

Análisis de Patrones Espaciales de Precipitación en la Provincia de Tungurahua

Marzo 2013

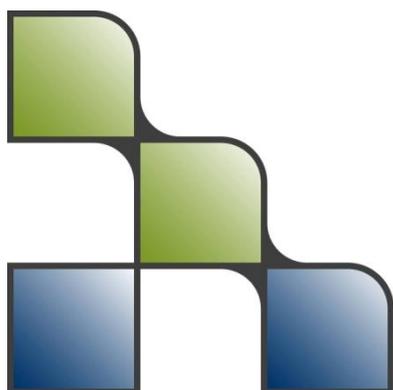
Autores

J.E. Hunink, W.W. Immerzeel, P. Droogers

Ciente

Gobierno Provincial de Tungurahua, Ecuador
Programa de Manejo Ecológico de Cuencas de Aguas y Tungurahua

Informe FutureWater: 125



FutureWater

Costerweg 1V
6702 AA Wageningen
The Netherlands

+31 317 460050

info@futurewater.nl

www.futurewater.nl

Antecedentes

Dentro del Programa de Aguas y Cuencas de Tungurahua, se han contemplado varios proyectos y estudios, orientados a generar información sobre las condiciones hídricas y climáticas de la provincia que permita facilitar la planificación y la toma de decisiones. De tal manera, se está generando información actualizada para promover un análisis completo de los recursos hídricos, considerando la integralidad de las funciones y usos del agua de tal manera que se propicie el acceso equitativo al agua y sus beneficios.

A la misma vez, la provincia de Tungurahua se encuentra en una zona de los Andes, con altos gradientes climáticos y pluviométricos. En general la provincia se enfrenta a un problema de escasez de agua que afecta el desarrollo y las economías de sus habitantes. La disponibilidad del recurso hídrico es altamente variable en tiempo y espacio, lo cual se debe principalmente a la variabilidad de las precipitaciones.

La planificación y la toma de decisiones requieren una mayor precisión a menor escala que las estimaciones existentes del recurso proveniente de la precipitación. Existen actualmente lagunas de datos en las series pluviométricas registradas por las estaciones meteorológicas y falta una red de observación hidro-meteorológica bien establecida. Por lo tanto, para una de las líneas que se está desarrollando dentro del Programa de Aguas y Cuencas de Tungurahua se ha llevado a cabo un análisis detallado de la variabilidad espacial de la precipitación, con el fin de diseñar estrategias adecuadas para la gestión del agua para la agricultura en la provincia.



Resumen

En este estudio se presentan datos de la distribución espacial de las precipitaciones y las tendencias en la provincia de Tungurahua, a partir de un refinamiento de métodos científicamente probados. Se combinaron datos de las estaciones meteorológicas con datos de teledetección para conocer mejor la distribución espacial de la precipitación en las zonas donde se carece de observaciones directas.

La cantidad total de la precipitación en la cuenca varía desde alrededor de 500 mm / año en torno a Ambato hasta 4000 mm en el sureste de la provincia y se concluye que tanto la variabilidad temporal como la espacial son muy significativas. La media anual para toda la provincia oscila entre 1400 y 1700 mm. La zona más seca es también la zona con mayor variabilidad en el tiempo, coincidiendo con la zona principal agrícola. El régimen pluvial permite aquí cultivos de ciclo corto, lo que refleja la situación actual. Los cultivos pluri anuales se producen en las zonas con una mayor precipitación y con menor variabilidad temporal.

El análisis de tendencia muestra que existe en general una tendencia leve a la baja en todos las subcuencas consideradas, con un promedio de casi 40 mm en 10 años. Los meses de junio a septiembre han mostrado una tendencia ligeramente más húmeda durante los últimos 14 años.

La comparación entre las observaciones y los valores obtenidos mediante el método indican una buena correlación. Se ha llevado a cabo una validación cruzada de las salidas del algoritmo para determinar en qué zonas la predicción es mejor o peor. En general se concluye que el método utilizado es muy útil, los resultados son satisfactorios y aplicables en otros lugares.



Tabla de contenidos

1	Introducción	7
2	Metodología	9
2.1	Enfoque	9
2.2	Área de estudio	10
2.3	Datos de entrada	11
2.3.1	Registros de precipitación	11
2.3.2	Productos satelitales de precipitación (TRMM)	11
2.3.3	Modelo digital de terreno (SRTM)	14
2.3.4	Índice de Vegetación (NDVI)	14
2.4	Procedimientos	15
2.4.1	Pre-procesamiento de los datos espaciales	15
2.4.2	Pre-procesamiento de las series temporales	16
2.4.3	Modelos de regresión y predicción	16
2.4.4	Corrección y predicción espacial	17
2.5	Análisis de exactitud y precisión	17
3	Resultados	19
3.1	Series temporales de las observaciones	19
3.2	Análisis de regresión y de precisión	21
3.2.1	Significancia de los variables	21
3.2.2	Variabilidad temporal de los coeficientes	21
3.2.3	Capacidad predictiva y precisión	22
3.3	Evaluación de la predicción espacial	24
3.3.1	Medias anuales	24
3.3.2	Variación temporal	27
3.3.3	Precisión de la salida final	27
3.4	Análisis temporal y de tendencias	30
3.4.1	Evaluación por subcuenca	30
3.4.2	Análisis de tendencias	32
4	Conclusiones	34
5	Recomendaciones	35
5.1	Balance hídrico de zonas agrícolas	35
5.2	Balance hídrico de las sub-cuencas y del páramo	35
5.3	Otras aplicaciones	36
6	Referencias	38
	Apéndice I - Distribución espacial de la precipitación anual y mensual	39
	Medias Anuales	40
	Medias Mensuales	41
	Apéndice II - Entrega de Datos	42
	Series Temporales	42
	Mapas de distribución espacial	43



Tablas

Tabla 1. Características de las estaciones meteorológicas disponibles para el estudio	11
Tabla 2. Los valores faltantes en el periodo 1998-2011 de las observaciones y la comparación con datos TRMM	20
Table 3. Series temporales corregidas y rellenados	42

Figuras

Figura 1 (a) Ejemplo de una interpolación espacial de observaciones en estaciones meteorológicas; (b) Precipitación diaria (1/1/2000) en la zona del estudio según el producto diario de TRMM	9
Figura 2. Ubicación de la provincia de Tungurahua.....	10
Figura 3. Mapa de las estaciones meteorológicas disponibles.....	12
Figura 4. Precipitación anual según el producto TRMM 2b31	13
Figura 5. Modelo Digital de Terreno según SRTM de la provincia.	14
Figure 6. Índice de vegetación (NDVI) medio en base a los capas trimensuales de 1998-2011	15
Figura 7. Diagrama de flujo del algoritmo utilizado	17
Figura 8. La validación cruzada como procedimiento para estimar la capacidad de predicción	18
Figura 9. Porcentaje de datos semanales disponibles durante el período 1998-2011 para cada estación	19
Figura 10. La relación lineal establecida para 4 estaciones entre las observaciones y TRMM para derivar la desviación sistemática (sesgo), y abajo las series temporales correspondientes. Azul indica la parte rellenada, en rojo las observaciones originales y en gris los datos de TRMM.....	20
Figura 11. Niveles de significancia para cada uno de los factores en la regresión para cada semana del año (eje horizontal).	21
Figura 12. Los valores de los coeficientes de los modelos de regresión (ecuación 2) para cada semana del año.	22
Figura 13. Capacidad de predicción de los modelos de regresión, expresada por el coeficiente de determinación (R ²), y calculado con validación cruzada	23
Figura 14. Error cuadrático medio de los modelos de predicción, calculados con validación cruzada (mm / semana).	24
Figura 15. Las precipitaciones anuales en base a los mapas semanales de los 14 años	25
Figura 17. Mapa de isoyetas obtenido del geoportal del Ministerio AGAP - Proyecto MAG / IICA / CLIRSEN (http://geoportal.magap.gob.ec/)	25
Figura 16. Las precipitaciones anuales de un año húmedo 2007 (arriba) y de un año seco 2003 (abajo)	26
Figura 18. Coeficiente de variación basado en la variación semanal de las precipitaciones durante todo el período 1998-2011. El mapa indica las diferencias relativas entre períodos húmedos y secos, onde los valores altos (rojo) significan una gran variación entre períodos húmedos y secos.	27
Figura 19. Subcuencas dentro de la provincia de Tungurahua	30
Figura 20. Diagramas de dispersión que muestran para cada estación meteorológica los valores semanales observadas versus los valores predichos	29



Figura 21. Series temporales de precipitación mensual para cada una de las subcuencas y toda la provincia	30
Figura 22. Medias mensuales de precipitación para cada una de las subcuencas y toda la provincia	31
Figura 23. Comparación de los valores obtenidos para las lluvias mensuales totales en la provincia por medio del método actual, y el promedio los datos de las estaciones meteorológicas.	31
Figura 24. Tendencias en las precipitaciones anuales para cada una de las subcuencas y toda la provincia. Los números representan el cambio promedio anual en mm / año para cada una de las áreas.	32
Figura 25. Tendencias de las precipitaciones mensuales para toda la provincia: el rojo indica una tendencia más seca, verde una tendencia más húmeda. Los números representan el cambio en las precipitaciones durante los últimos 14 años (mes/año).....	32
Figura 26. Promedio de la precipitación semanal para toda la provincia, y las tendencias: colores rojos indican las tendencias secas, verdes las húmedas.....	33



1 Introducción

Los patrones de lluvia pueden ser muy variables en el espacio y en el tiempo, especialmente en las zonas de alta montaña como en los Andes ecuatorianos. Para la toma de decisiones y la planificación hidrológica, la información fiable y precisa es necesaria ya que la precipitación es el motor principal del ciclo hidrológico y los sistemas de producción humanos.

Sin embargo, la estimación precisa de la distribución espacial de la precipitación en zonas extensas y diversas es compleja (por ejemplo Buytaert et al, 2006). En los Andes ecuatorianos las condiciones topográficas son muy variables (altitud, pendiente y aspecto) y causan fuertes gradientes climatológicos, que son difíciles de capturar con mediciones puntuales en las estaciones meteorológicas. Además, en las zonas de alta montaña, la densidad de la red de monitoreo suele ser baja, principalmente debido al difícil acceso a estas zonas montañosas.

Sin embargo, algunos de los problemas de calidad, disponibilidad y cobertura que presentan los pluviómetros no existen en varios productos satelitales de precipitación que se encuentran disponibles actualmente. Las ventajas de estos productos son su consistencia y uniformidad para la estimación de la variabilidad temporal y espacial. Una desventaja es la necesidad de la eliminación del sesgo, utilizando datos de terreno para obtener estimaciones suficientemente exactas para las evaluaciones regionales.

Actualmente hay varios productos de precipitación de satélite disponibles que pueden ser utilizados para los estudios hidrológicos. Estos productos utilizan satélites geoestacionarios ya sea sobre la base de los canales infrarrojos para inferir tasas de precipitación de las temperaturas de la parte superior de las nubes, o satélites de órbita polar que utilizan canales de microondas que pueden proporcionar estimaciones más exactas de la precipitación mediante el monitoreo de la dispersión microondas pasivos dentro de las nubes. El primer tipo sin embargo proporciona mejores resoluciones espaciales, y con una cobertura continua en la región temporal observada. El segundo tipo de satélites pasa por encima de un determinado lugar sólo una vez o dos veces al día, lo que significa que hay lagunas en las series temporales de datos y además por la misma razón es posible que las tormentas de corta duración no se observen.

En las últimas dos décadas, se lanzaron varios satélites y productos de precipitación utilizando la alta resolución temporal de los datos infrarrojos o las estimaciones de alta calidad de microondas o una combinación de ambas. En 1997 se puso en marcha la Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM) (Simpson et al. 1996, Kummerow et al. 1998). El objetivo de la misión TRMM fue proporcionar estimaciones precisas globales de precipitación tropical mediante el uso de una combinación de instrumentos diseñados exclusivamente para la observación de lluvia. Además, los productos se calibran con observaciones de estaciones meteorológicas. Desde entonces, los algoritmos TRMM y productos han sido continuamente mejorados.

La creciente cantidad de datos de sensores remotos disponibles para la precipitación, además de otras variables biofísicas relacionadas, como los índices de vegetación y la altitud, ofrecen la oportunidad de llegar a estimaciones más detalladas y precisas de precipitación. Un enfoque innovador, combinando estas fuentes de información con las observaciones terrestres permite la estimación precisa de los patrones de precipitación y su variabilidad espacial temporal.



La provincia de Tungurahua se encuentra en una zona de los Andes con altos gradientes climáticos y pluviométricos. En general, la provincia se enfrenta a un problema de escasez de agua que afecta el desarrollo y las economías de sus habitantes. La disponibilidad del recurso hídrico es altamente variable en tiempo y espacio, lo cual se debe principalmente a la variabilidad de las precipitaciones.

Dentro del Programa de Aguas y Cuencas de Tungurahua, se han contemplado varios proyectos y estudios orientados a generar información sobre las condiciones hídricas y climáticas de la provincia que permita facilitar la planificación y la toma de decisiones. De tal manera, se está generando información actualizada para promover un análisis integral de los recursos hídricos, es decir, considerando la integralidad de las funciones y usos del agua de tal manera que se propicie el acceso equitativo al agua y sus beneficios.

El objetivo de este proyecto es rellenar las lagunas de datos en las series pluviométricas registradas por las estaciones meteorológicas aprovechando las ventajas que ofrecen los actuales productos satelitales de precipitación, y hacer un análisis detallado de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación utilizando diferentes datos de teledetección. El resultado principal de este análisis es la obtención de la distribución de precipitación para cada semana del periodo del estudio. Esto servirá para la toma de decisiones y diseñar estrategias adecuadas para la gestión del agua y para la agricultura de la provincia



2 Metodología

2.1 Enfoque

Las recientes mejoras en los productos de precipitación de la misión satelital TRMM ofrece la oportunidad de obtener información más precisa sobre los patrones de lluvia espaciales. La combinación de diferentes productos de TRMM, otros conjuntos de datos de teledetección con una resolución más alta, y observaciones de estaciones meteorológicas, permite la generación de estimaciones espaciales y temporales más fiables de las precipitaciones sobre zonas extensas y diversas. Esto representa una ventaja comparado con métodos de interpolación espacial (Figura 1a), ya que sigue siendo una tarea difícil representar de forma adecuada el comportamiento físico de la precipitación en zonas como en los Andes de Ecuador.

Uno de los productos claves de TRMM proporciona precipitación diaria con una resolución relativamente baja de 0,25 x 0,25 grados (aproximadamente 25 x 25 km, Figura 1b). Estos datos se pueden combinar con conjuntos de datos de índice de vegetación, climatología y altitud, que sirven para inferir y recrear (*“proxy”*) registros de la precipitación. De esta forma se ha mejorado un algoritmo basado en métodos científicos para aplicarlo a la provincia de Tungurahua con el fin de: (i) corregir y rellenar lagunas de datos en las observaciones de precipitación con datos TRMM y (ii) obtener mapas de precipitaciones semanales de la región, con una resolución espacial de 1x1 km. Estos algoritmos están basados en publicaciones de diversos artículos científicos e informes (Immerzeel et al, 2009;. Quiroz et al, 2010;. Immerzeel et al, 2012.).

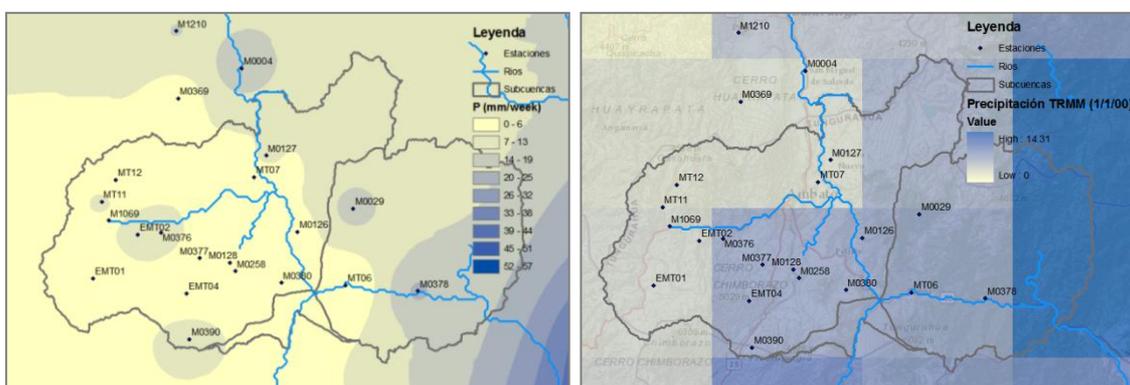


Figura 1 (a) Ejemplo de una interpolación espacial de observaciones en estaciones meteorológicas; (b) Precipitación diaria (1/1/2000) en la zona del estudio según el producto diario de TRMM

La base de estos algoritmos es: (i) la combinación de datos TRMM de resolución espacial baja, pero de alta resolución temporal (todos los días, km 25x25) con datos TRMM de resolución espacial alta, pero temporal baja (mensual, 4x4 km), (ii) la corrección de TRMM con las observaciones (iii) el uso del NDVI (índice de vegetación) para mejorar la resolución espacial hasta 1x1 km, (iv) el uso del modelo digital de terreno para la corrección de efectos de altura. En los próximos apartados se aportan más detalles sobre los conjuntos de datos de entrada usados y los procedimientos aplicados.



2.2 Área de estudio

La Provincia de Tungurahua se encuentra en la parte central del Ecuador y en el centro de la región Interandina, entre altitudes de 1200 a 5000 metros sobre el nivel del mar (Figura 2). El terreno tiene una topografía muy irregular. El paisaje se compone de volcanes, montañas, llanuras y valles, donde la principal actividad económica es la producción agrícola y la ganadería. La provincia pertenece a la hoya oriental del río Patate también conocida como la hoya Latacunga-Ambato. La provincia de Tungurahua tiene una superficie de 3389 km².

El clima es predominantemente seco y templado. Tungurahua tiene una serie de micro-climas: zonas pequeñas con sus propias condiciones climáticas. La temperatura promedio es de alrededor de 14 grados centígrados pero a mayor altitud las condiciones son mucho más frías: las montañas como Carihuairazo y Chimborazo están cubiertas de nieve durante gran parte del año.



Figura 2. Ubicación de la provincia de Tungurahua

La agricultura es la principal actividad económica de la región, con la participación de alrededor de 40 por ciento de la población. Alrededor del 50 por ciento de la tierra está dedicada a la agricultura. Debido a la variabilidad de las condiciones biofísicas de la zona, existe una amplia gama de productos agrícolas y una gran cantidad de frutas, verduras y granos. La mayor parte de la producción nacional de fruta fresca proviene de Tungurahua.



2.3 Datos de entrada

El mapeo de precipitación se basa en los siguientes conjuntos de datos:

- Registros de precipitación de las estaciones meteorológicas
- Estimaciones espaciales diarias de precipitación de TRMM
- Precipitaciones mensuales obtenidas de TRMM
- Modelo Digital de Elevación obtenido de SRTM
- Índice de vegetación NDVI derivado del SPOT

2.3.1 Registros de precipitación

Como entrada principal del algoritmo se han utilizado los datos de las estaciones disponibles (31 estaciones en total) dentro y en los alrededores de la zona de estudio de la precipitación diaria observada. La mitad de ellos (15) se encuentran dentro de la provincia de Tungurahua (Figura 3). En la Tabla 1 se resumen sus características. La gran mayoría de las estaciones ofrecen como datos mas recientes los de finales de 2011.

Tabla 1. Características de las estaciones meteorológicas disponibles para el estudio

Código	Nombre	Disponibilidad		Latitud	Longitud	Altitud
		Desde	Hasta			
EMT01	Cunagyacu	2011	2011	-78,847	-1,379	3991
EMT02	Tamboloma	2011	2011	-78,771	-1,305	3543
EMT04	Pampas de Salasaca	2011	2011	-78,689	-1,406	3691
M0004	Rumipamba	1976	2011	-78,595	-1,020	2657
M0008	Puyo	1964	2011	-77,944	-1,507	957
M0029	Baños Col. A. J. Sucre	1964	2011	-78,405	-1,260	3048
M0041	Sangay (P.Santa Ana)	1964	2011	-77,950	-1,693	876
M0120	Cotopaxi-Clirsen	1964	2011	-78,581	-0,623	3547
M0121	El Refugio	1973	2000	-78,578	-0,659	3409
M0126	Patate	1964	2011	-78,500	-1,300	2442
M0127	Pillaro Colegio J. Alvarez	1964	2011	-78,553	-1,169	2781
M0128	Pedro Fermín Cevallos	1978	2011	-78,615	-1,352	2897
M0133	Guaslan	1964	2011	-78,661	-1,721	2834
M0258	Querochaca	1979	2011	-78,606	-1,367	2863
M0369	Cusubamba	1964	2011	-78,703	-1,071	3181
M0371	Pastocalle	1964	2011	-78,627	-0,722	3102
M0375	Saquisilí	1979	2011	-78,663	-0,835	2920
M0376	Pilahuin	1964	2011	-78,732	-1,302	3354
M0377	Tisaleo	1964	2011	-78,666	-1,345	3239
M0378	Rio Verde	1965	2011	-78,295	-1,401	1589
M0380	Huambalo	1964	2011	-78,527	-1,387	2724
M0390	Urbina	1964	2011	-78,683	-1,483	3729
M0393	San Juan-Chimborazo	1964	2011	-78,793	-1,626	3243
M0395	Cebadas	1964	2011	-78,641	-1,908	3016
M0396	Alao	1964	2011	-78,483	-1,883	3373
M0407	Licto	1975	2011	-78,600	-1,806	2801
M0408	Guano	1979	2011	-78,620	-1,605	2681
M1069	Calamaca	1988	2011	-78,821	-1,281	3417
M1210	Pujilí	2007	2009	-78,706	-0,957	2973
MT11	Mula Corral	2009	2012	-78,833	-1,248	3546
MT12	Chiquihurco	2009	2012	-78,809	-1,211	4021

2.3.2 Productos satelitales de precipitación (TRMM)

La Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM) es una conjunción de exploración espacial entre la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa (JAXA). La misión del satélite se centra en proporcionar datos sobre la precipitación tropical y subtropical y estimar su calor latente asociado. TRMM está operativo desde noviembre de 1997 y empezó a proveer los diferentes productos desde 1998. Actualmente se utilizan los productos de TRMM para muchos servicios y productos operacionales. A pesar de ciertas limitaciones, muchos



autores han destacado la utilidad de los datos del TRMM para las evaluaciones de los recursos hídricos (por ejemplo, Su et al, 2008; Scheel et al, 2011). Los datos pueden ser descargados en la siguiente dirección: <http://mirador.gsfc.nasa.gov/>.

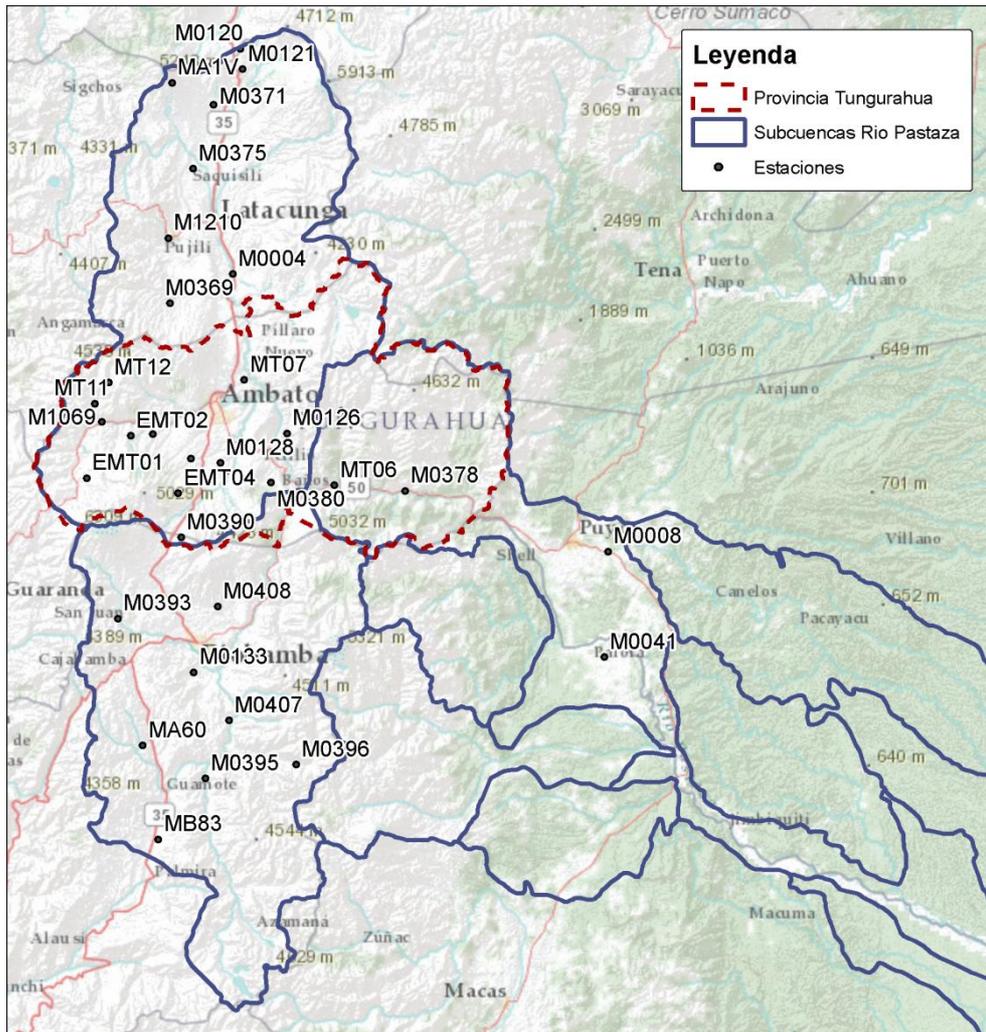


Figura 3. Mapa de las estaciones meteorológicas disponibles

Los instrumentos de medición de la precipitación en el satélite TRMM incluyen el radar de precipitación (PR), un radar de escaneo electrónico a 13,8 GHz; Imágenes por Microondas (TMI), n sensor de microondas pasivo diseñado para dar información cuantitativa de lluvias; y un escáner del visible y del infrarrojo (VIRS), con cinco canales del visible y infrarrojo.

El desarrollo de productos TRMM ha pasado por varias fases. Continuamente se implementan mejoras para obtener productos más fiables con mayor precisión. Recientemente (finales de 2011), salió una versión más actualizada de la serie de productos del TRMM (versión 7). Esta versión proporciona estimaciones más precisas de precipitación, teniendo en cuenta los diferentes regímenes de lluvia que puedan ocurrir. En esta versión se han eliminado algunas de las limitaciones anteriores del producto, como la sobreestimación de las precipitaciones en sistemas convectivos y la subestimación de la lluvia caliente, así como las anomalías asociadas con la detección “lluvia / no lluvia” (Huffman 1997, Hong et al 2006).

A pesar de estas mejoras, la eliminación de sesgos y la verificación con datos de tierra sigue siendo necesaria cuando se utilizan productos TRMM para estimaciones regionales. Los



2.3.3 Modelo digital de terreno (SRTM)

Se utiliza un modelo digital de elevación (DEM) para asegurar que los efectos topográficos en los patrones de precipitación pueden ser reflejados. La Misión topográfica Radar Shuttle (SRTM) de la NASA ha generado una completa base de cartas topográficas digitales de alta resolución de la Tierra. Estos datos se distribuyen actualmente por el USGS y están disponible para su descarga. Los datos SRTM están disponibles con una resolución espacial de 3 segundos de arco (90m aprox.) DEM. El error vertical del producto es menos de 16 metros. SRTM es actualmente el estándar para estudios en zonas extensas o estudios globales. Para este producto específico se han remuestreado los datos SRTM a una malla de 1x1 km. Más detalles sobre SRTM se pueden encontrar en: <http://srtm.usgs.gov/>

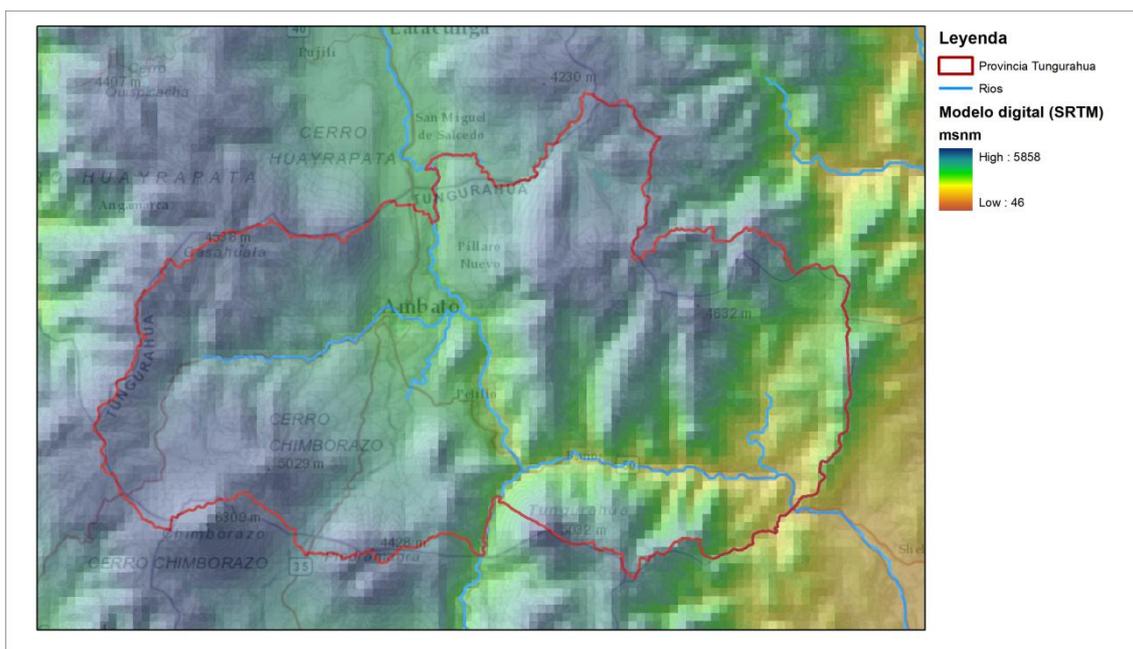


Figura 5. Modelo Digital de Terreno según SRTM de la provincia.

2.3.4 Índice de Vegetación (NDVI)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se utiliza para mejorar la resolución espacial de la precipitación del producto final, y como sustituto de la variabilidad espacial de la precipitación (por ejemplo Immerzeel et al, 2009; Immerzeel et al, 2012). Los productos NDVI provenientes del satélite francés SPOT pueden ser considerados como los mejor validados a esta escala. SPOT consiste en dos instrumentos de observación en órbita, VEGETACION 1 y 2 VEGETACIÓN, así como varias infraestructuras terrestres. El primero de los dos instrumentos en órbita a bordo del satélite SPOT 4, se lanzó el 24 de marzo de 1998. La segunda es a bordo de SPOT 5, que fue puesto en órbita el 4 de mayo de 2002. Los datos están disponibles en la dirección <http://free.vgt.vito.be/>.

El producto VGT-S10 (síntesis de diez días) es un producto trimensual compuesto, comparando todos los segmentos de este período para escoger los "mejores" valores de reflectancia del suelo. Estos productos proporcionan datos de todas las bandas espectrales NDVI, y auxiliares de adquisición de datos de imágenes de parámetros. Los productos compuestos S10 (datos espectrales, la capa de datos de calidad y NDVI) se descargan del organismo VITO, Bélgica. Desde los datos individuales compuestos de NDVI para cada período se extrae del archivo S10-HDF para su post-procesamiento. Los pasos del post-procesamiento



2.4.2 Pre-procesamiento de las series temporales

Los registros de precipitación observados (OBS) requieren un control de calidad, para detectar valores atípicos y evaluar las brechas de datos. Este control de calidad se ha realizado estudiando las series temporales una por una para identificar posibles anomalías. Los valores detectados como erróneos se han eliminado del análisis para ser incluidos en el proceso del relleno de huecos.

Las lagunas en los datos se rellenaron mediante el establecimiento de una relación lineal entre los valores de TRMM (3b42) y las observaciones diarias en cada ubicación de las estaciones meteorológicas. Esto se hizo mediante la estimación de la desviación sistemática, es decir, el sesgo, tal y como se resume en la siguiente fórmula:

$$OBS_i = K * TRMM_i \quad (1)$$

con OBS_i mensuales lluvia observada en pluviómetros i , K el coeficiente del sesgo, y $TRMM_i$ la precipitación mensual del TRMM en la ubicación del pluviómetro i . En el apartado 3.1. de los resultados se encuentran los valores obtenidos de este coeficiente del sesgo.

También para los otros conjuntos de datos espaciales (TRMM 2b31, DEM y NDVI), los valores fueron extraídos en las ubicaciones de las estaciones meteorológicas. La serie temporal del NDVI se interpoló temporalmente, para obtener unas series semanales para todo el período. También los valores extraídos de la base de datos TRMM 2b31 se desagregaron a una serie semanal.

2.4.3 Modelos de regresión y predicción

A continuación se describe la aplicación del análisis de regresión con el objetivo de establecer las relaciones entre las variables anteriormente descritas. Basándose en todas las observaciones y datos en los puntos de las estaciones meteorológicas, se establecen los modelos de regresión a nivel semanal. Las variables independientes de la regresión en este caso son los conjuntos de datos DEM (modelo digital de terreno), CLIM (precipitación media mensual basado en TRMM 2b31) y NDVI (índice de vegetación), para cada estación y cada semana de los 14 años.

Los modelos de regresión lineal obtenidos se establecieron de la siguiente manera:

$$PCP_j = a + b * DEM + c * CLIM_j + d * NDVI_{j+1} \quad (2)$$

En la que a , b , c y d son los coeficientes de ajuste de la regresión, y j es el número de semanas en el año (por lo que resulta en un total de 52 ecuaciones de regresión, cada uno basado en 392 puntos de datos (28 estaciones x 14 años)). Para NDVI, se confirmó que la respuesta vegetativa una semana más tarde se correlaciona mejor con la precipitación de la NDVI de la misma semana. Por lo tanto se establecieron los modelos de regresión con el valor del NDVI de la semana posterior ($j+1$ en la ecuación 2).

Ya establecidos los modelos de regresión para cada semana, el siguiente paso fue aplicar estos modelos a los conjuntos de datos espaciales. Para ello se cargaron las capas de las 3 variables de entrada (NDVI, CLIM o TRMM 2b31, y DEM) en un software SIG y se calculó una capa para cada semana de los 14 años que representa la precipitación predicha.



2.4.4 Corrección y predicción espacial

Obviamente las predicciones de los modelos de regresión sólo explican parte de la variación en las precipitaciones. Para garantizar el mejor resultado posible, se derivan posteriormente los residuales (precipitación predicha por el modelo de regresión menos el valor observado) para cada estación. De la misma manera que en otros algoritmos similares en la literatura científica, estos residuos se interpolan espacialmente (método *spline*). Como resultado obtenemos una capa para cada semana del periodo que se añade a las capas predichas por los modelos de regresión. La suma de ambas es por lo tanto la salida final, resultando en una estimación de la distribución de la precipitación para cada semana del periodo de 14 años. Para este resultado final se asegura un ajuste óptimo en cada punto de observación, mientras que para las zonas sin observaciones se ha tomado en cuenta la variabilidad espacial causada por las condiciones locales (topografía, vegetación y climatología).

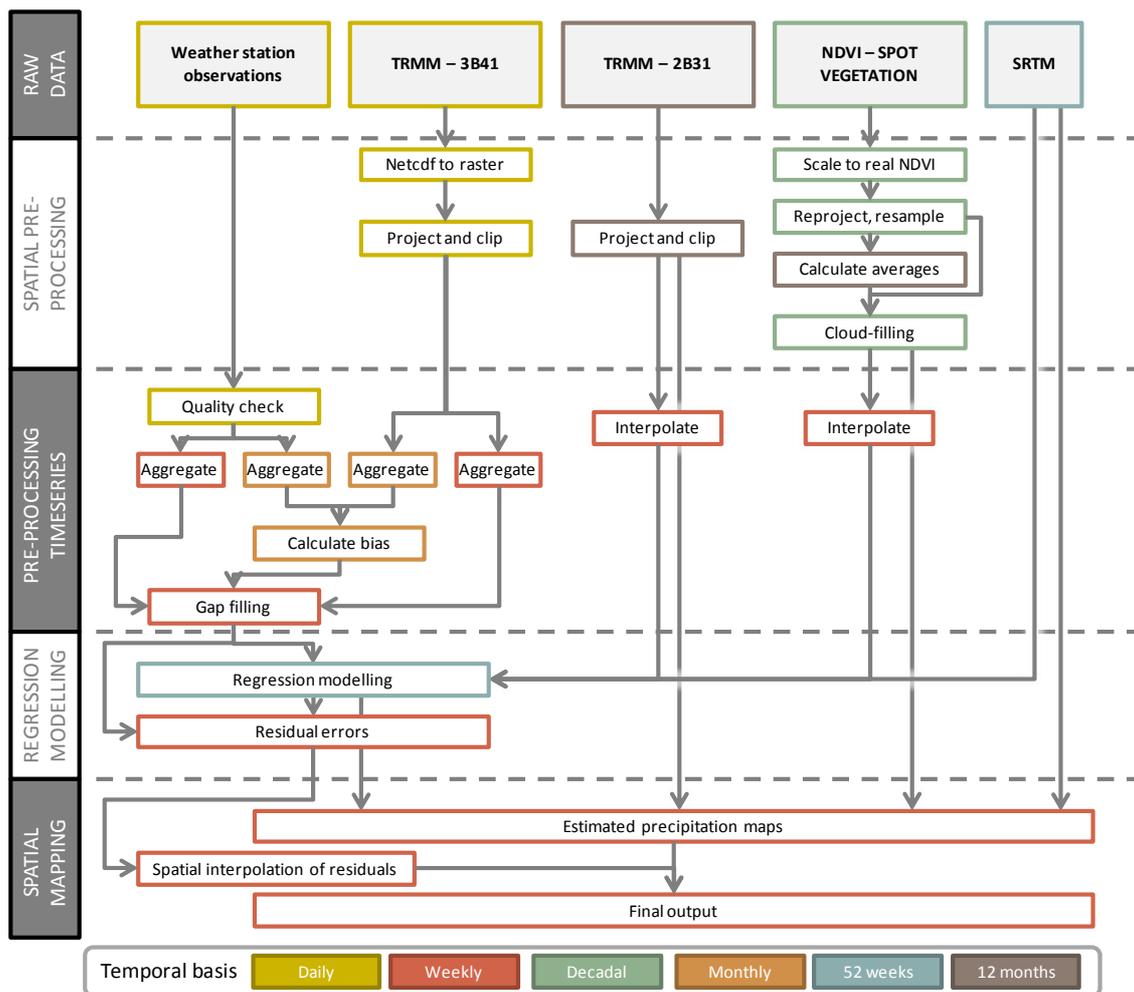


Figura 7. Diagrama de flujo del algoritmo utilizado

2.5 Análisis de exactitud y precisión

Un componente principal del algoritmo es el análisis de regresión en el que se establece una relación entre los tres conjuntos de datos de entrada y la precipitación. Este procedimiento de regresión sin embargo no proporciona una buena estimación de la precisión de la predicción: los estadísticos del ajuste del modelo explican bien como el modelo describe los datos, pero no



lo bien que reproduce los datos observados. Además, en general, las medidas de bondad de ajuste de modelos de regresión sobrestiman la capacidad de predicción. En efecto, la validación cruzada es un método útil para obtener una estimación más fiable de la capacidad de predicción en cada punto.

La validación cruzada consiste en retirar secuencialmente una de las estaciones y predecir su valor basado en el modelo creado por las otras estaciones. En este caso implica el uso de todos los datos de una sola estación meteorológica extraída del conjunto de datos como los datos de validación, y las observaciones restantes como los datos de entrenamiento. Esto se repite de manera que cada observación en la muestra se utiliza una vez como datos de validación (ilustrado en Figura 8).



Figura 8. La validación cruzada como procedimiento para estimar la capacidad de predicción

Por medio de este procedimiento se obtiene una estimación de la capacidad de predicción para cada una de las estaciones. Esta estimación puede ser representada espacialmente e interpolada para obtener una indicación de la precisión espacial de la salida de los modelos de regresión. Se ha de mencionar, sin embargo, que las salidas finales se han construido utilizando los datos de todas las estaciones para garantizar el mejor producto. Los modelos se han evaluado mediante el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE).



3.1 Series temporales de las observaciones

Los registros de precipitación observadas fueron sometidos a un control de calidad, para detectar valores atípicos en el conjunto de datos. Además, como es habitual, la mayoría de las estaciones contenían valores faltantes. La Figura 9 muestra visualmente la integridad (días con valores válidos dividido por el total de días) de las series de datos. Esta información también está representada en Tabla 2 para cada una de las estaciones con un mínimo del 10% de valores válidos.

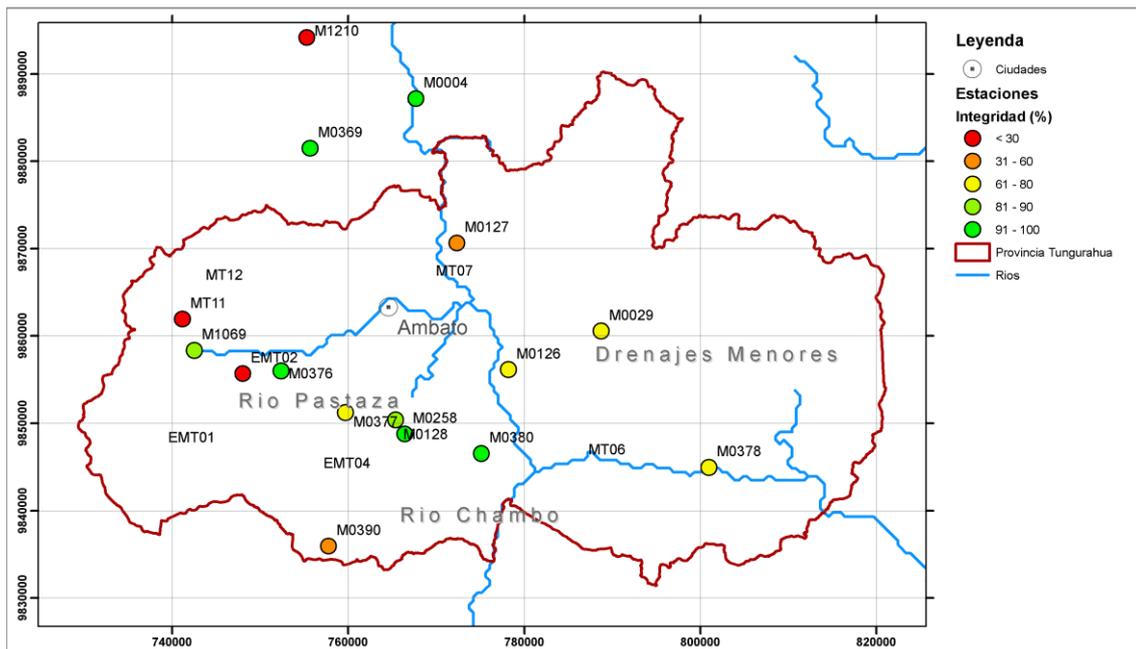


Figura 9. Porcentaje de datos semanales disponibles durante el período 1998-2011 para cada estación

Los valores faltantes fueron rellenados derivando la desviación sistemática (sesgo) con las observaciones de TRMM en cada ubicación (ver Tabla 2), como se explica en la sección metodológica. Figura 10 muestra un ejemplo de 4 de las estaciones en las que en la parte superior se determina la relación lineal para derivar el factor de sesgo en base a las cantidades de lluvia mensuales.



Tabla 2. Los valores faltantes en el periodo 1998-2011 de las observaciones y la comparación con datos TRMM

Código Estación	Nº de valores faltantes	Integridad (%)	Sesgo	R cuadrado
M0004	8	99	0,46	0,82
M0008	11	98	1,35	0,99
M0029	159	78	0,83	0,79
M0041	139	81	1,20	0,95
M0120	147	80	0,87	0,87
M0121	606	17	0,60	0,85
M0126	232	68	0,49	0,69
M0127	342	53	0,33	0,63
M0128	95	87	0,43	0,80
M0133	236	68	0,54	0,69
M0258	2	100	0,45	0,87
M0369	20	97	0,47	0,80
M0371	201	72	0,62	0,81
M0375	24	97	0,66	0,82
M0376	31	96	0,55	0,89
M0377	211	71	0,57	0,87
M0378	240	67	1,27	0,82
M0380	13	98	0,53	0,82
M0390	396	46	0,77	0,89
M0393	11	98	0,52	0,68
M0395	59	92	0,57	0,75
M0396	92	87	0,70	0,80
M0407	254	65	0,54	0,81
M0408	65	91	0,37	0,76
M1069	133	82	0,50	0,77
M1210	634	13	0,43	0,83
MT11	600	18	0,34	0,67

Este procedimiento resultó en series temporales semanales consistentes y homogéneas (es decir, verificadas, rellenadas y corregidas frente a posibles errores), de las observaciones provenientes de las estaciones meteorológicas (como abajo en Figura 10). Estas series temporales se incluyen como anexo en este informe. Existe una coincidencia razonablemente buena entre TRMM y OBS, pero existen sesgos importantes, ya que TRMM generalmente sobreestima la precipitación en esta zona.

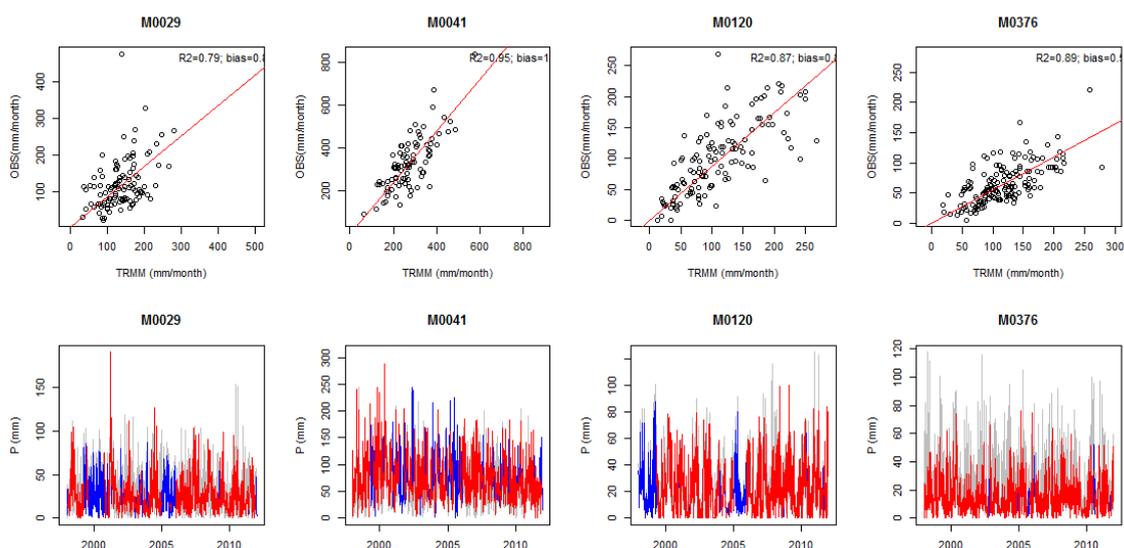


Figura 10. La relación lineal establecida para 4 estaciones entre las observaciones y TRMM para derivar la desviación sistemática (sesgo), y abajo las series temporales correspondientes. Azul indica la parte rellenada, en rojo las observaciones originales y en gris los datos de TRMM.



3.2 Análisis de regresión y de precisión

3.2.1 Significancia de los variables

La regresión lineal realizada para cada semana del año resultó en 52 modelos de regresión que relacionan la altura (DEM), índice de vegetación (NDVI) y la tasa promedio de precipitación mensual (CLIM), con precipitación semanal (OBS). El R2 de los modelos obtenidos varía entre 0,23 y 0,56, con un promedio de 0,40, lo que indica un ajuste razonable. En promedio 40% de la varianza de la precipitación se explica por los modelos de regresión obtenidos. La raíz cuadrada del error medio (RMSE) de los 52 modelos varía entre 14 y 32 mm/semana. Si los valores de la RMSE se normalizan (es decir, se divide por la diferencia entre el máximo y el mínimo de los valores observados) se obtiene un error relativo (RMSE normalizado) de un 11%.

Para la función de regresión se ajustan 4 coeficientes, como en la ecuación 2. La Figura 11 muestra los niveles de significación de cada uno de los factores. Estos niveles fueron establecidos en función de los *valores p* de los coeficientes resultantes. Como ejemplo, un valor p de 5% significa que hay una probabilidad del 5% de que el coeficiente de ese componente en la relación surgió al azar y un 95% de probabilidad de que la relación es real. La Figura 11 demuestra los niveles de significancia, utilizando los siguientes tramos:

- > 10%: 0
- 5% – 10%: 1
- 1% - 5%: 2
- < 1%: 3

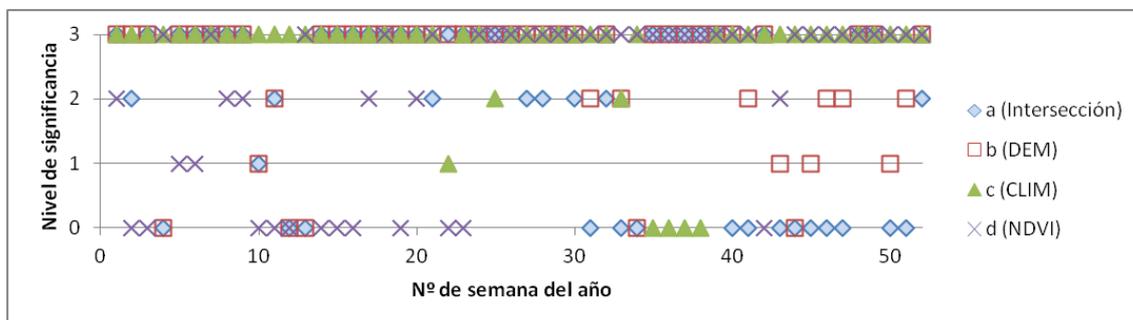


Figura 11. Niveles de significancia para cada uno de los factores en la regresión para cada semana del año (eje horizontal).

Estos resultados muestran que NDVI tiene el mayor poder predictivo en general, lo que parece lógico ya que el NDVI es el único predictor que varía en el tiempo y por lo tanto puede capturar mejor la variabilidad. La DEM es constante para una ubicación y CLIM tiene una variación mensual, cuyos se repiten todos los años.

3.2.2 Variabilidad temporal de los coeficientes

Los siguientes gráficos de la Figura 12 muestran el valor de los coeficientes b, c, d (de DEM, CLIM y NDVI), para todos los modelos obtenidos para cada semana del año. Como se puede observar existen algunas tendencias claras: el coeficiente de DEM es menor entre las semanas 15 y 25, y el coeficiente de CLIM es mayor alrededor de la semana 3, alrededor de la semana



12 (principios de abril) y alrededor de la semana 42. Además, el coeficiente de NDVI es generalmente más alto en la segunda mitad del año, que en la primera mitad. La relación entre el NDVI y CLIM es positiva, por ejemplo, un alto valor de NDVI se corresponde con altas precipitaciones. Generalmente el coeficiente que corresponde con la altitud es negativa, es decir la precipitación en general disminuye con la altitud.

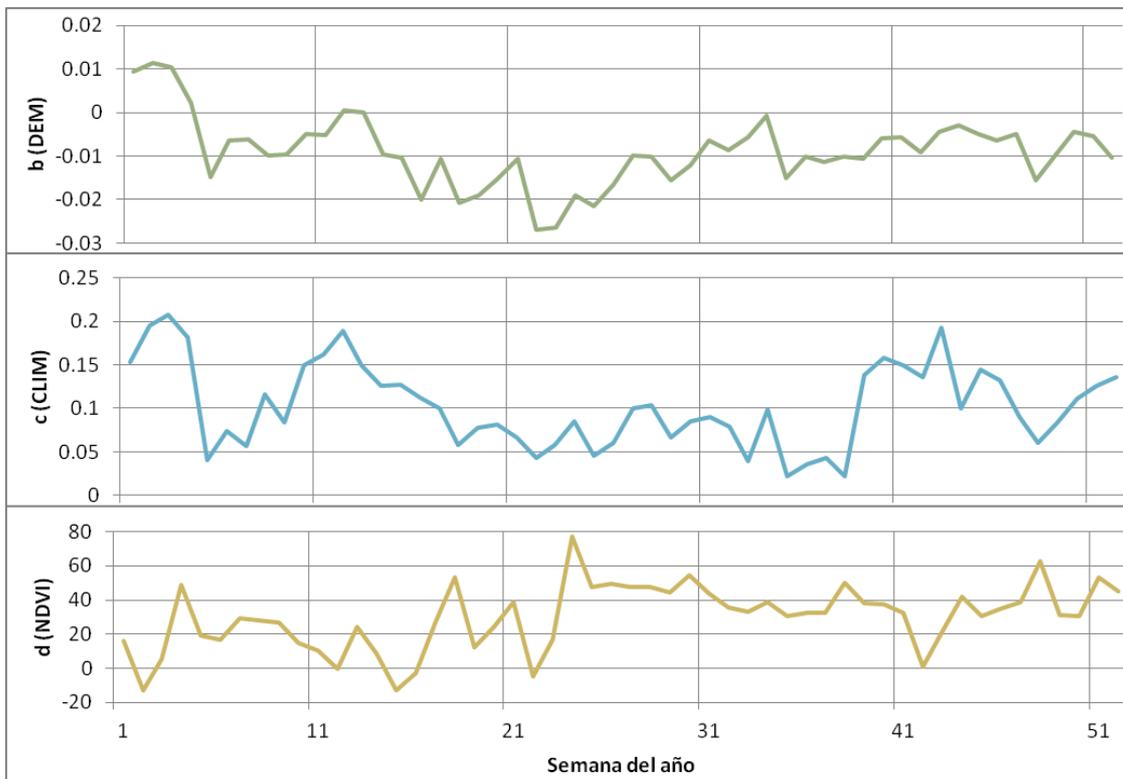


Figura 12. Los valores de los coeficientes de los modelos de regresión (ecuación 2) para cada semana del año.

3.2.3 Capacidad predictiva y precisión

La capacidad de predicción del modelo se ha estudiado a fondo mediante el uso de validación cruzada, como se explica en la sección metodológica. El R2 obtenido quitando de forma secuencial una estación del ajuste de los modelos, se ha trazado e interpolado (método *Spline*) y como se ve reflejado en el mapa de la Figura 13. Esto da una indicación de la precisión relativa de la salida final en toda la zona y la capacidad de predicción del procedimiento. El R2 promedio de todas las estaciones es de 0,75, en base a las precipitaciones mensuales. Esto indica que el método es capaz de predecir suficientemente bien las precipitaciones en base al método y los variables elegidos.



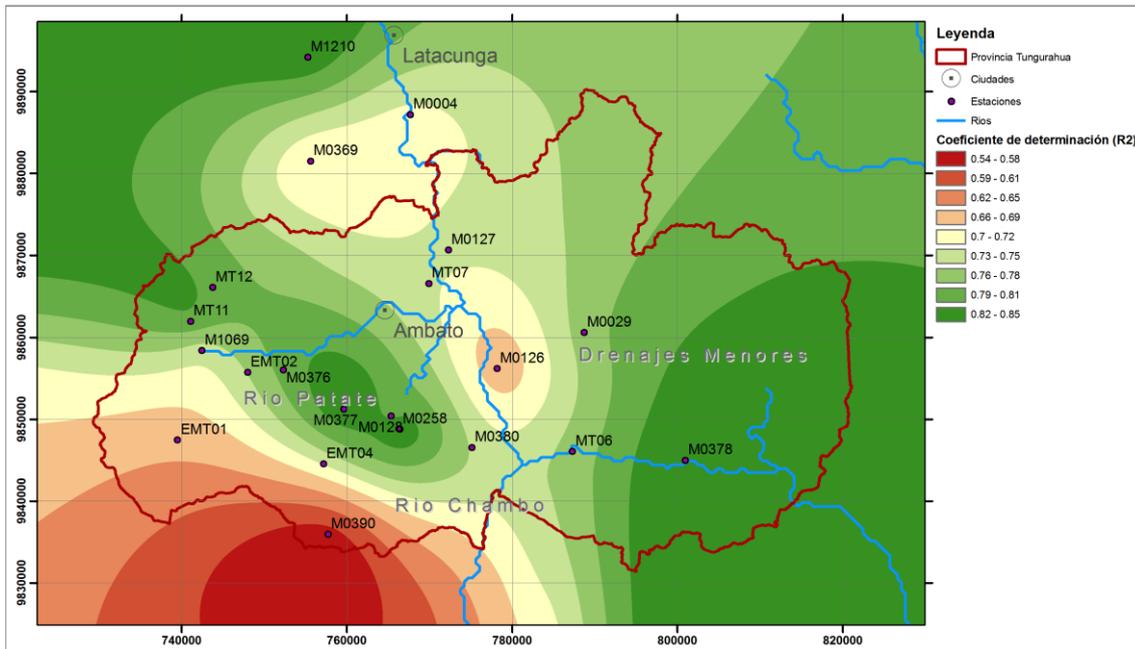


Figura 13. Capacidad de predicción de los modelos de regresión, expresada por el coeficiente de determinación (R²), y calculado con validación cruzada

Es evidente que las zonas cerca de Ambato, que reciben la menor cantidad de lluvia (véase la sección siguiente) muestran una menor capacidad predictiva, debido a la mayor variabilidad temporal en estas áreas. Por otro lado, la precisión de la predicción es mayor en las zonas donde existe una alta densidad de estaciones. En el suroeste de la provincia (zona del arenal entre el Chimborazo y Piedramagra) la precisión es menor, debido a las características peculiares de esa zona y la baja densidad de estaciones. Por otro lado las precipitaciones en las zonas más húmedas de la provincia se predicen con mayor precisión.

La siguiente Figura 14 muestra el error cuadrático medio (RMSE) espacialmente interpolado para cada estación, también obtenido por medio del procedimiento de validación cruzada. Esto da una indicación de cómo el modelo de predicción se desvía de su valor real y de la incertidumbre en la estimación. Como se puede observar y como es de esperar, existe un aumento en el RMSE (mm/semana) con la precipitación creciente (véase la sección siguiente) hacia el este.

El siguiente paso es la aplicación de los modelos de regresión obtenidos a los conjuntos de datos espaciales (DEM, CLIM y NDVI) para obtener una predicción espacial de la precipitación para cada semana en el período de 14 años.

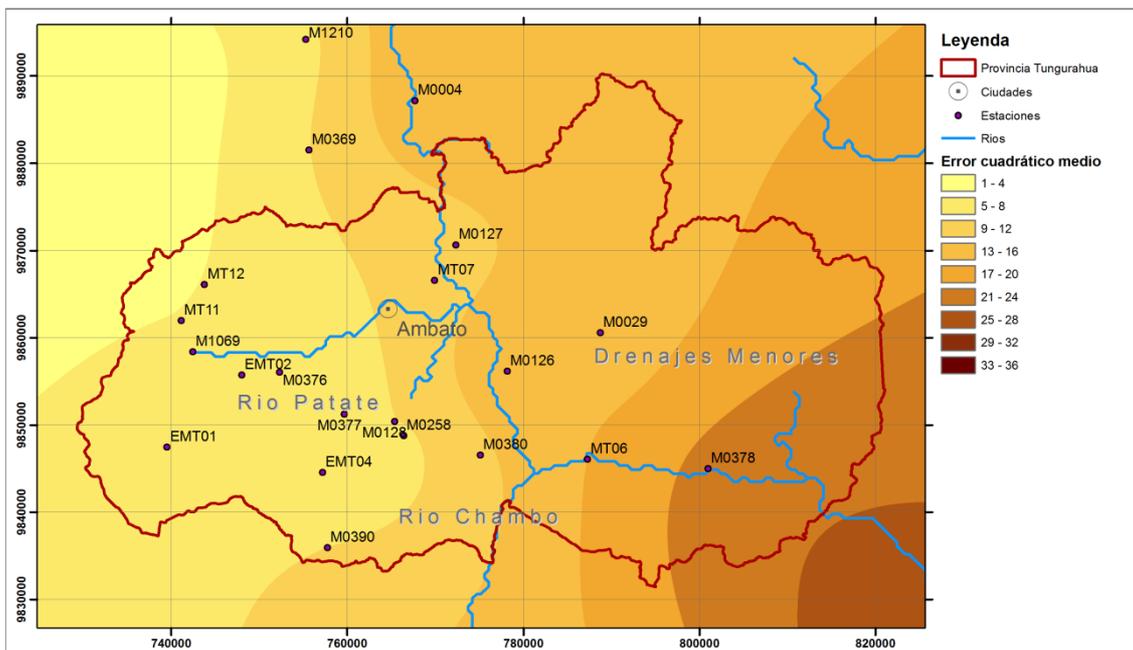


Figura 14. Error cuadrático medio de los modelos de predicción, calculados con validación cruzada (mm / semana).

3.3 Evaluación de la predicción espacial

3.3.1 Medias anuales

Los mapas de precipitación obtenidos con los modelos de regresión fueron corregidos con las interpolaciones espaciales de los residuales entre los valores observados y los estimados en las ubicaciones de las estaciones. Esto resultó en una serie temporal semanal de precipitación que cubre toda la región con una resolución de 1x1 km. Este conjunto de datos espaciales se incluye como anexo a este informe.

Varias estadísticas de resumen se han hecho sobre la base de los mapas de precipitación semanal. La Figura 15 muestra las precipitaciones medias anuales calculadas en función de la serie semanal a lo largo de todo el periodo de 14 años. La Figura 17 muestra la precipitación total anual de 2007: el año más lluvioso de este período para la zona, y la precipitación anual de 2003: el año más seco.



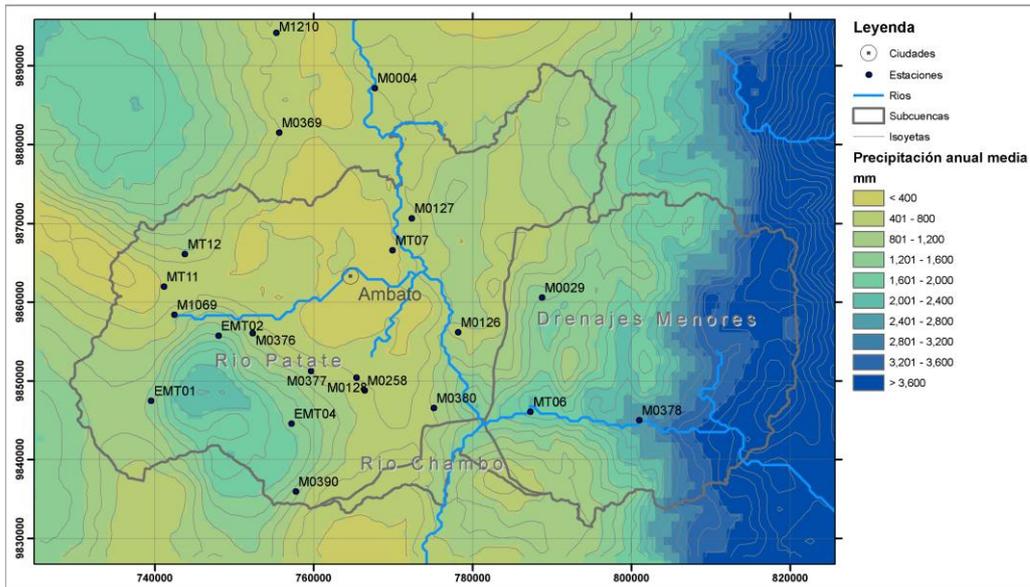


Figura 15. Las precipitaciones anuales en base a los mapas semanales de los 14 años

Se puede observar que los patrones de las precipitaciones son muy variables. Se pueden caracterizar 3 zonas principales: la zona de páramo de la Cordillera Oriental Ecuatoriana (o Cordillera Real), que tiene una pluviometría anual superior a 1.000 mm con época lluviosa de abril a agosto (véase anejo I). Después los flancos orientales de la Cordillera Occidental con precipitaciones que llegan hasta por encima de 3000 mm por año en las partes más bajas de la provincia. La tercera zona es la Zona del Callejón Interandino, con precipitaciones anuales alrededor de los 500 mm, pero con importantes variabilidades debido a los microclimas en esta zona, o sea pequeñas zonas con características climáticas propias.

Los patrones espaciales obtenidos son similares en el mapa publicado en 2012 (Figura 16) por el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca: las cantidades de lluvia anuales llegan a 4000 mm en la parte oriental de la provincia mientras que las zonas más secas con alrededor de 500 mm se pueden encontrar alrededor de Ambato. También el área montañosa en la parte sur-occidental de la provincia es un poco más húmeda. Sin embargo, el mapa que se ha producido en el contexto de este proyecto tiene un nivel de detalle espacial mucho más alto y está disponible a nivel semanal durante el periodo 1998-2011.

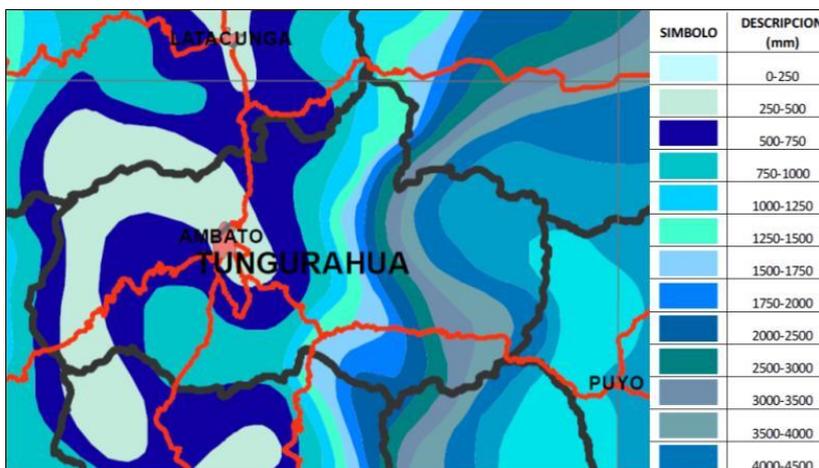


Figura 16. Mapa de isoyetas obtenido del geoportal del Ministerio AGAP - Proyecto MAG / IICA / CLIRSEN (<http://geoportal.magap.gob.ec/>)

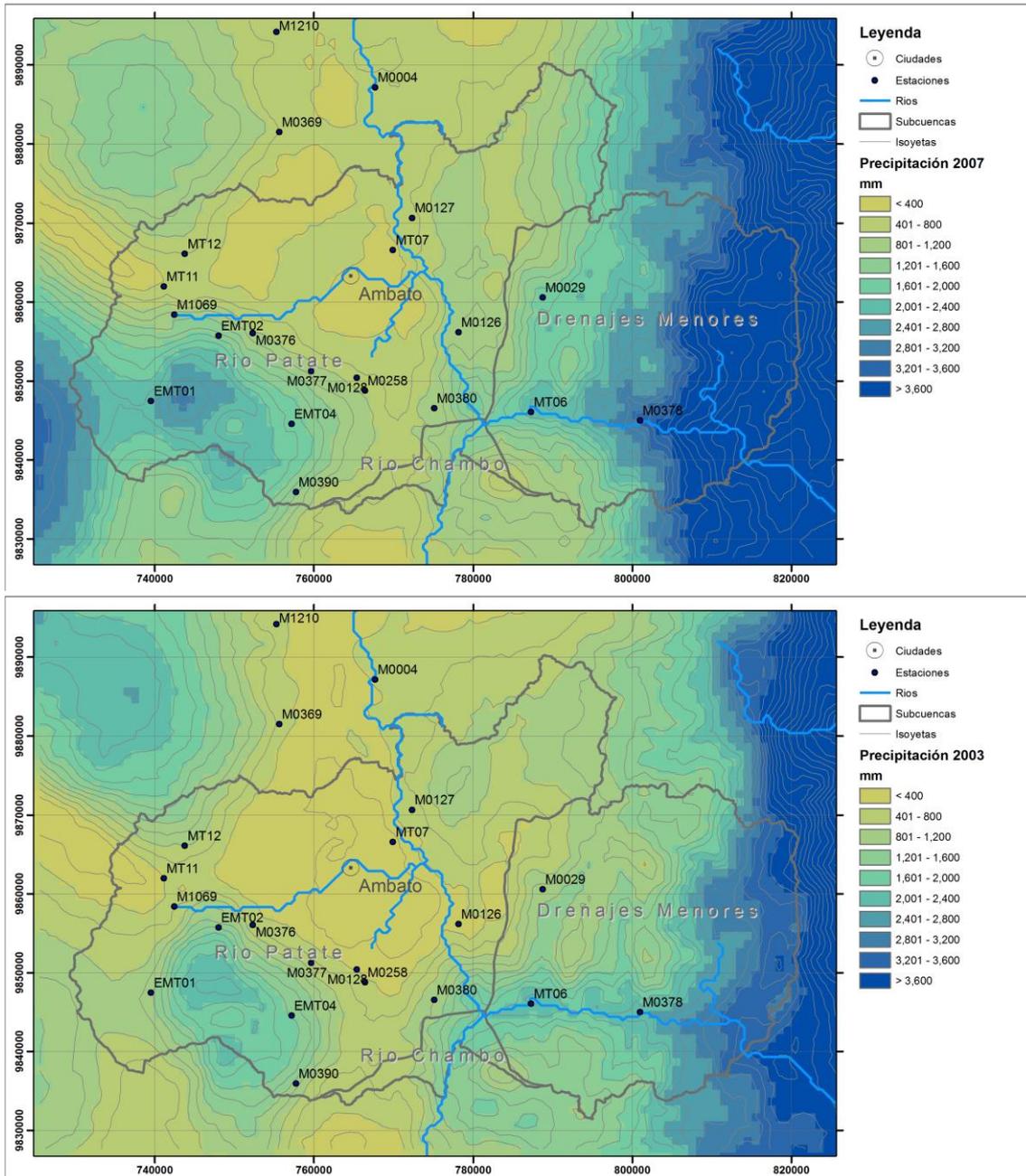


Figura 17. Las precipitaciones anuales de un año húmedo 2007 (arriba) y de un año seco 2003 (abajo)

La variabilidad temporal de la precipitación se puede expresar mediante el cálculo del coeficiente de variación (el cociente de la desviación estándar de la precipitación media). Esto da una indicación de las diferencias relativas entre períodos húmedos y secos. La Figura 18 muestra la representación espacial del coeficiente de variación, calculado en función de la totalidad de 14-años período de precipitación semanales.



3.3.2 Variación temporal

El mapa muestra que en la región alrededor de la ciudad de Ambato, la variación temporal es la más alta. Esta variabilidad relativamente alta de las lluvias corresponde con las zonas donde se cultivan principalmente cultivos de ciclo corto. La zona un poco más al sur de Ambato muestra menor variabilidad (colores más azulados) y corresponde a las zonas donde se cultivan principalmente árboles frutales. También en las zonas del este, aguas abajo, el coeficiente de variación es bajo, y las cantidades de precipitación elevadas permiten la producción de fruta.

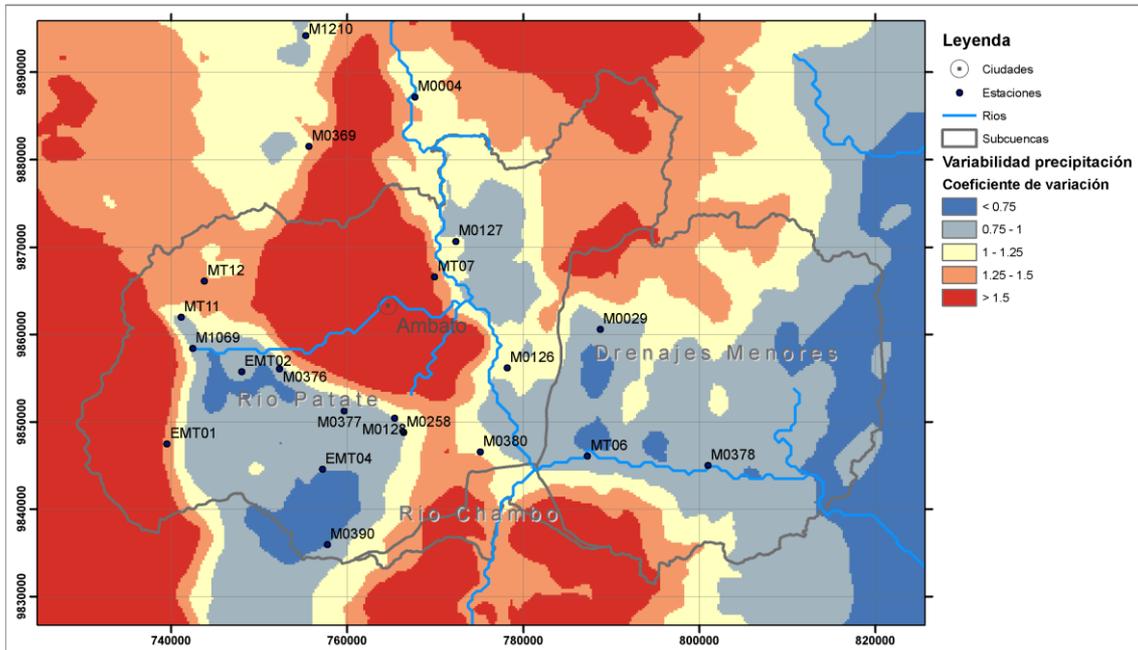


Figura 18. Coeficiente de variación basado en la variación semanal de las precipitaciones durante todo el período 1998-2011. El mapa indica las diferencias relativas entre períodos húmedos y secos, onde los valores altos (rojo) significan una gran variación entre períodos húmedos y secos.

3.3.3 Precisión de la salida final

El apartado 3.2 mostró una evaluación de la capacidad de predicción de los modelos de regresión, mediante la técnica de validación cruzada. Esta evaluación indica en qué zonas la capacidad predictiva es alta y en qué zonas más baja, pero no cuantifica la precisión final, ya que los mapas obtenidos por medio de las regresiones se corrigieron con los residuales interpolados.

Los gráficos en la Figura 19 muestran para todas las estaciones los diagramas de dispersión de las precipitaciones observadas frente a los predichos (simulados), en función de las cantidades de lluvia mensuales. Se puede observar que para el producto final, el coeficiente de determinación R^2 oscila entre 0,92 y 1,0, RMSE entre 2,4 y 5,7 mm por mes, en este caso establecido en base a todas las estaciones disponibles, es decir, sin validación cruzada.

La metodología asegura que en los puntos de las estaciones meteorológicas existe una precisión óptima de la salida final. Para conocer la precisión de las zonas intermedias, la validación cruzada da una estimación de la precisión final. Existen algunos factores relacionados con errores en las capas de entrada que puedan afectar la precisión de la salida final:



1. TRMM 3b41: como queda ya detallado anteriormente, los valores absolutos de los productos TRMM requieren una corrección con datos de estaciones meteorológicas en puntos representativos de la zona. Para el producto diario de TRMM (3b41) se aplica una corrección como queda detallado en el apartado 2.4.1. Este producto se utiliza para rellenar las lagunas de datos, y con la corrección aplicada queda garantizada que el sesgo del producto no afecta a la salida final.
2. Para el producto mensual TRMM (2b31) se detectaron anomalías en las zonas del páramo dentro de la zona del estudio y para ciertos meses con relativamente poca aportación pluvial. En esas zonas apenas existen aún datos observados por lo que resulta difícil una validación fiable. A pesar de esto, se confirmó que el producto TRMM da valores demasiado bajos y a veces incluso hasta 0, siendo prácticamente imposible para esta zona. Este producto se incluyó como uno de los factores en la regresión. El coeficiente que establece el análisis de regresión depende de la correlación entre este producto y los valores medidos en las estaciones meteorológicas. Dado que existen escasos datos aún en estas zonas, la precisión de la salida final pueda verse afectada por los errores en la entrada del análisis. De todas formas, el grado en el que la precisión se ve afectada depende no de la exactitud del valor absoluto de TRMM, sino de la capacidad del producto TRMM de reproducir los patrones medios. Según el conocimiento y los datos actuales, esos patrones reflejan razonablemente bien la situación actual (vea también la Figura 4). De todas formas, son cruciales las nuevas estaciones instaladas en la zona del páramo para conocer mejor la dinámica pluvial y las lluvias medias mensuales. Se recomienda unos 5 años después de su puesta en marcha re-analizar y evaluar la precisión de la salida final en las zonas del páramo.
3. Las lluvias abundantes en la parte este de la provincia causan que la respuesta de la vegetación sobre la precipitación no sea evidente. Por lo tanto, en esas zonas el NDVI no aporta información a la estimación de la distribución espacial de precipitación. En ese caso, son los otros 2 factores (elevación y las lluvias medias) los que dominan en la predicción por medio del modelo de regresión. Otra limitación del uso de NDVI son las lagunas de datos durante épocas muy nubosas. Para esta metodología se ha rellenado los píxeles de cada imagen sin datos por nubosidad con un valor representativo (promedio) del mes de la imagen (explicado en apartado 2.4.1), ya que normalmente siempre existe como mínimo un dato durante el mes.

Como conclusión, el método funciona mejor en las zonas relativamente secas, donde el desarrollo de la vegetación responde más directamente a las precipitaciones. Por otro lado, siguen habiendo dudas sobre las aportaciones pluviales en las zonas del páramo de la provincia, dado que existen actualmente aún pocos datos observados para contrastar las estimaciones por teledetección. Este método requiere datos de estaciones meteorológicas en zonas representativas de la zona del estudio. De tal modo se asegura que errores por anomalías en los datos de entrada se minimizan. Las nuevas estaciones en los páramos por lo tanto pueden aumentar la precisión de las distribuciones de precipitación en esas zonas.



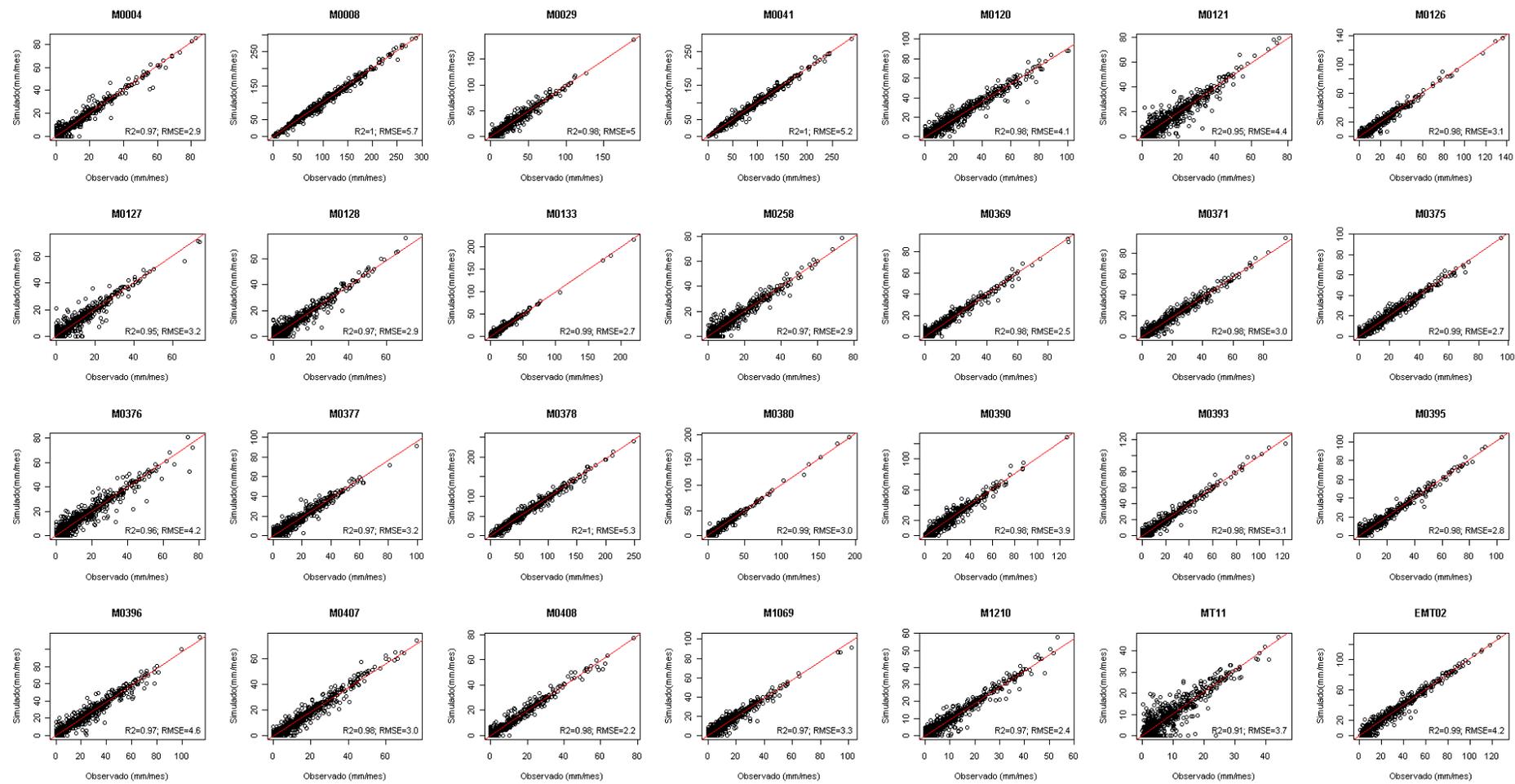


Figura 19. Diagramas de dispersión que muestran para cada estación meteorológica los valores semanales observados versus los valores predichos

3.4 Análisis temporal y de tendencias

3.4.1 Evaluación por subcuenca

Para las tres subcuencas de la provincia de Tungurahua (Figura 20) se extrajeron series temporales para obtener una estimación de las precipitaciones para cada semana en el período de 14 años. Basándose en estas series temporales (Figura 21) se derivaron las estadísticas y se llevó a cabo un análisis de tendencias con carácter anual, mensual y semanal.

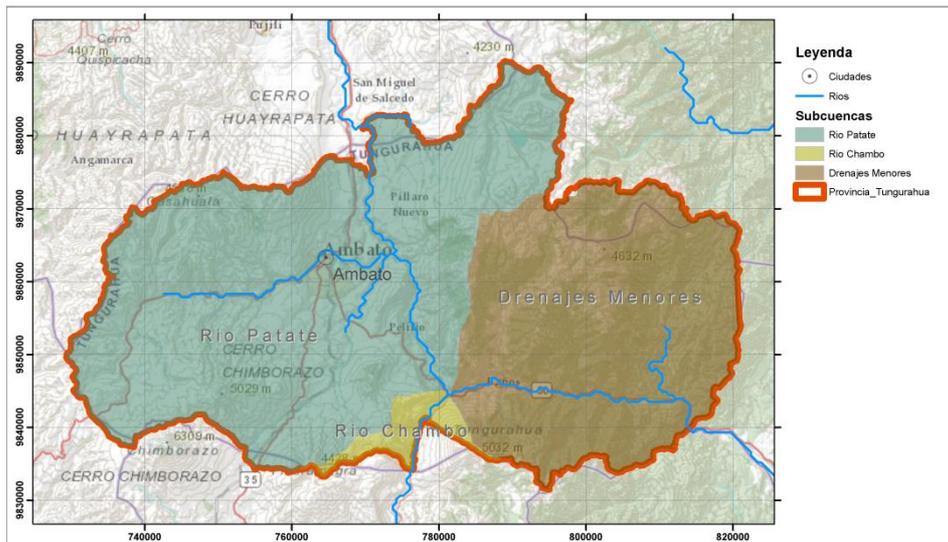


Figura 20. Subcuencas dentro de la provincia de Tungurahua

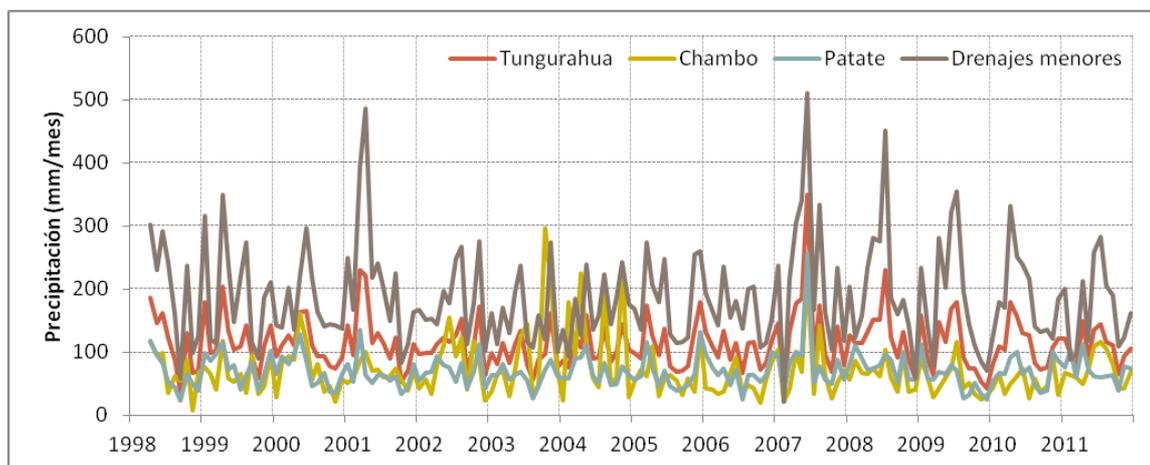


Figura 21. Series temporales de precipitación mensual para cada una de las subcuencas y toda la provincia

La Figura 21 muestra las series temporales para toda la provincia de Tungurahua, y los tres subcuencas dentro de la provincia. Los colores corresponden a la subcuencas mostradas en el mapa en la Figura 20. La precipitación total mensual en la provincia varía entre 30 mm y 350 mm. La subcuenca oriental denominada "Drenajes Menores" corresponde con la parte más húmeda de la provincia, y la precipitación mensual en esta subcuenca puede alcanzar alrededor de 500 mm (principalmente entre abril y julio). Por otra parte, la subcuenca Patate



puede recibir en algunos meses sólo alrededor de 25 mm de lluvia, especialmente entre julio y octubre.

Este mismo patrón climático se puede observar en las medias mensuales para las 4 zonas en la Figura 22. Claramente, la subcuenca del Río Chambo y del Río Patate reciben cantidades similares de lluvia a lo largo del año, mientras que los la subcuenca Drenajes Menores recibe cantidades mucho más altas, especialmente entre abril y julio.

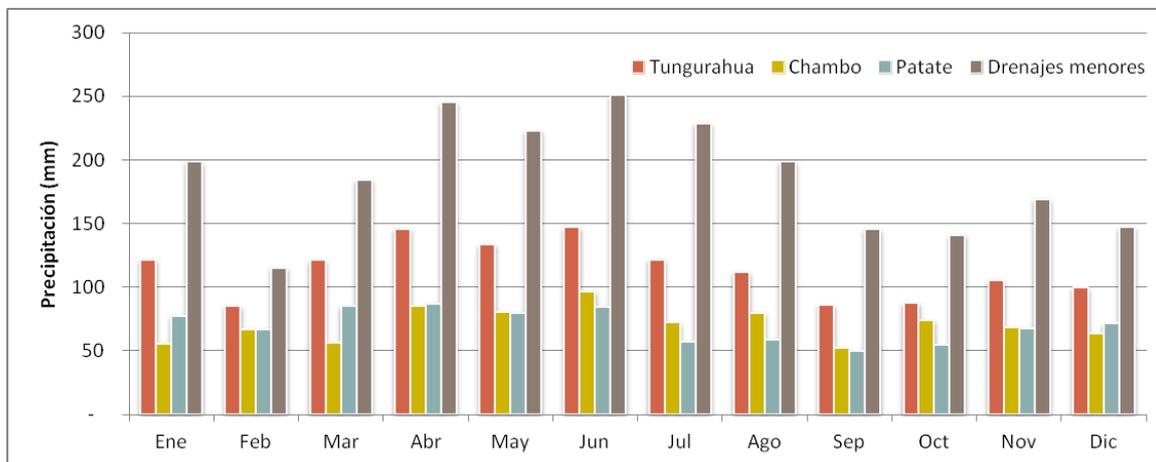


Figura 22. Medias mensuales de precipitación para cada una de las subcuencas y toda la provincia

Aquí es importante notar que pueden existir diferencias muy significativas a la hora de estimar la precipitación total que recibe una zona, entre los valores obtenido mediante el método aquí presentado, y los promedios de las estaciones disponibles. Como ilustración, en la siguiente gráfica se demuestra la precipitación mensual de la provincia, obtenido con las salidas de este estudio, y los promedios calculados utilizando únicamente los datos de las estaciones meteorológicas disponibles dentro de la zona.

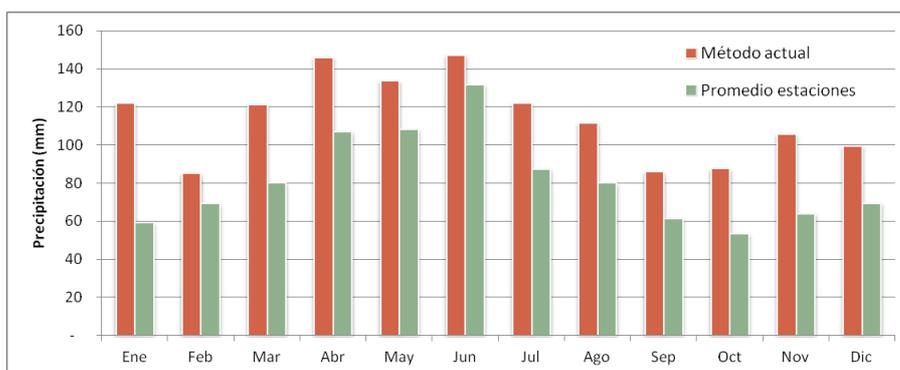


Figura 23. Comparación de los valores obtenidos para las lluvias mensuales totales en la provincia por medio del método actual, y el promedio los datos de las estaciones meteorológicas.

Como se puede observar, para cada mes los valores estimados por el método presentado salen más alto (en general casi 50%) que el promedio calculado en función de los datos observados. Esto se puede explicar principalmente por la falta de una distribución homogénea de las estaciones en la zona. Debido a esa anomalía, existen ciertas zonas (como las zonas altas y la amazonia) donde hay relativamente pocas estaciones meteorológicas. Utilizando



métodos como el algoritmo presentado, esta laguna de información espacial se rellena con variables relacionadas con la precipitación y detectadas por teledetección.

3.4.2 Análisis de tendencias

La Figura 24 muestra las tendencias anuales que se observaron en función del período de 14 años. Los números que aparecen en la parte derecha de la figura indican la disminución media de la precipitación (mm / año), calculada mediante la derivación de una línea de regresión lineal. Para todas las estaciones se observa una tendencia a la baja. En base a este análisis la provincia de Tungurahua recibe 36 mm menos de precipitaciones en 10 años.

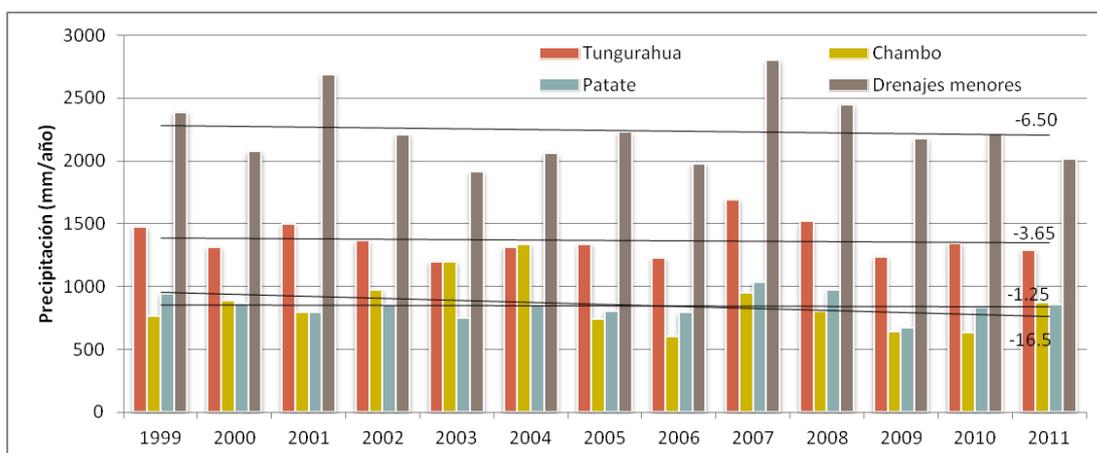


Figura 24. Tendencias en las precipitaciones anuales para cada una de las subcuencas y toda la provincia. Los números representan el cambio promedio anual en mm / año para cada una de las áreas.

La Figura 25 y Figura 26 muestran el análisis de tendencias realizado en función de las cantidades mensuales y semanales, con el fin de detectar si ciertos períodos del año son cada vez más húmedos o más secos.

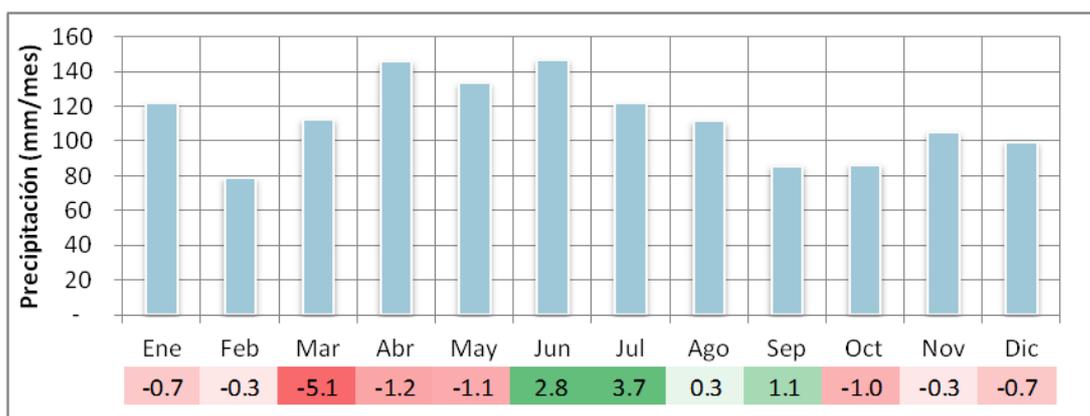


Figura 25. Tendencias de las precipitaciones mensuales para toda la provincia: el rojo indica una tendencia más seca, verde una tendencia más húmeda. Los números representan el cambio en las precipitaciones durante los últimos 14 años (mes/año)

En base a este análisis de tendencias, el período comprendido entre junio y septiembre se está convirtiendo en más húmedo, mientras que el resto del año se vuelve más seco. El análisis de tendencia semanal confirmó un patrón similar. Esto significa que el período húmedo del año es



cada vez un poco más húmedo, mientras que el período más seco del año, se vuelve cada vez más seco.

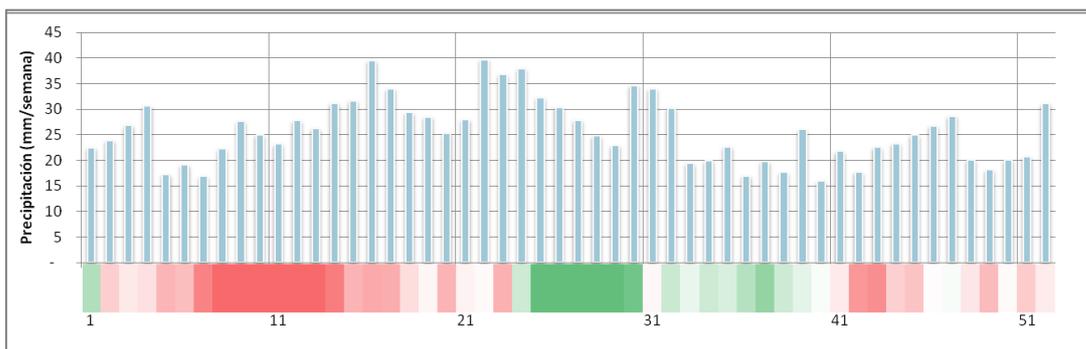


Figura 26. Promedio de la precipitación semanal para toda la provincia, y las tendencias: colores rojos indican las tendencias secas, verdes las húmedas.

4 Conclusiones

En este estudio se presentan datos de la distribución espacial de las precipitaciones y las tendencias en la provincia montañosa de Tungurahua, a partir de un refinamiento de métodos científicamente probados. Se combinaron datos de las estaciones meteorológicas con datos de teledetección para mejorar la cuantificación de la distribución espacial de la precipitación en las zonas donde se carece de observaciones directas.

El enfoque asume que el estado de la vegetación, la elevación y estimaciones satelitales de precipitación son indicadores útiles para inferir la precipitación real. Los resultados confirman que este es el caso y que el 40% de la variación en la precipitación semanal se puede explicar por estos factores, con la vegetación como indicador principal. El método funciona mejor en las zonas relativamente secas, donde el desarrollo de la vegetación responde más directamente a las precipitaciones.

En el caso en que las precipitaciones son muy abundantes, por ejemplo más de 1000 mm, la relación entre el índice de vegetación y la precipitación se satura, y los otros factores son más relevantes en los modelos de regresión. La parte no explicada de la varianza determinada por medio de los residuales en las ubicaciones de las estaciones, se interpoló espacialmente y el coeficiente de determinación resultante entre las observaciones y la predicción varía entre 0,92 y 1,0 para todas las estaciones consideradas. Por otra parte, la validación cruzada de las salidas de los modelos de regresión da un resultado satisfactorio.

La cantidad total de precipitaciones en la cuenca varía desde alrededor de 500 mm / año en torno a Ambato hasta 4000 mm en el sureste de la provincia y se concluye que tanto la variabilidad temporal como la espacial son muy significativas. La zona más seca es también la zona con mayor variabilidad en el tiempo, coincidiendo con la zona principal agrícola. El régimen pluvial permite aquí cultivos de ciclo corto, lo que refleja la situación actual. Los cultivos pluri anuales se producen en las zonas con una mayor precipitación media anual y con menor variabilidad temporal.

El análisis de tendencia muestra que existe en general una tendencia leve a la baja en todas las subcuencas consideradas, con una disminución media de casi 40 mm en 10 años. Los meses de junio a septiembre han mostrado una tendencia ligeramente más húmeda durante los últimos 14 años. En términos de clima (definido como el tiempo promedio durante un período de 30 años) la serie temporal es relativamente corta para determinar la importancia de estas tendencias. Sin embargo, el hecho de que los tres subcuencas revelan unas tendencias similares indica una tendencia real, que es particularmente secadora en marzo y abril.

Los resultados muestran que existe una variabilidad espacial importante en la región central de la provincia. Por lo tanto, es recomendable que la distribución de las estaciones meteorológicas sea lo suficiente representativa para captar bien los patrones y la dinámica pluvial en la provincia. De tal modo, y aprovechando información espacial detallada proveniente de datos de teledetección como se ha presentado en este documento, se puede llegar a estimar la variabilidad de la precipitación con más precisión. La aplicación de este método en otras zonas con alta variabilidad espacial de precipitación, por lo tanto podría ser muy útil.



5 Recomendaciones

El algoritmo aplicado en este estudio ha generado una serie temporal a nivel semanal de la distribución espacial de la precipitación, con una resolución de 1x1km del periodo 1998-2011. Actualmente el Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua con el apoyo financiero de la KFW, a través del Programa de Aguas y Cuencas de Tungurahua (PACT) está llevando a cabo la implementación de proyectos de tecnificación del riego en varias zonas.

5.1 Balance hídrico de zonas agrícolas

Para conocer mejor el balance hídrico de esas zonas agrícolas, se recomienda utilizar los datos generados sobre la precipitación para conocer mejor el balance hídrico de las zonas agrícolas y sus necesidades de riego. Ese balance se puede establecer a nivel mensual calculando con software SIG y las capas semanales de precipitación las aportaciones pluviales de cada punto de interés, combinándolo con las necesidades de agua teóricas para cada cultivo según por ejemplo las recomendaciones de la FAO. De tal modo se pueda conocer si existe un déficit estructural en la zona del estudio que puede ser solucionado mediante el riego.

Para conocer mejor cómo las cantidades de riego y el almacenamiento del agua en el suelo afectan a la producción del cultivo y por lo tanto a la rentabilidad de la inversión, se puede hacer uso de modelos agro-hidrológicos (SWAP, AquaCrop, etc). Estos modelos simulan a nivel diario la repuesta del cultivo, la acumulación de biomasa y su rendimiento, y la disponibilidad del agua en cada uno de los componentes del balance hídrico del suelo. De tal modo, se pueda conocer las necesidades mínimas y óptimas para que una inversión en infraestructura para riego salga rentable, tomando en cuenta las cosechas potenciales en función de la disponibilidad de agua en cada momento.

5.2 Balance hídrico de las sub-cuencas y del páramo

La información detallada de precipitación permite desarrollar estudios y una planificación más a medida y precisa de las cuencas y sub-cuencas. Ante esta situación, el estudio del balance hídrico y de eventos hidrológicos se puede basar en el empleo de modelos de simulación partiendo de la información meteorológica generada por este estudio y de propiedades físicas y geomorfológicas de la cuenca. De tal forma, se puede hacer la modelación distribuida de los procesos implicados, lo que supone considerar la variabilidad espacial de la información sobre la cuenca del estudio. Esta consideración supone un mayor acercamiento a la realidad de los procesos hidrológicos, puesto que es evidente que existe una variabilidad espacial natural de la precipitación, de los parámetros implicados en la infiltración y de la estructura de la red de drenaje. Consecuentemente, existen importantes ventajas del uso de datos detallados de precipitación para los modelos de simulación hidrológica.

Existe una multitud de modelos de simulación para este fin. La utilidad de un modelo depende de su aplicabilidad a la situación y problemática y también de la frecuencia y extensión de su uso para la solución de problemas relacionados con la planificación, el diseño y desarrollo. El reto es encontrar un balance óptimo entre el nivel de detalle en los procesos simulados del modelo elegido, y el objetivo y la escala de trabajo.



La importante capacidad actual de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para manejar y analizar información espacial hace de estas herramientas informáticas un entorno adecuado para afrontar de manera eficiente la modelación hidrológica distribuida. Un ejemplo de un modelo de ese tipo es SWAT (Soil and Water Assessment Tool): un modelo hidrológico distribuido, continuo y de paso diario, diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas A&M. Este modelo permite simular la generación de escurrimiento y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el efecto que tienen las prácticas agronómicas.

De especial interés en la zona andina de la provincia de Tungurahua es el comportamiento hidrológico del páramo. Las zonas del páramo son claves para el régimen fluvial y la disponibilidad de los recursos hídricos en la zona. Para conocer mejor su papel, se recomienda hacer un análisis más detallado del balance hídrico de los páramos en la zona del estudio, utilizando los datos generados. De tal modo, se puede cuantificar mejor su funcionamiento de retención del agua y su valor estratégico para la región. Para ello, se puedan aplicar modelos de simulación que bajo las diferentes condiciones históricas y bajo diferentes escenarios de gestión son capaces de estimar los impactos sobre la disponibilidad de agua y otros factores relacionados.

Clave para este método es una buena disponibilidad de datos de estaciones meteorológicas en lugares representativos para los diferentes sistemas geográficos y climatológicos de la zona del estudio. Es recomendable poder contar con estaciones en cada rango de altitud (aguas abajo, alta montaña, etc), y en cada eco-sistema (páramo, amazonia, etc) presente en la zona del estudio. De este modo, las relaciones establecidas entre las variables (altitud, vegetación, variabilidad de precipitación detectada por teledetección) serán más fiables y precisas. También, así se garantiza que las anomalías en los datos de entrada (por ejemplo los errores reconocidos en los valores cuantitativos detectados por satélite) afectan menos a la salida final. La reciente instalación y puesta en marcha de las estaciones en las zonas de páramo contribuyen a este objetivo.

5.3 Otras aplicaciones

Por último, la información detallada de la aportación pluvial es relevante para una amplia variedad de aplicaciones civiles y ambientales. A continuación se detallan algunas posibles aplicaciones para poner en valor la información generada:

- (i) **Planes de cuenca:** para la caracterización de los recursos hídricos disponibles a nivel de cuenca es necesario conocer la aportación pluvial en cada punto. Esta información básica sirve para establecer mediante un proceso participativo un plan de cuenca que tiene como objetivo mejorar la gestión y explotación de los recursos hídricos protegiendo su calidad, economizando su empleo y racionalizando sus usos en armonía con el medio ambiente y los demás recursos naturales.
- (ii) **Potencial hidroeléctrico:** Para conocer el potencial hidroeléctrico de un punto de interés, es crucial conocer el régimen pluvial de la zona aguas arriba. Para pequeñas sub-cuencas donde existe pocos datos hidro-meteorológicos, la información de la distribución de las precipitaciones es el principal punto de partida para analizar la viabilidad de las infraestructuras hidroeléctricas, tanto para su diseño como para conocer su rendimiento y los riesgos relacionados. La información generada en combinación con un modelo hidrológico-hidráulico puede ser utilizada para estimar de



cualquier sub-cuenca en la provincia el potencial para nuevos desarrollos hidroeléctricos.

- (iii) **Estudios de caudales ambientales:** Resulta cada vez más claro que, a medio y largo plazo, no satisfacer las necesidades de los caudales ambientales conlleva consecuencias desastrosas para muchos usuarios de los ríos. Por lo tanto, una gestión hídrica ambiental persigue el aprovechamiento equilibrado de las funciones del medio fluvial, mediante un régimen de caudales ambientales. Para conocer este régimen, se ha de combinar datos y modelos hidrológicos y biológicos. Esta metodología requiere información precisa de las precipitaciones para conocer el régimen fluvial y los caudales mínimos en cada punto. La información generada puede apoyar estos tipos de estudios como dato principal de entrada en el análisis de modelización.
- (iv) **Planes de sequía:** con el fin de minimizar los impactos ambientales, económicos y sociales de eventuales situaciones de sequía, los gestores requieren un sistema global de indicadores hidrológicos que permita prever estas situaciones y que sirva de referencia a los actores y organismos de la cuenca. De tal forma se pueden regular las reglas de explotación de los sistemas y las medidas a aplicar en relación con el uso del dominio público hidráulico. Para establecer los diferentes umbrales e indicadores es crucial la información pluvial detallada de la zona del estudio. De este modo, se puede conocer en cada punto cuáles son las condiciones extremas y como se ha de actuar en función de los diferentes indicadores establecidos. Para crear un sistema de alerta para anticiparse a los eventos de sequía, sería de gran valor crear una herramienta a (semi-) tiempo real que generara en cada momento un imagen actualizada de la aportación pluvial, utilizando un algoritmo similar al que se presente en este documento. La utilidad de un sistema de alerta de sequías se puede ampliar cuando se integre un modelo hidrológico que permita hacer una previsión del estado de sequía. Así los gestores de cuenca puedan actuar con antelación y poner en marcha las diferentes actuaciones de mitigación.



6 Referencias

- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bièvre, B. De, & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, 329(3-4), 413–421.
- Hong, Y., K.-L. Hsu, H. Moradkhani, and S. Sorooshian, 2006: Uncertainty quantification of satellite precipitation estimation and Monte Carlo assessment of the error propagation into hydrologic response. *Water Resour. Res.*, 42,
- Huffman, G. J., 1997: Estimates of root-mean-square random error for finite samples of estimated precipitation. *J. Appl. Meteor.*, 36, 1191–1201.
- Immerzeel, W.W. 2010. Bias Correction for Satellite Precipitation Estimation used by the MRC Mekong Flood Forecasting System – Mission Report. *FutureWater Report 94*.
- Immerzeel, W.W., Pellicciotti, F, Shrestha, A.B., 2012, Glaciers as a proxy to quantify the spatial distribution of precipitation in the Hunza basin. *Mountain Research and Development* 32: 30-38.
- Immerzeel, W.W., Rutten, M.M., Droogers, P., de Jong, S.M., Bierkens, M.F.P., 2009, Spatial downscaling of TRMM precipitation using vegetative response on the Iberian Peninsula. *Remote Sensing of Environment* 113: 362-370.
- Kummerow, C., W. Barnes, T. Kozu, J. Shiue, and J. Simpson, 1998: The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 15, 809–817.
- Quiroz, R., C. Yarlequé, A. Posadas, V. Mares, W.W. Immerzeel. 2010. Improving daily rainfall estimation from NDVI using a wavelet transform. *Environmental Modelling & Software* 26: 201-209.
- Scheel, M. L. M., Rohrer, M., Huggel, C., Santos Villar, D., Silvestre, E., & Huffman, G. J. (2011). Evaluation of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) performance in the Central Andes region and its dependency on spatial and temporal resolution. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(8), 2649–2663.
- Simpson, J., C. Kummerow, W.-K. Tao, and R. F. Adler, 1996: On the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). *Meteor. Atmos. Phys.*, 60, 19–36.
- Su, F., Hong, Y., & Lettenmaier, D. P. (2008). Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and Its Utility in Hydrologic Prediction in the La Plata Basin. *Journal of Hydrometeorology*, 9(4), 622–640.

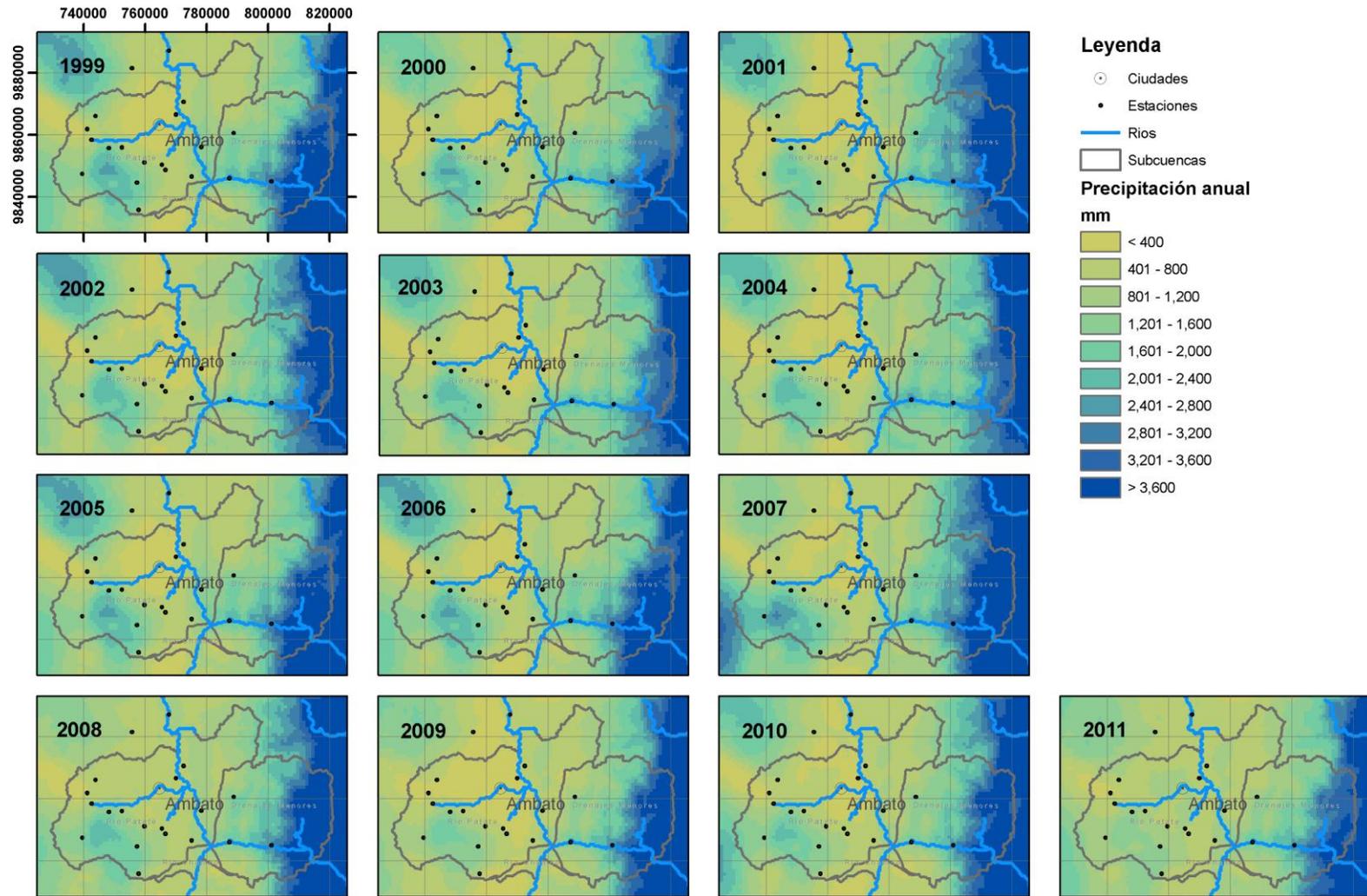


Apéndice I - Distribución espacial de la precipitación anual y mensual

En las siguientes 2 páginas se encuentran los mapas anuales y mensuales de precipitación, calculados en base a la serie temporal de 14 años de distribución espacial de precipitación de cada semana.



Medias Anuales



Medias Mensuales



Legenda

- Ciudades
- Estaciones
- Rios
- ▭ Subcuencas provincia

Precipitación mensual mm

- < 50
- 51 - 100
- 101 - 150
- 151 - 200
- 201 - 250
- 251 - 300
- 301 - 350
- 351 - 400
- 401 - 450
- 451 - 500



Apéndice II - Entrega de Datos

Series Temporales

Se adjuntan los siguientes datos temporales al informe:

- Precipitación semanal de las estaciones meteorológicas, verificada y corregida por posibles valores atípicos, y rellenado de huecos.
- Precipitación semanal de las tres subcuencas de la provincia
 - Rio Pastaza
 - Drenajes Menores
 - Rio Chambo

Los datos temporales en archivo Excel adjunto, cubren el periodo 1998-2011, para las siguientes estaciones:

Table 3. Series temporales corregidas y rellenados

Nombre	Código	Huecos
Rumipamba	M0004	8
Puyo	M0008	11
Baños Col. A.J. Sucre	M0029	159
Sangay(P.Santa Ana)	M0041	139
Cotopaxi-Clirsen	M0120	147
El Refugio	M0121	606
Patate	M0126	232
Pillaro Colegio J. Alvarez	M0127	342
Pedro Fermin Cevallos	M0128	95
Guaslan	M0133	236
Querochaca	M0258	2
Cusubamba	M0369	20
Pastocalle	M0371	201
Saquisili	M0375	24
Pilahuin	M0376	31
Tisaleo	M0377	211
Rio Verde	M0378	240
Huambalo	M0380	13
Urbina	M0390	396
San Juan-Chimborazo	M0393	11
Cebadas	M0395	59
Alao	M0396	92
Licto	M0407	254
Guano	M0408	65
Calamaca	M1069	133



Mapas de distribución espacial

Se adjuntan los siguientes datos temporales al informe:

- Distribución espacial semanal de la precipitación con resolución 1x1 km.
- Distribución espacial mensual de la precipitación con resolución 1x1 km
- Distribución espacial anual de la precipitación con resolución 1x1 km

Los mapas cubren el periodo 1998-2011, y se entregan en formato GeoTiff, un estándar de metadatos de dominio público que permite que información georreferenciada sea encajada en un archivo de imagen de formato TIFF, y compatible con la mayor parte de los programas relacionados con los Sistemas de Información Geográfica, como ArcGIS, GRASS y Idrisi.

La convención de nombres de las capas semanales es la siguiente: "f<aa><ss>.tif": con <aa> el año, y <ss> la semana del año.

