

Mitos y Realidades de las Cabeceras de Cuenca Andinas Peruanas

Foto: Rafael Fernández Rubio. Cordillera Blanca.



Rafael Fernández Rubio

Rafael Fernández Rubio, Dr. Ingeniero de Minas¹,
Catedrático Emérito de Hidrogeología.
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas
Universidad Politécnica de Madrid
Premio Rey Jaime I a la Protección del Medio Ambiente

David Lorca Fernández, Ingeniero Técnico de Minas
Jefe de Proyectos de FRASA Ingenieros Consultores

Jorge Novo Negrillo, Geólogo y Master en Gestión
de Aguas Subterráneas. Consultor

La **Ley de Recursos Hídricos** (Ley 29338), de 2009, en el párrafo tercero de su Artículo 75 (*Protección del agua*) dice textualmente: "El Estado reconoce como zonas ambientalmente vulnerables las cabeceras de cuenca donde se originan las aguas. La Autoridad Nacional, con opinión del Ministerio del Ambiente, puede declarar zonas intangibles en las que no se otorga ningún derecho para uso, disposición o vertimiento de agua."

Esta declaración, aparentemente simple, ha tenido y tiene consecuencias trascendentes para la minería, por los planteamientos y repercusiones a que ha dado lugar, al convertir en "verdad" lo que no lo es. Por ello, y dirigido a los

hombres de buena voluntad, en este estudio se presenta una aproximación al comportamiento hidrológico de las cabeceras de cuenca, en los Andes peruanos.

Origen de las aguas de escorrentía superficial

En primer lugar se puede asegurar que, mayoritariamente, las aguas de escorrentía superficial, se originan a partir de las precipitaciones atmosféricas, en forma de lluvia o nieve. Precipitaciones que se producen por el enfriamiento de masas de aire húmedo, debido a su ascensión y a la presencia de núcleos de condensación o de

congelación. Para ello se tiene que producir el desplazamiento y enfriamiento de las masas de aire húmedo, lo que tiene lugar por procesos convectivos², ciclónicos, y orográficos.

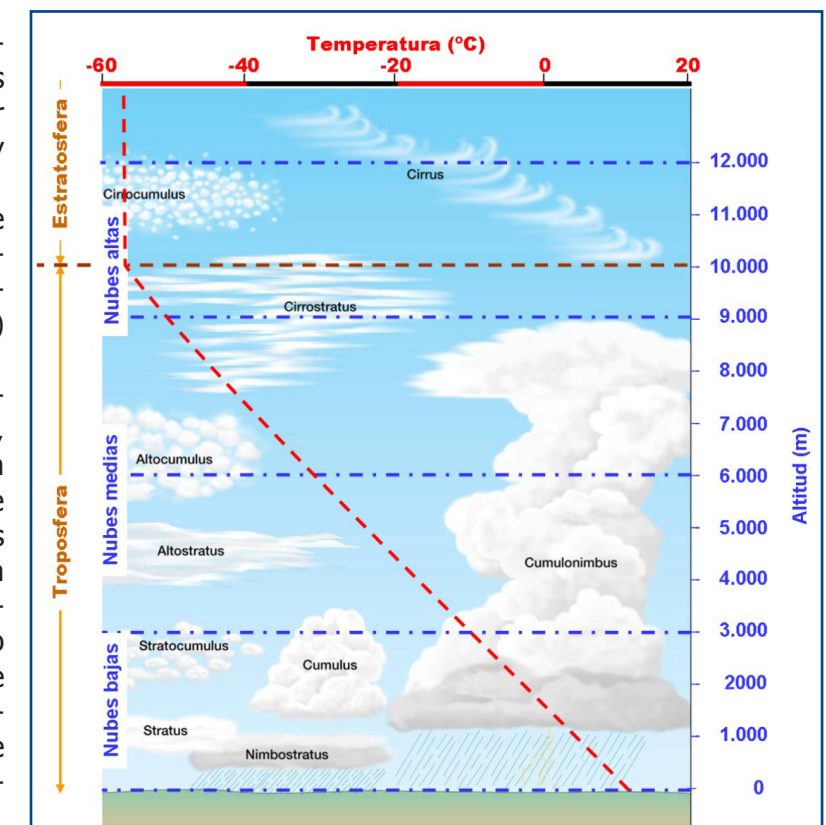
La *precipitación convectiva* tiene lugar en zonas calidas, donde el aire húmedo y caliente se enfría al ascender, condensándose la humedad (cumulonimbos) para originar las lluvias.

La *precipitación ciclónica* se origina en el encuentro de dos masas de aire, de diferente temperatura y humedad, con enfriamiento rápido de la masa de aire caliente húmedo, dando lugar a lluvias que pueden llegar a ser muy intensas. La *precipitación orográfica* se produce cuando el aire húmedo, en su desplazamiento subhorizontal, encuentra el obstáculo de una montaña, que le hace ascender originando lluvia o nieve; es esta la forma de precipitación más importante en el contexto andino que vamos a analizar.

La evolución de las precipitaciones con la altitud

En el conjunto de nubes que se distribuyen por la troposfera (**Figura 1**) las *nubes bajas* (nimboestratos, estratos, cúmulos y estratocúmulos), que son las que en los Andes más aporte de agua originan, no se extienden por encima de los 3.500 m de altitud; las *nubes medias* (altocúmulos y altoestratos) lo hacen hasta los 7.000 m de altitud, es decir hasta las más altas cumbres andinas; mientras que en la estratosfera, donde el aire es muy seco, se sitúan las *nubes altas* (cirros y cirrocúmulos) que no producen precipitaciones.

De esta manera, cuando nos encontramos en las altas cumbres andinas, podemos contemplar, a nuestros pies, esos magníficos espectáculos conocidos como "mar de nubes" (**Fotografía 1**); y es así que la precipitación aumenta con la altitud hasta alcanzar lo que denominamos *óptimo pluvial*, a partir del cual disminuye;



Fuentes diversas. Elaboración propia.

Figura 1. Estratificación de nubes en la atmósfera.

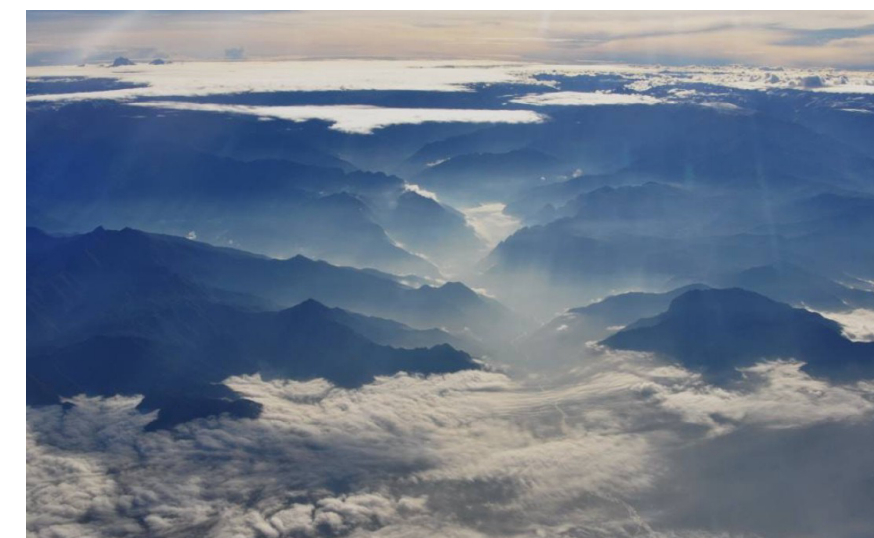


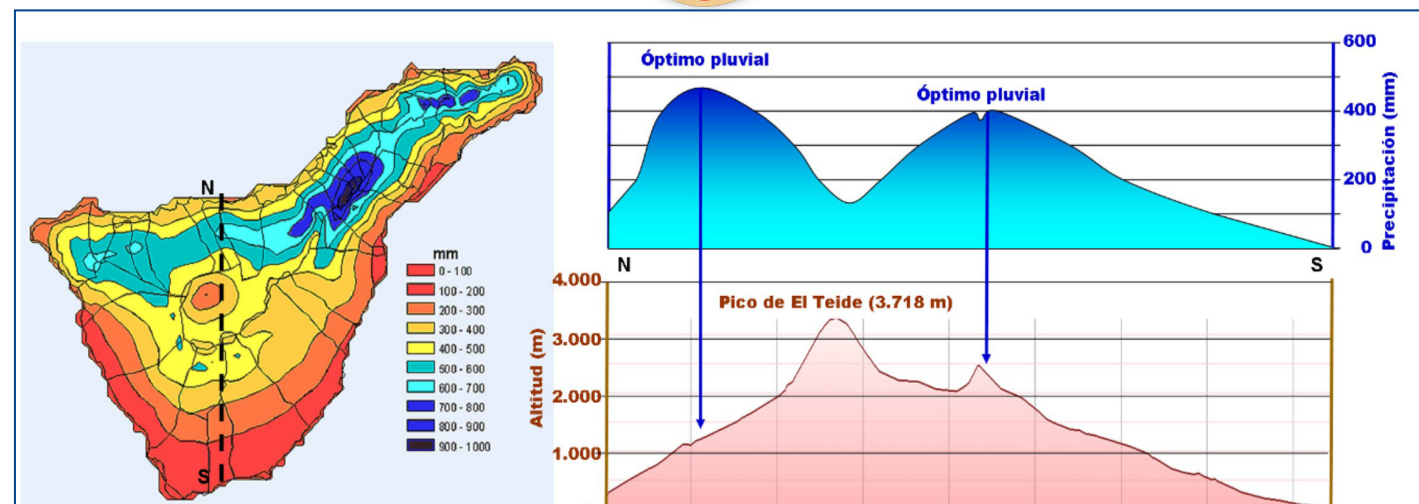
Foto: Rafael Fernández Rubio

Fotografía 1. Mar de nubes al sur de Cajamarca.

y es por esto que mientras estamos por ejemplo en las cumbres de Conga o de la Cordillera Blanca (por encima de 4.500 m de altitud), bajo un espléndido sol, en Cajamarca o en Huaraz (1.500 m por debajo) se pueden estar produciendo abundantes precipitaciones. ➡

¹ Perito y responsable de la coordinación en el Peritaje Internacional de la componente hídrica del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Minero Conga, para la Presidencia del Consejo de Ministros de Perú. (rfrubio@gmail.com)

² Convección: transporte en un fluido de una magnitud física, como masa, electricidad o calor, por desplazamiento de sus moléculas debido a diferencias de densidad. Diccionario de la Lengua Española. RAE.



Fuente pluviometría: <http://www.aguastenerife.org/>. Elaboración propia.

Figura 2. Isoyetas de precipitación media anual en la isla de Tenerife (periodo 1986/87 -1992/93).

Frente a esta realidad, la aseveración del mencionado Artículo 75, de que en "las cabeceras de cuenca (donde) se originan las aguas" evidentemente no tiene fundamento; aseveración que sin embargo hoy la vemos en medios de comunicación y en redes sociales, sin verificación alguna. Podemos asegurar que las aguas se originan, mayoritariamente, a partir de las precipitaciones atmosféricas, y estas disminuyen por encima del indicado óptimo pluvial. Por consiguiente es hora de desmitificar ese concepto en la orografía andina: una hectárea de superficie en cabecera de cuenca aporta menos agua, a la escorrentía superficial, que una hectárea en zona de valle.

A modo de ejemplo, de esa realidad hidrometeorológica, en la relación precipitación versus altitud, podemos presentar un caso bien documentado, y con apoyo de suficientes estaciones pluviométricas; nos referimos a la isla de Tenerife, en las Canarias (España), donde se comprueba cómo, a partir de los correspondientes óptimos pluviales (en la ladera de barlovento y en la de sotavento), se reducen las precipitaciones con la altitud (Figura 2).

Este análisis, que sepamos, no se ha abordado de manera específica para los Andes peruanos, pero no tienen por qué comportarse de manera diferente.

Precipitaciones en la vertiente del Pacífico peruano

Los vientos que arriban del Pacífico, cargados de humedad, a las estribaciones de la cor-

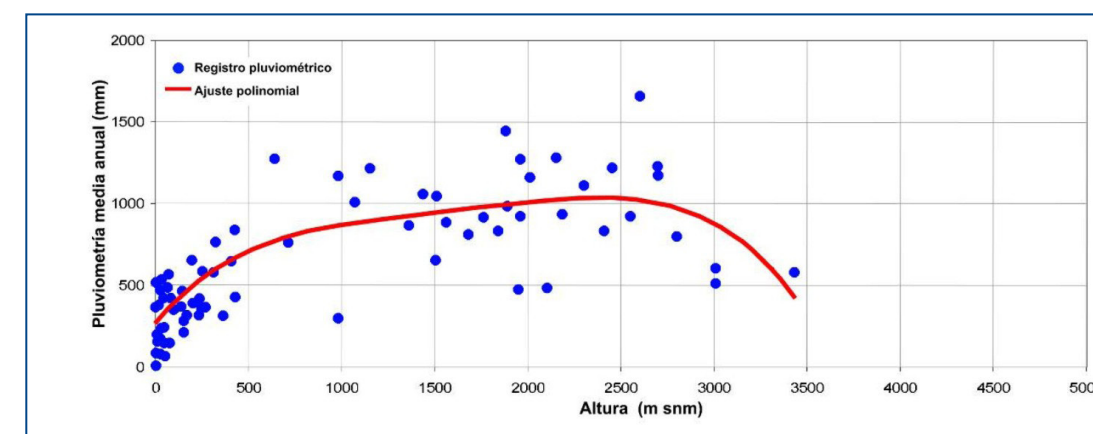
dillera andina, se elevan, enfrían y condensan, dando lugar a precipitaciones orográficas.

Dentro de la escasa información elaborada, útil para este estudio, que se ha podido conseguir, hay que destacar una investigación realmente relevante, realizada por Pouyaud *et al.* (2001), referida a la vertiente pacífica del Perú. Los objetivos de dicho trabajo se centran en el análisis de la pluviometría, en relación con la latitud, en los años con presencia de El Niño y La Niña. Pero, por suerte, también dedica un apartado a la "Relación precipitación vs altitud", análisis que incluye gráficos de gran interés.

En este estudio, los mencionados autores, a partir de todas las estaciones meteorológicas disponibles, de calidad "buena" y "muy buena", individualizan tres franjas en Perú, de norte a sur, en las que analizan las relaciones entre precipitación media anual y altitud, mediante ajuste polinomial.

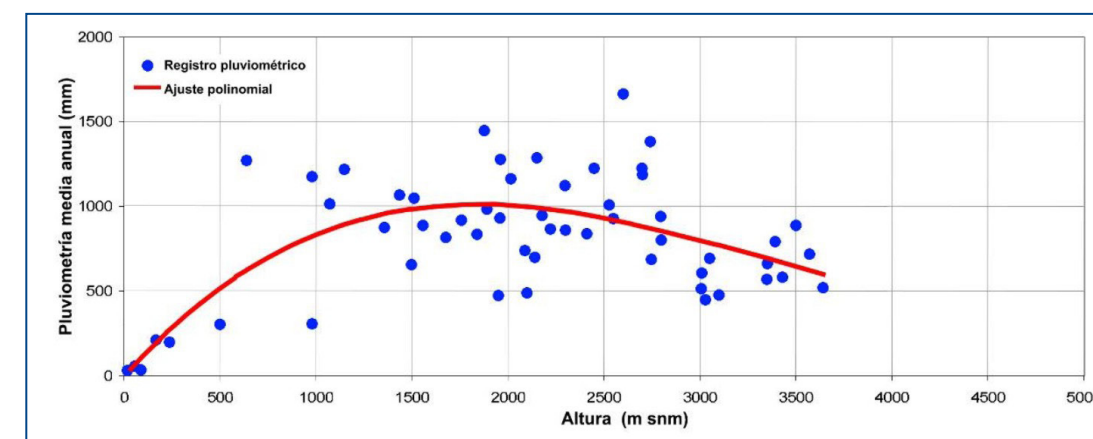
En la franja septentrional del país (Figura 3) se parte de valores medios de lluvias, cerca de la costa, inferiores a 500 mm, que se incrementan con la altitud (unos 40 mm por cada 100 m), hasta alcanzar un valor próximo a 1.000 mm, para cotas entre 1.500 y 2.500 m. Por encima de esta altitud la precipitación desciende, para alcanzar valores medios inferiores a 500 mm a cotas del orden de 3.500 m. De esta manera el óptimo pluvial medio sería de unos 1.000 mm, y se situaría a unos 2.500 m de altitud.

En una amplia zona central de Perú (por latitud) (Figura 4), definen un ajuste polinomial,



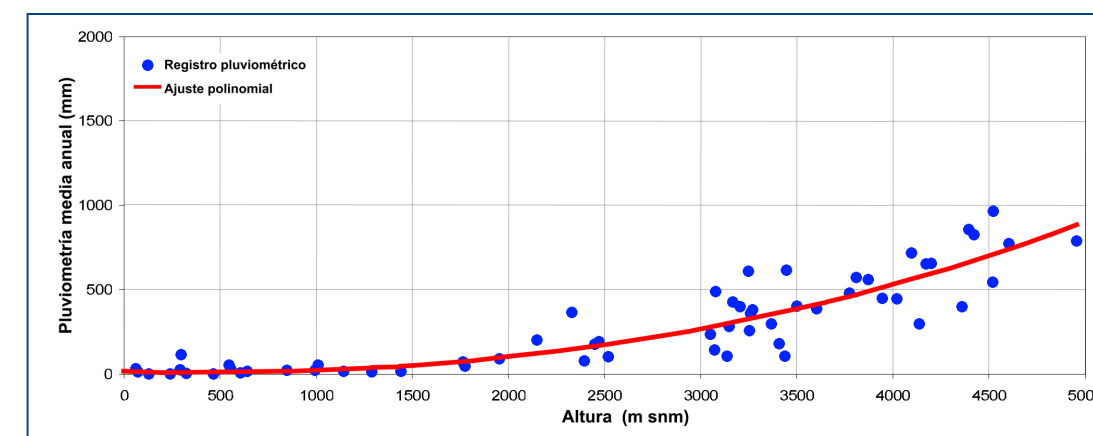
Fuente: Pouyaud *et al.* (2001). Modificado.

Figura 3. Pluviometría media anual vs altitud en la vertiente pacífica de la franja septentrional de Perú.



Fuente: Pouyaud *et al.* (2001). Modificado.

Figura 4. Pluviometría media anual vs altitud en la vertiente pacífica de la zona central de Perú.



Fuente: Pouyaud *et al.* (2001). Modificado.

Figura 5. Pluviometría media anual vs altitud en la vertiente pacífica de la franja meridional de Perú.

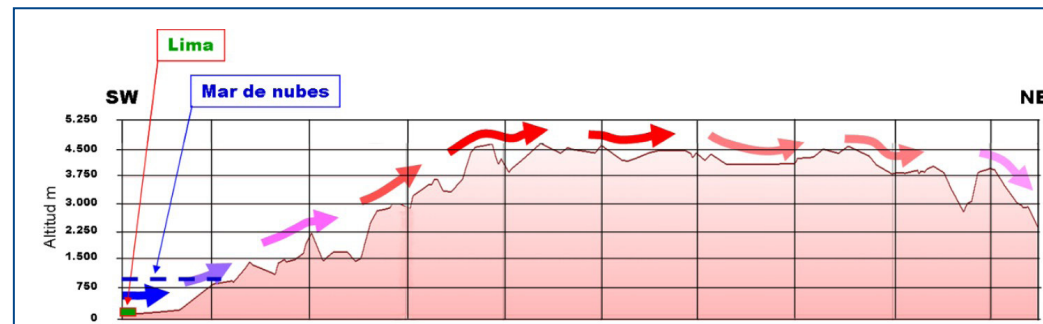
que ofrece un óptimo pluvial también del orden 1.000 mm, correspondiente a una altitud de unos 1.800 m. A mayor cota desciende de nuevo la precipitación media, que se situaría en unos 700 mm para cotas de 3.500 m.

Finalmente, en la franja más meridional (Figura 5), se observa una amplia zona con características desérticas desde la costa hasta cotas por encima de 1.500 m, que hace que a 3.000 m de altitud apenas se alcancen los 300 mm de aportación media anual. A mayores cotas la precipitación se incrementa con la altitud, sin llegar

a definirse un óptimo pluvial, con aportes medios todavía inferiores a 1.000 mm a cotas del orden de 5.000 m.

Teniendo en cuenta estos valores, y para estos frentes lluviosos procedentes del Pacífico, hemos generado una representación gráfica del comportamiento pluviométrico, válida para la vertiente pacífica peruana, excepto para la franja desértica más meridional del país (Figura 6).

Situación ésta que se identifica con nitidez en la imagen captada por el satélite



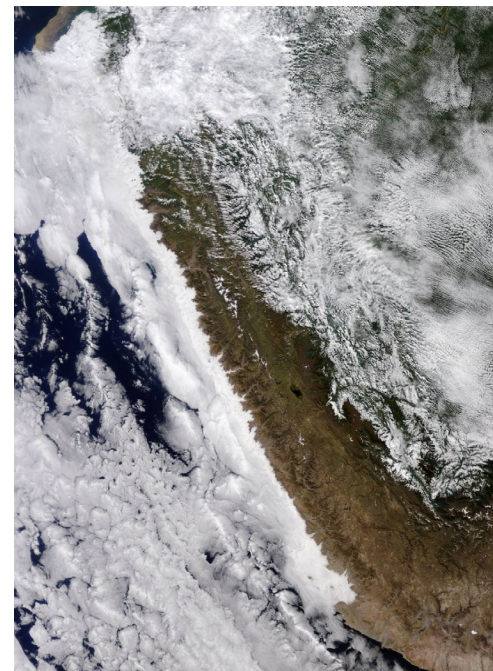
Elaboración propia.

Figura 6.
Corte transversal a los Andes desde Lima.

Terra de la NASA (Figura 7), el 28 de mayo de 2014, mediante el espectrorradiómetro (MODIS)³, que muestra el encuentro de los estratocúmulos oceánicos con la cordillera, en la baja atmósfera (dando lugar a esa lluvia fina persistente conocida como "garúa"), contorneando la topografía terrestre con precisión, y mostrando "ríos de nubes" que penetran por los valles; situación que no se da en el desierto meridional del Perú, cubierto por dunas de arena, donde el aire es seco y no se forman nubes.

NASA image courtesy Jeff Schmaltz, LANCE/ EOSDIS MODIS Rapid Response Team at NASA GSFC. Caption by Holli Riebeck.

Figura 7.
Los Andes peruanos entre mares de nubes.

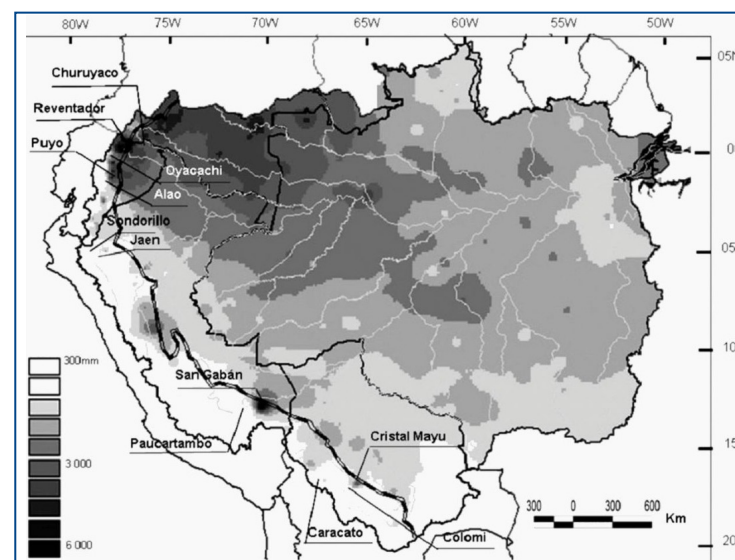


Precipitaciones en la vertiente peruana del Amazonas

Los vientos del oeste, que traspasan la barrera orográfica andina, alcanzan la cuenca amazónica con escasa humedad remanente, por lo que su aportación pluviométrica es muy escasa (Figura 6).

Por el contrario, los vientos alisios, procedentes del Atlántico y cargados de humedad, originan extensas descargas pluviométricas, al avanzar hacia el oeste sobre tierra firme. Por otra parte, y en las condiciones ecuatoriales de intensa evaporación a partir de zonas superficiales inundadas (ríos y lagos), y de elevada transpiración aportada por la selva amazónica, se originan importantes precipitaciones convectivas, que se desplazan paulatinamente hacia el oeste, por el empuje de esos vientos.

Esos frentes lluviosos, al aproximarse a los altos relieves andinos, acusan de nuevo el efecto alimétrico de máximo pluvial, para decrecer con la altura, al tiempo que se curvan hacia el sur, para llevar sus lluvias por el flanco de la cordillera, hacia áreas más meridionales (Figura 8).



Fuente: Espinoza Villar et al. (2010).

Figura 8 . Lluvia media anual 1975-2003 (en mm/año).
La línea en blanco y negro corresponde a la cota de 500 m snm.

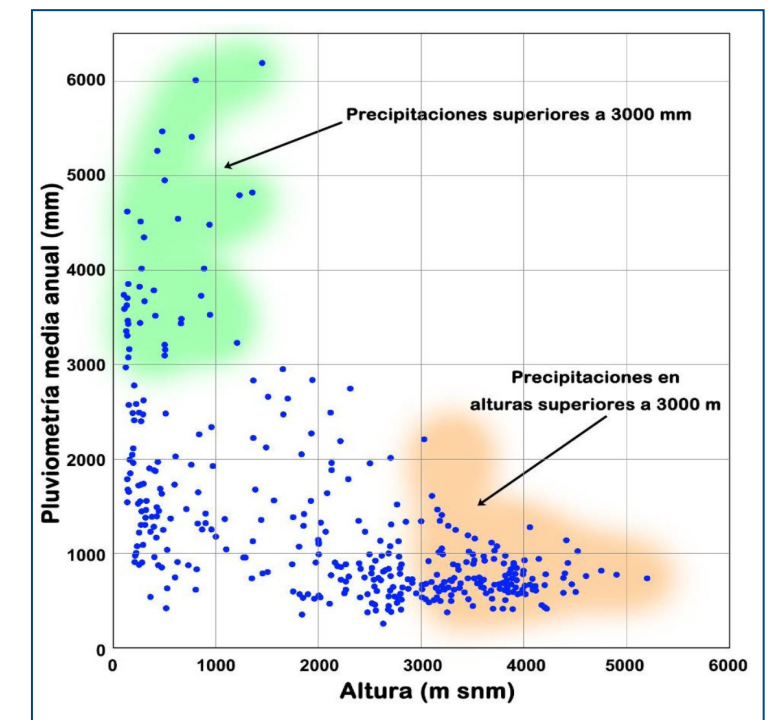
En este contexto el muy documentado estudio de Espinoza Villar et al. (2010), en el marco del programa de investigación "Hidrología y Geodinámica de la Cuenca Amazónica" (HYBAM), a partir del análisis de 756 estaciones pluviométricas, pone en evidencia la disminución de las precipitaciones con la altitud, en el reborde oriental de la cordillera de los Andes, aunque las diferencias en los registros entre estaciones situadas a sotavento y a barlovento (y la presencia del efecto foehn⁴, añadimos), no hacen fácil el establecimiento de una relación sencilla pluviometría vs altitud.

En el mapa de isoyetas (Figura 8), elaborado por estos autores, se constata que, independientemente de los registros pluviométricos más altos (3.000 a 3.500 mm/año), localizados en el sector noroeste de la cuenca amazónica, se evidencia un máximo pluvial en el reborde oriental de la cordillera, siguiendo aproximadamente en Perú la cota de los 500 m snm, con diferentes valores pluviométricos máximos, pero siempre con una disminución de la pluviometría hacia el oeste, al elevarse la altura hacia los Andes.

Como ya mencionan los autores, al analizar los datos de 391 estaciones pluviométricas, situadas en el sector andino de la cuenca amazónica, se constata la disminución de la pluviometría con la altitud. A partir de su documentación gráfica mostramos la Figura 9, la cual permite resaltar que las precipitaciones superiores a 3.000 mm se encuentran por debajo de los 1.500 metros de altitud, mientras que por encima de los 3.000 m las precipitaciones son prácticamente inferiores a 2.500 mm, y en general a 1.500 mm, evidenciando esa inversión por lo que también las cabeceras de cuencas andinas, de la vertiente amazónica, reciben menos aportes que zonas topográficamente más bajas. Pudiendo estar situado el máximo pluvial entre los 500 y los 1.500 m snm.

Precipitaciones en el contexto global peruano

No queremos cerrar esta perspecti-



Fuente: Espinoza Villar et al. (2010).

Figura 9. Pluviometría media anual vs altitud en estaciones pluviométricas de los países andinos en la cuenca amazónica.

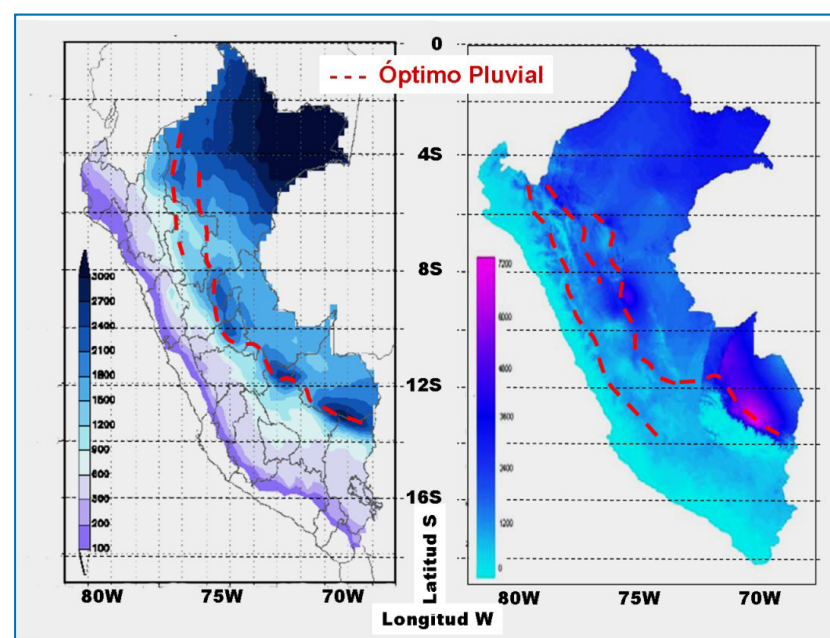
va sin ofrecer una visión global de la pluviometría del Perú, completándola en este enfoque de los óptimos pluviales, y lo hacemos en base a la publicación de Halcrow - OIST (2011), que incluye tres mapas de precipitación media anual.

De ellos hemos seleccionado el mapa a) de la Figura 10, correspondiente a datos satelitales de la Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM et al.), y el mapa b) incluido también en la Figura 10, elaborado mediante "cokriging", a partir de datos de SENAMHI y del MDT (Halcrow - OIST, 2011). Ambos mapas pluviométricos dentro de la similitud muestran diferencias, dado que parten de distintos datos y periodos de referencia, y se obtienen por distinto proceso de tratamiento.

Pero, en todo caso, cuando dibujamos sobre ambos mapas lo que serían las líneas del óptimo pluvial, identificadas por los máximos pluviométricos, se constata que se sitúan a ambos lados de la cordillera, y no sobre las cabeceras de las cuencas andinas. Incluso se dice literalmente en esta publicación: "en la vertiente del Atlántico, al este de las montañas hay más lluvia en la parte baja de las montañas y en la selva, que en alturas elevadas".

³ <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=83796>.

⁴ El viento foehn se produce en relieves montañosos cuando una masa de aire cálido y húmedo asciende para salvar ese obstáculo orográfico.



a) Fuente: TRMN y otros.
Elaborado por: IGP/CPNTC

b) Fuente: Halcrow Group
Ltd – OIST S.A. (2011).

Figura 10. Precipitación media anual en Perú y localización de los óptimos pluviales.

Es, por tanto, un documento más que evidencia lo que se deduce a partir de investigaciones de diferentes fuentes las cuales, sin abordar el tema del óptimo pluvial, sin embargo aportan evidencias del mismo, con una localización que no se corresponde con las cabeceras de cuencas.

Conclusión

Con criterios científicos se demuestra que las cabeceras de cuencas andinas peruanas, en las que se sitúan muchos yacimientos minerales del Perú, e importantes minas, no son el lugar "donde se originan las aguas", según se expresa en el Artículo 75 de la Ley de Recursos Hídricos (Ley 29338), de 2009.

En consecuencia no se justifica que, por este motivo, se puedan "declarar zonas intangibles en las que no se otorga ningún derecho para uso, disposición o vertimiento de agua."

Adenda

Existen otros condicionantes, en las cabeceras de cuencas andinas, como puede ser la existencia local de glaciares, a los que se deba prestar especial atención; podrán estar presentes ecosistemas frágiles, al igual que en cualquier otro sector de la cuenca, que requieran estudios

sistémicos, como hoy acomete la minería responsable. Pero no se puede por ello excluir la explotación minera aunque, al igual que acontece con cualquier otra actividad humana, necesaria para la calidad de vida y la vida de calidad, no hay minería con impacto cero.

En este contexto hidroclimático, aquí presentado, lanzamos el reto a las empresas mineras, para coordinar una investigación global, a partir de la valiosa documentación pluviométrica acumulada en sus áreas de actuación, junto a los registros disponibles en instituciones peruanas con responsabilidad en temas meteorológicos, para contribuir al mejor conocimiento del comportamiento pluviométrico andino.

Agradecimientos

A Carlomagno Bazán Melgar, Mario Cedrón Lassús, Javier Fernández Lorca, Walter Obando Licera y Julio Verdejo Serrano, así como FRASA Ingenieros Consultores, por sus aportes documentales y sus comentarios al contenido de esta investigación.

Bibliografía

- Espinoza Villar, J.C.; Ronchail, J.; Lavado, W.; Carranza, J.; Cochonneau, G.; De Oliveira, E.; Pombo, R.; Vauchel, P. & Guyot, J. (2010). Variabilidad espacio-temporal de las lluvias en la cuenca amazónica y su relación con la variabilidad hidrológica regional. Un enfoque particular sobre la región andina. *Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA* (2), 99-130.
- Fernández Rubio, R.; López García, L. Martins Carvalho, J. (2012). Componente hídrico del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Minero Conga (Cajamarca – Perú). *Dictamen Pericial Internacional. Presidencia del Consejo de Ministros de Perú*. 261 pp.
- Halcrow Group Ltd – OIST S.A. (2011). Atlas del potencial hidroeléctrico del Perú. MEM/DGER/DFC/GEF. 50 pp.
- Pouyaud, B., Yerrén Suárez, J., Arboleda Orozco, J.F. y Suárez Alayza, W.A. (2001). Variabilidad pluviométrica, a escalas anual y cuatrimestral, en la vertiente peruana del Océano Pacífico. *IRD & SENAMHI*. 177 pp.