con grandes variaciones en la precipitación y otros parámetros climáticos sobre distancias cortas.

Para el área de estudio, se encontró que la precipitación media anual en el bosque nublado de Huarinilla-Cotapata supera los 3.000 mm/año, mientras que en el bosque montañoso yungueño estaría entre los 1.500 y 2.200 mm/año, rango que probablemente también se aplique al páramo yungueño. Los datos de la estación de Nogalani sugieren que, desde el punto de vista de la precipitación, hay una zona de transición entre ecoregiones. Otros datos (número de días de lluvia y precipitaciones máximas en 24 horas) muestran que el régimen de precipitación en las zonas de bosque nublado y bosque yungueño, se caracteriza por lluvias continuas pero no muy intensas. No se pudo establecer una relación clara entre la precipitación anual en la cuenca de Huarinilla y los fenómenos ENSO.

Desde el punto de vista del balance hídrico de cuenca, la información presentada muestra que la ubicación de estaciones pluviométricas en lugares próximos al fondo de los valles lleva a una subestimación de la precipitación en el área de estudio, si se usan los métodos tradicionales de cálculo espacial de ese parámetro. Algo similar ocurre para el conjunto de la cuenca del río Coroico/Huarinilla hasta la estación de Santa Rita de Buenos Aires (4.590 km²), donde la lámina de escurrimiento supera a la precipitación calculada con los datos existentes y esos métodos. Las importantes consecuencias prácticas que de ello se derivan, justifican más investigaciones y la búsqueda de métodos que combinen los datos pluviométricos existentes, con parámetros topográficos derivados de modelos digitales

de elevación y con mapas de vegetación a escala detallada.

Agradecimientos

Al SENAMHI, la supervisión del proyecto Cotapata-Santa Bárbara y los ingenieros Edwin Yujra y Silvia Molina por brindar datos pluviométricos.

Referencias

- Barry, R. 1992. Mountain weather and climate. Londres, Nueva York (2^{da} edición). Editorial Routledge. 402 p.
- Bruijnzeel, L.A. & Proctor, J. 1995. Hydrology and biogeochemistry of tropical montane cloud forests: what do we really know? pp. 38-78. En L.S. Hamilton, J.O. Juvik y F.N. Scatena (eds.). Tropical Montane Cloud Forests. Springer Verlag, New York.
- Calle, S. 1999. Diagnóstico climatológico de los Yungas de La Paz. Tesis de licenciatura, Carrera de Geografía. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz. 115 p.
- Caballero, I. 2000. Modelización de la escorrentía originada por la lluvia y la nieve y Manejo de aguas en contexto de alta montaña tropical. Aplicación al valle alto del río Zongo (Bolivia). Tesis de doctorado en Hidrología, informe sintético. Universidad de Montpellier II. Paris. 133 p.
- Campos, J. 1990. Estudio climatológico de la cuenca andina del río Beni, Tesis de Licenciatura, Carrera de Ingeniería Civil. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz. 204 p.
- Energoprojekt-Electropaz. 1998. Proyecto Coroico, Informe Final, Anexo 1: Hidrología y Sedimentación. La Paz. 100 p.
- Prudencio Claros & Asociados-Centro de Estudios Ecológicos y Desarrollo Integral. 1991. Ampliación y profundización del estudio de evaluación de impacto ambiental de la construcción de la carretera Cotapata-Santa Bárbara, La Paz. 111 p.
- Ribera, O. 1995. Aspectos ecológicos, del uso de la tierra y conservación en el Parque Nacional y Área Natural de Manejo Integrado Cotapata. Documentos, Ecología en Bolivia, Serie Ecología (2): 1-50.
- Zeng, N. 1999. Seasonal cycle and interannual variability in the Amazon hydrological cycle. Journal of Geophysical Research, 104(8): 9097-9106.

Artículo recibido en: Marzo de 2004.

Manejado por: Mónica Moraes

Aceptado en: Mayo de 2005.