Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Cooperación Suiza en Bolivia

Agua Sustentable

TEMÁTICA: HIDRO-CLIMA

VARIABILIDAD DE PARÁMETROS CLIMÁTICOS REGISTRADOS EN LAS MICROCUENCAS SURURÍA Y JARUMA, CORDILLERA OCCIDENTAL DE LOS ANDES, BOLIVIA

Dr. Ing. Freddy Soria Céspedes
2013

CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCIÓN	3
El agua	3
La hidrología y la hidroclimatología	4
2. EL CLIMA EN LOS ANDES TROPICALES Y EL ALTIPLANO	5
3. EL CLIMA EN LA CUENCA DEL RÍO SAJAMA Y EN LAS MICROCUENCAS SURURÍA Y JARUMA	6
Condiciones generales y datos disponibles	6
Condiciones particulares	8
Clima en la cima del volcán Sajama, en las microcuencas Sururía y Jaruma e impactos del ENSO en el clima de la zona	10
4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	17
RECONOCIMIENTOS	18
5. REFERENCIAS	18

MONITOREO HIDROLÓGICO PARA EL ESTUDIO DE RELACIONES PRECIPITACIÓN-ESCURRIMIENTO EN MICROCUENCAS CON PRESENCIA DE BOFEDALES EN LA CORDILLERA OCCIDENTAL DE LOS ANDES, BOLIVIA:

VARIABILIDAD DE PARÁMETROS CLIMÁTICOS REGISTRADOS EN LAS MICROCUENCAS SURURÍA Y JARUMA, CORDILLERA OCCIDENTAL DE LOS ANDES, BOLIVIA

1 INTRODUCCION

Es en extremo posible que la influencia de los humanos en el clima hubiese causado más de la mitad del incremento en la temperatura global promedio desde 1951 a 2010. Existe alta confianza en la comunidad científica de que tal influencia ha calentado el océano, derretido la nieve y el hielo, elevado el nivel medio de los mares y cambiado algunos extremos del clima en la segunda mitad del siglo veinte. Acerca de la pregunta de cuánto más el planeta podría calentarse si los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera se duplicasen, el Cuarto Reporte de Asesoramiento sugirió valores por debajo de los 3.6 grados centígrados. El nuevo reporte sugiere que la elevación tiene los niveles más bajos en los 2.7 grados, volviendo al consenso científico que prevaleció desde 1979 a 2007; sin embargo, el peor escenario contempla un calentamiento de entre 2,6 y 4,8 grados. El párrafo reporta un extracto del comunicado de prensa (New York Times, del 19 de agosto de 2013), donde el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) anunciaba la futura entrega del Quinto Reporte de Asesoramiento para el próximo 30 de septiembre.

Existen tres componentes del sistema terrestre que han acompañado a la humanidad en su evolución: el tiempo, el clima y el agua. El tiempo traduce un fenómeno instantáneo, cambiante y en cierto modo irrepetible; es el estado de la atmósfera en un momento y lugar determinados. El clima, por otro lado, aunque se refiere a los mismos fenómenos, los traduce a una dimensión más permanente duradera y estable; es una sucesión periódica de tipos de tiempos (Casas y Alarcón, 1999). El agua, en todos sus estados y principalmente desde los grandes reservorios de los mares y océanos, es parte de la atmósfera, escenario de la ocurrencia del tiempo. Entre la atmósfera y la superficie terrestre se produce un intercambio permanente de calor a través de los movimientos constantes del aire, la evaporación y la condensación del vapor de agua. Cualquier alteración en la atmósfera, inducida por variaciones de la temperatura media del aire y de la temperatura de la superficie terrestre, alteraría el sistema y provocaría trastornos en las formas de vida (Solomon *et al.*, 2007). La variabilidad natural del clima y el cambio climático provocado por el hombre están transformando las perspectivas para la agricultura y la producción de alimentos, representando una amenaza para los recursos hídricos en unas zonas, mientras que amplían la temporada de crecimiento de los cultivos en otras (Solomon *et al.*, 2007; OMM, 2012). Una información meteorológica, climática e hidrológica es fundamental, entre otras razones, para orientar las actividades del sector alimentario y agrícola (OMM, 2012).

1.1 El agua

El agua como elemento principal para el sustento y la agricultura ha sido la pieza clave en el desarrollo de la civilización (Asawa, 2008). A lo largo de esta historia, los filósofos griegos iniciaron el camino en el entendimiento, por separado, de los procesos del agua en la naturaleza, pero no fue sino hasta el año 1694 cuando se proveyó evidencia convincente de la forma del ciclo hidrológico aceptado en la actualidad: a través de un trabajo donde se procedió a realizar

mediciones de precipitación y caudales en la parte alta del río Sena, demostrando que la primera era suficiente para sostener el flujo en el río (Shaw *et al.*, 2011).

La hidrología ha evolucionado, desde el momento de su instauración en la currícula académica en la década de los 40, hasta los adelantos de los últimos años cuyo objetivo se ha concentrado en pretender llenar la laguna que existe entre el gran potencial de aplicación de potentes herramientas computacionales para la resolución de complejos esquemas numéricos y la capacidad que en la actualidad tenemos para producir, generar y colectar toda la información implícita en el medio que nos rodea (Uhlenbrook *et al.*, 2002; Hughes, 2012).

En los últimos 50 años, la necesidad de cerrar la brecha entre la práctica y la investigación ha promovido el interés por combinar datos recolectados en estudios de campo con el potencial de la modelación numérica. El advenimiento de fuentes de información no tradicionales y las nuevas técnicas de investigación, a su vez han incrementado el creciente interés y la necesidad por ampliar el conocimiento actual del dominio de la hidroclimatología sobre los diferentes caminos que recorre el agua a lo largo del ciclo hidrológico, a escalas de cuenca y globales (Shaw *et al*., 2011).

1.2 La hidrología y la hidroclimatología

La hidrología es la ciencia que estudia la ocurrencia y el movimiento del agua sobre y debajo de la superficie de la Tierra, sus propiedades químicas y físicas, sus relaciones con el medio biótico y abiótico y los efectos del ser humano sobre la misma, desde una perspectiva con predominancia hacia los procesos del ciclo hidrológico que ocurren en la superficie (Shelton, 2009). La climatología es una ciencia aplicada que examina los flujos horizontales y verticales de energía, masa y momentum entre las superficies de la tierra, los océanos y la atmósfera; por otro lado, la meteorología es el estudio del tiempo y los movimientos de la atmósfera a escalas de tiempo cortas (Shelton, 2009).

Conceptualmente, la hidroclimatología reconoce que el clima es la fuerza que rige el ciclo hidrológico (Shelton, 2009). Esta rama del conocimiento constituye la intersección entre el estudio de la hidrología y la climatología, al enfocarse en el estudio de la influencia del clima sobre las aguas de la superficie de la Tierra. Su estudio define la investigación e interpretación de la humedad en sus tres fases, en la atmósfera y en la superficie terrestre, incluyendo los intercambios de humedad y energía entre la superficie y la atmósfera, además del transporte de humedad en la atmósfera (Shelton, 2009). La hidroclimatología incorpora la atmósfera, los océanos y los suelos, y sus interrelaciones a través de intercambios de energía, masa y momentum; esta rama del conocimiento provee la estructura para analizar las formas en que el clima ocasiona variaciones en la ocurrencia espacio-tiempo de los componentes del ciclo hidrológico y a escalas amplias (Shelton, 2009).

La hidrometeorología tiene un enfoque ingenieril, al concentrarse en la medición y análisis de datos de precipitación, en su extrapolación en el espacio, la definición de probabilidades de ocurrencia de eventos de inundación y eventos de precipitación y en el análisis de la intensidad de las tormentas, además de proveer elementos para el diseño de estructuras hidráulicas (Shelton, 2009). La hidroclimatología enfatiza el balance (o desbalance) en las relaciones precipitación-escurrimiento, su distribución durante el año y la significancia de este balance-desbalance (Shelton, 2009). En la presente consultoría, ambos conceptos son estudiados y aplicados, dada su relevancia hacia los objetivos del proyecto. Para el efecto, el objetivo del presente informe es estudiar los datos generados en las estaciones de las microcuencas Sururía y Jaruma y colocarlos en el contexto de la variabilidad climática de la cuenca del río Sajama, para incrementar el conocimiento sobre la

misma. La significancia del balance-desbalance entre las relaciones precipitación-escurrimiento, es el siguiente paso lógico en el estudio presente.

2 EL CLIMA EN LOS ANDES TROPICALES Y EL ALTIPLANO

Los patrones de tiempo y clima en Sud América contemplan características del trópico, subtrópico y extratrópico (Garreaud *et al.*, 2008). La variabilidad del clima a escala interdecadal, interanual y estacional es resultado de la superposición de varios fenómenos de escala global y elementos geográficos (Vuille, 1999; Garreaud *et al.*, 2003; Garreaud *et al.*, 2008; Martinez *et al.*, 2011). Entre los fenómenos globales están: el desplazamiento de la Zona de Interconvergencia Tropical (ZCIT), los vientos del norte, forzantes de altas latitudes como la Oscilación Antártica (AAO) y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y el gradiente meridional de la temperatura de la superficie del mar (SST) sobre el Atlántico tropical (Garreaud *et al.*, 2008; Martinez *et al.*, 2011). Entre los elementos geográficos están Los Andes y los elementos que se desarrollan sobre el Escudo Brasileño. El primero representa un obstáculo para el transporte de humedad, dando lugar a condiciones áridas hacia el oeste y condiciones extratropicales hacia el este (Garreaud *et al.*, 2003; Garreaud *et al.*, 2008). El Escudo Brasileño también tiende a bloquear la circulación baja sobre el continente y su enorme extensión de tierra proporciona las condiciones para el desarrollo de tormentas convectivas que alimentan el bosque lluvioso más grande del planeta, en la cuenca del río Amazonas (Garreaud *et al.*, 2008).

La Oscilación Sur El Niño (ENSO) es el principal elemento que define la variabilidad interanual del clima sudamericano (Garreaud *et al.*, 2008; Garreaud, 2009; Martinez *et al.*, 2011). El ENSO es un fenómeno que tiene fuertes efectos sobre Ecuador, Perú y Chile. Se ubica en el sistema océano-atmósfera del Pacífico tropical y se caracteriza por fluctuaciones irregulares de 2 a 7 años entre condiciones cálidas (El Niño) y frías (La Niña) (Vuille, 1999; Garreaud *et al.*, 2003; Garreaud *et al.*, 2008; Garreaud, 2009). Sobre el Altiplano, tal influencia se refleja en años con precipitación por debajo de la media durante la ocurrencia de El Niño, tendencias a incremento en la temperatura del aire y condiciones opuestas durante la ocurrencia de La Niña (Garreaud *et al.*, 2008; Garreaud, 2009. Tal relación no siempre es evidente cuando la fase de El Niño se desplaza en relación al verano austral del Altiplano (Martinez *et al.*, 2011). Durante los años con condiciones El Niño, el gradiente termal meridional es mayor entre el trópico y el subtrópico, resultando en vientos del oeste más intensos que ocasionan menor transporte de humedad desde el interior del continente y limitada convergencia sobre el Altiplano; nuevamente, anomalías en estos patrones resultan en condiciones alternadas de humedad y aridez entre las partes sur y norte del Altiplano (Garreaud, 2009).

En los Andes tropicales de Bolivia y Perú, a escala estacional (intranual) el clima se caracteriza por periodos húmedos y secos prolongados, en respuesta a las fluctuaciones de la ZCIT, del Anticiclón del Pacífico Sur (SPAC) y la alta subtropical o alta boliviana (Garreaud *et al.*, 2008; Martinez *et al.*, 2011). La estabilidad estática del SPAC se mueve en dirección a los polos durante el verano austral y hacia el ecuador durante el invierno, atrapa humedad en una capa cerca de la superficie y evita el transporte de humedad desde el este hacia los Andes (Martinez *et al.*, 2011). La relevancia de la intensidad y posición del SPAC es su probable relación con las fases del ENSO (Martinez *et al.*, 2011). Por el contrario, la relevancia de la alta boliviana está en que además de influir en la variabilidad estacional de las lluvias en Sud América (Lenters and Cook, 1997), la misma es también responsable del transporte de humedad hacia los Andes en el periodo diciembre-marzo, cuando la misma se intensifica cuando el verano incrementa la temperatura del Altiplano, al cual convierte en una fuente de calor atmosférico (Lenters and Cook, 1997); la alta boliviana se debilita

en abril, en coincidencia con el desplazamiento hacia el norte de ZCIT (Garreaud *et al.*, 2008; Martinez *et al.*, 2011).

3 EL CLIMA EN LA CUENCA DEL RÍO SAJAMA Y LAS MICROCUENCAS SURURÍA Y JARUMA

3.1 Condiciones generales y datos disponibles

Las condiciones en la región de estudio son una respuesta a las condiciones generales descritas en los subtítulos precedentes. La precipitación disminuye a medida que se incrementa la distancia a las fuentes de humedad del Atlántico tropical y la cuenca del río Amazonas, lo que define que la línea de nieve sobre los glaciares de la Cordillera Occidental de los Andes en Bolivia se eleve de este a oeste (Thompson *et al.*, 1998). En la Cordillera Occidental, los vientos del este son los responsables de los incrementos en la humedad específica; por otro lado, los vientos del oeste, que son secos debido a la presencia del desierto de Atacama, previenen el transporte de humedad desde la Amazonía y el Chaco hacia la región oeste del Altiplano (Vuille, 1999). La consecuencia de esta interacción es un clima semiárido, con tasas de precipitación de 350 mm concentradas principalmente en el periodo diciembre-marzo (Vuille, 1999). Durante el invierno austral (junio a agosto), es frecuente la ocurrencia de heladas y nevadas aisladas, ocasionadas por la intrusión de masas polares que sobre el hemisferio sur viajan en dirección norte, guiadas por la zona planetaria de vientos del oeste (Vuille, 1999). A escala diurna, la literatura indica que los patrones de precipitación en estaciones situadas en el Altiplano tienen un comportamiento donde las máximas frecuencias e intensidades ocurren entre la tarde y el inicio de la noche, como producto del calentamiento de la superficie por efectos de la insolación y la consecuente desestabilización de las capas bajas de la tropósfera (e.g., Garreaud et al., 2003). A escalas menores, durante la época de lluvias la lluvia tiende a concentrarse en secuencias de cerca de una semana de duración, separadas por secuencias similares de periodos secos (Aceituno y Montecinos, 1993).

Para individualizar y enfocar el análisis general que presenta la literatura hacia la región de interés, se dispone de datos capturados en las 10 estaciones meteorológicas presentadas en la figura 1. Estas estaciones tienen registros consistentes y pertenecen a una misma zona de comportamiento homogéneo desde una perspectiva estadística, según el criterio de Iriarte (2005). De aquel grupo de estaciones y de acuerdo al criterio de García (2012), únicamente dos estaciones (Sajama, 4265 msnm y Chungará Ajata, 4563 msnm) tienen registros útiles para la realización de un estudio agroclimático para la cuenca del río Sajama. Para el sitio de la estación Sajama, se tiene datos de dos periodos: el primero de julio de 1977 a diciembre de 1985 y el segundo desde el 11 de diciembre de 2004. La revisión de documentos y artículos sugiere que durante el primer periodo, la captura se realizó mediante instrumentos de la marca Campbell a través del programa de la ORSTOM; la captura del segundo periodo se realizó mediante instrumentos de la marca Handar, con lectura a escala diaria de información de sensores de precipitación, temperatura del aire, humedad relativa del aire, radiación solar y dirección del viento (SENAMHI-IRD, 2006). Para Chungará Ajata, aunque no se cuenta con información de los tipos de instrumentos de la estación, para el estudio presente se dispone de información a escala media mensual de las variables precipitación, temperatura máxima y mínima del aire, en el periodo mayo de 1982 a mayo de 2011; para el periodo 2010-2011 se cuenta con registros a escala diaria de las variables mencionadas.

Adicionalmente a las estaciones Sajama y Chungará Ajata, se cuenta con dos estaciones meteorológicas instaladas en las microcuencas de altura Sururía (antes Comisario, ver Soria, 2013) (4595 msnm) y Jaruma (4427 msnm). En estas dos estaciones, el registro de información se realiza

a través de instrumentos HOBO U30-NRC, donde se instalaron sensores de precipitación, temperatura del aire, humedad relativa del aire, radiación solar, dirección y velocidad del viento para medir las variables correspondientes a escalas mayores a la horaria. La base de datos para el análisis está constituido por las últimas cuatro estaciones citadas (ver su ubicación en la figura 2). En la base de datos se incluye también los registros meteorológicos obtenidos por una estación automática con datalogger Campbell CR10X que fue instalada en el pico del volcán Sajama (6542 msnm), con registros del periodo 1996-1998 (Hardy *et al.*, 1998; Vuille *et al.*, 2001); estos periodos coinciden con la ocurrencia de una La Niña moderada (1996-1997) y luego El Niño más fuerte del siglo (1997-1998) (Vuille *et al.*, 2001).

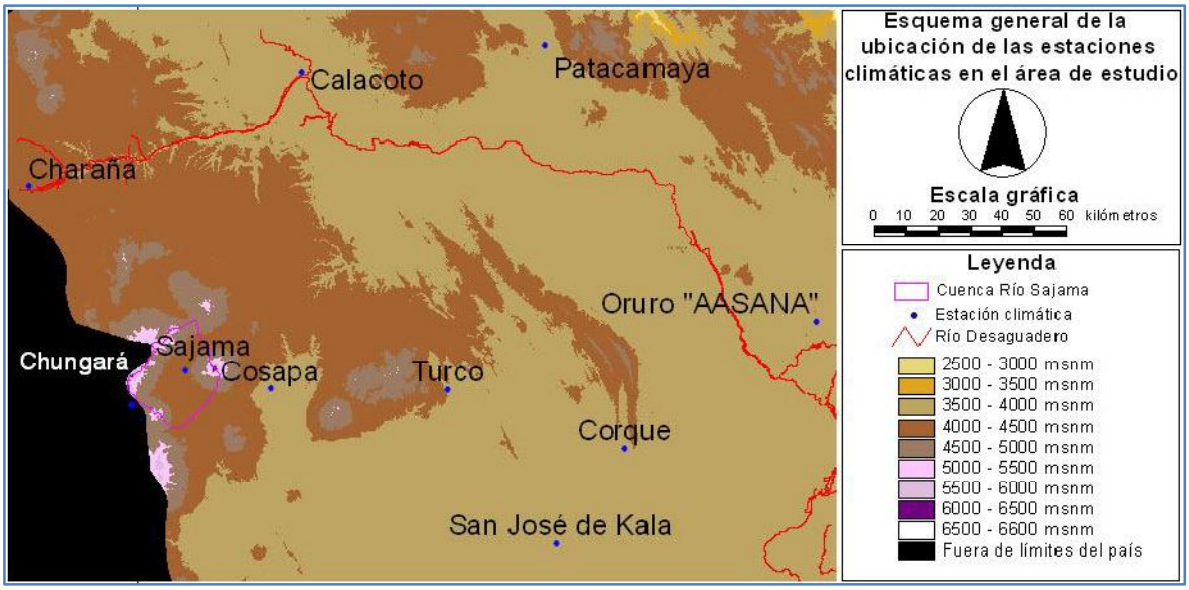

Figura 1 Ubicación de estaciones climáticas con registros consistentes, situadas en el área de influencia de la región de estudio, según el criterio de Iriarte (2005). La figura es extraída de Soria (2013)

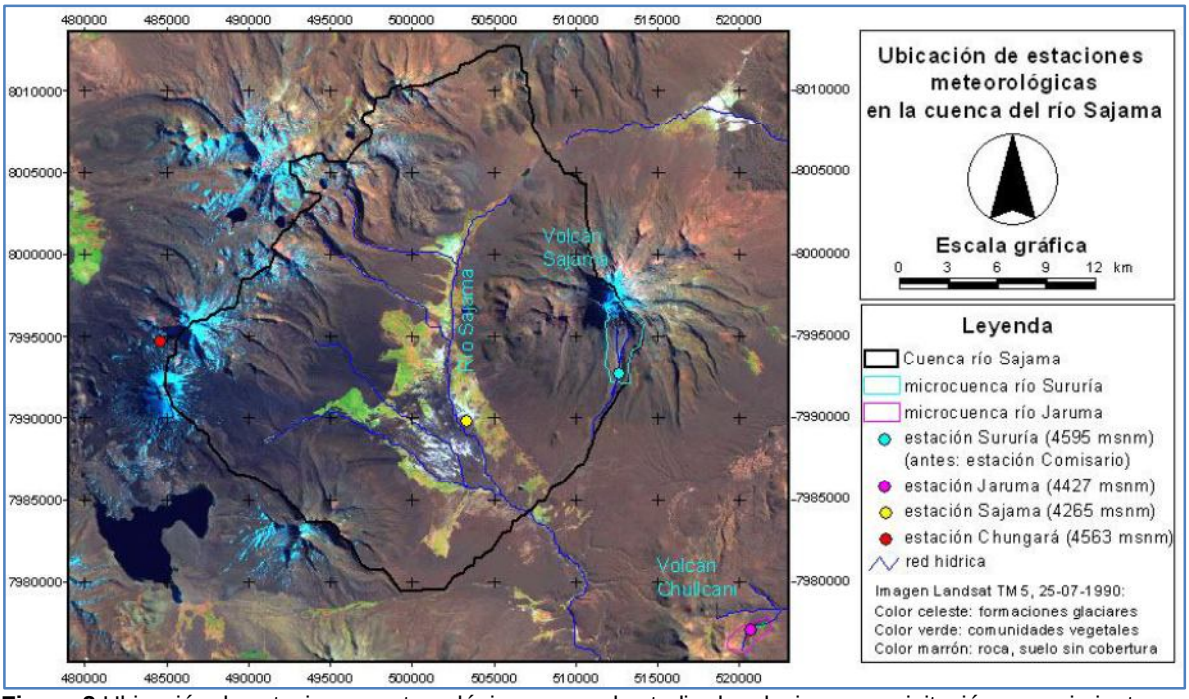

Figura 2 Ubicación de estaciones meteorológicas, para el estudio de relaciones precipitación-escurrimiento en la cuenca del río Sajama. La red hídrica así como las alturas aproximadas presentadas fueron obtenidas mediante análisis del modelo de elevación digital (DEM) del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

3.2 Condiciones particulares

La descripción y análisis de los datos de Sajama, Chungará Ajata y estaciones adyacentes llevado a cabo en García (2012) indica lo siguiente:

i) Temperaturas mínimas en la estación Chungará Ajata:

- La temperatura mínima del aire en Chungará Ajata es en promedio 2.5^{o}C menor a la registrada en Sajama, como consecuencia de la diferencia de altitud de instalación de las estaciones.
- Se estima que la tasa altitudinal de variación de la temperatura del aire es de aproximadamente 0.6^{o}C por cada 100 m.
- En referencia al potencial de ambos sitios para cobijar agricultura del tipo anual, la ocurrencia de temperaturas por debajo de los 0°C sugiere que tal actividad no es posible. Al respecto, García (2012) sugiere que la única actividad agrícola posible de desarrollar en la zona está relacionada a praderas nativas poco productivas y humedales de altura.
- El análisis histórico de las tendencias de la serie de Chungará Ajata sugiere que aunque las temperaturas mínimas tienen ciclos anuales, existe una tendencia al incremento de las temperaturas mínimas del aire en el futuro. Las tasas de incremento respectivas son de 0.046^{o}C para las temperaturas mínimas del verano, mientras que la tasa para las temperaturas mínimas del invierno es de 0.020^{o}C. La hipótesis de García (2012) para explicar el porqué existe mayores tasas de incremento en verano, se concentra en un probable incremento histórico de la variable humedad relativa del aire; sin embargo, la ausencia de datos históricos de la humedad relativa del aire no permitió que la hipótesis planteada sea aceptada o refutada.

ii) Estación Sajama y estación Chungará Ajata: variaciones diurnas

- La temperatura mínima en la estación Sajama presentó microciclos de ascenso y descenso periódico con duración de 3 a 5 días.
- En la estación Sajama, para el periodo 1977-1981, la persistencia en la ocurrencia de temperaturas mínimas por debajo de los 0°C sugiere que en aquellos años hubiese sido imposible la instauración de cultivos anuales; sin embargo, al analizar los datos del periodo 2010-2011 en la estación Chungará Ajata, ocurrieron 74 eventos por año donde se registraron temperaturas mínimas por sobre los 0°C, reduciéndose las limitantes a las actividades agroclimáticas, especialmente para cultivos de ciclo muy corto.

iii) Estación Sajama y estación Chungará Ajata: temperaturas máximas diarias

- Las temperaturas en ambas estaciones son mayores a otras registradas en sitios del Altiplano norte, sin embargo, tienen similares patrones de variabilidad. La hipótesis que García (2012) maneja es que la zona presente es más seca a otras del Altiplano norte. Desde una perspectiva agroclimática, García (2012) indica que esta variable no constituye una limitante.
- Contrariamente a lo observado en los registros de temperaturas mínimas del aire, los registros de las temperaturas máximas del aire no presentan tendencias claras que sugieran un incremento o disminución de la variable para el periodo histórico analizado.
- A escala diurna, la temperatura máxima en la estación Sajama presentó microciclos de ascenso y descenso periódico con duración de 3 y 6 días.

iv) Estación Sajama y estación Chungará Ajata: amplitud térmica

- La amplitud térmica, entendida como la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas del aire, tiene relación inversamente proporcional al contenido de humedad en el aire y al nivel de estrés de un cultivo (García, 2012). Este parámetro aparentemente tiene tendencia a la reducción, lo cual sin embargo, no sugiere que para el periodo analizado sea posible la introducción de cultivos anuales (García, 2012).

v) Patrones de precipitación

- La precipitación es menor a la registrada en otros sitios del Altiplano.
- En referencia a la influencia de la variación en la altitud de los sitios de las dos estaciones, García (2012) muestra que la media anual registrada en Chungará Ajata supera a la registrada en Sajama (369 mm a 321 mm); sin embargo, García (2012) atribuye tal diferencia a la falta de coincidencia entre los periodos de registros y a la mayor ocurrencia de periodos con El Niño en la serie de Sajama.
- No se logró encontrar una tendencia significativa al incremento o disminución de la serie histórica de la precipitación. Esta observación aplica también al análisis de extremos llevado a cabo en García (2012).

vi) Evapotranspiración de referencia

- La demanda máxima de agua ocurre entre octubre y enero, cuando la radiación solar llega a valores máximos para la zona y la humedad atmosférica es baja (García, 2012). La menor demanda de agua se identifica entre mayo y julio, cuando la radiación solar presenta valores bajos.

- Al comparar la precipitación registrada y la evapotranspiración de referencia calculada, García (2012) indica que las condiciones son áridas durante todo el año, alcanzando su máximo entre octubre y noviembre, y alcanzando los valores mínimos entre enero y febrero.
- Históricamente, la serie de evapotranspiración no muestra tendencias al incremento o decremento.

vii) Reconstrucción de las series históricas para la estación Sajama

- El análisis de correlación lineal efectuado en García (2012) sugiere que para la reconstrucción de la serie de temperaturas mínimas de la estación Sajama, se considere la serie de la estación Charaña. Por otro lado, para la reconstrucción de la serie de temperaturas máximas, García (2012) sugiere considerar las series de las estaciones Charaña y Chungará. El mismo criterio sugiere que para la reconstrucción de la serie de precipitación, se considere los registros de las estaciones Charaña (4057 msnm) y Chungará Ajata (4585 msnm). Al respecto, debido a que la estación Sajama (4265 msnm) se encuentra a una altura intermedia entre las dos estaciones citadas y dada la ausencia de datos de otras estaciones, se considera que el criterio de García (2012) es aceptable.

viii) Análisis de extremos para otras estaciones, dentro del área de influencia (según el criterio de García, 2012). Tomando como elementos de comparación a los registros de las estaciones Patacamaya, Calacoto y Charaña, el estudio de García (2012) sugiere:

- No se observa tendencias al incremento o decremento a escala media mensual histórica para las variables amplitud térmica, máximos y mínimos de las temperaturas máximas y mínimas y días con helada.
- A escala media anual, si se observaron tendencias al incremento para la variable temperatura máxima para las estaciones Patacamaya, Calacoto y Charaña. A la misma escala de análisis, el comportamiento de la variable temperatura mínima sugirió tendencias diferentes para las tres estaciones citadas.
- Existe una tendencia al incremento en las estaciones Patacamaya y Calacoto para la cantidad máxima de precipitación ocurrida en un día y la intensidad de precipitación. Charaña, por el contrario, no muestra tendencias a un cambio histórico.
- A escala media anual, los registros de las tres estaciones no sugiere cambio en la tendencia histórica de las series.
- Respecto a los valores mínimos y máximos de la temperatura máxima diaria, no se observan diferencias relevantes entre las tendencias descritas por las series de las tres estaciones citadas. Para los valores mínimos y máximos de la temperatura mínima diaria, únicamente para la estación Patacamaya se observa una tendencia la incremento.
- Desde el año 1980, no se encontró una tendencia al cambio en las series de medias anuales de las temperaturas mínimas diarias para ninguna de las estaciones.
- No se observan tendencias a cambio en las series de amplitud térmica.

3.3 Clima en la cima del volcán Sajama, en las microcuencas Sururía y Jaruma e impactos del ENSO en el clima de la zona

Hardy *et al.* (1998) y Vuille *et al.* (2001) recolectaron datos en el pico del volcán Sajama durante los periodos 1996-1997 y 1997-1998. Esta estación conjuntamente a la del nevado Illimani, constituyeron en su momento las más altas de todo el continente. Estos datos se contrastan con

los recolectados en las estaciones de las microcuencas Sururía en el periodo 2011-2013 (analizado en Soria, 2013b) y Jaruma (periodo julio-agosto de 2013) y proveen información importante para temas tales como la modelación hidrológica. El conocimiento de esta manera generado se describe a continuación.

i) Presión, periodo 1996-1997

- En el pico del Sajama, la presión atmosférica media es 460 hPa (Vuille *et al.*, 2001).
- La amplitud del cambio anual en la presión barométrica es pequeña, en el rango de 10hPa. Dentro de este ciclo existe un ciclo diario de 12 horas con amplitud de 1 a 2 hPa y máximas alrededor de los 1130 y 2230 (hora estándar local) (Hardy *et al.*, 1998).
- Las altas presiones durante el largo verano (noviembre a abril) refleja la intensificación de la alta boliviana (Hardy *et al.*, 1998).

ii) Radiación solar incidente, periodo 1996-1997

- Las máximas durante el verano alcanzaron 1200 W m^{-2} y 800 W m^{-2} durante el solsticio de invierno (Hardy *et al.*, 1998).
- A escala diurna, las máximas se registraron en octubre y noviembre. En el verano, de diciembre a febrero (marzo, inclusive), la advección de y las nubes convectivas sobre el Altiplano reducen la radiación solar. En invierno, se reduce la cobertura de nubes. Luego, la variabilidad día a día se remite a la ocurrencia de nubosidad (Hardy *et al.*, 1998).
- Los máximos valores de irradiación global medidos en cielo despejado alcanzaron aproximadamente 85% de la irradiación directa en la parte alta de la atmósfera, reflejando la altitud de la estación y la seca atmósfera sobre el Altiplano (Hardy *et al.*, 1998).
- La aparente reducción en los valores de radiación medidos en las estaciones se remiten a la acumulación de nieve sobre los instrumentos. Durante las horas sin cobertura de nubes, sin embargo, Hardy *et al.* (1998) sugiere que las estaciones reproducen adecuadamente las condiciones naturales.
- En mayor magnitud durante el verano que durante el invierno, la cobertura de nubes en general se incrementa entre las 1200 y las 1700, alcanzando máximos alrededor de las 1800 y disminuyendo hasta la medianoche (Garreaud and Wallace 1997, citado en Hardy *et al.*, 1998).

iii) Radiación solar, periodo 2011-2013

- En la estación Sururía, la estacionalidad de la radiación solar está también marcada, con máximos al final de noviembre y mínimos durante el inicio del invierno (Soria, 2013b). Los valores mínimos de 89 W m^{-2} registrados en el invierno se repiten en el verano durante la ocurrencia de las precipitaciones; para la misma variable, los máximos extremos de 1270 W m^{-2} ocurren únicamente durante el inicio del verano, antes de la llegada de la época de lluvias (Soria, 2013b). En Jaruma, los máximos de la radiación solar registrados durante el periodo julio-agosto de 2013 (único periodo con registros) fueron de 1128 W m^{-2}, ligeramente menores a los 1154 W m^{-2} registrados en Sururía (para el mismo periodo), a una elevación mayor.

iv) Temperatura del aire, periodo 1996-1997

- Las temperaturas siguen el ciclo anual de la radiación solar, con promedios de -7.5°C en enero a -14.1°C en junio y rango de variabilidad diurno mayor al rango de variabilidad

anual de 6.6°C. La desviación estándar antes del inicio del invierno en abril es de 4.6°C y el rango es de 13.1°C.

- Para sensores con cámaras no ventiladas, los valores instantáneos más altos medidos fueron 1.5°C en febrero y 1.7°C el 25 de enero (temperatura promedio horaria igual a -3.0°C). Este último dato demuestra que las medias horarias son más representativas que los valores instantáneos (Hardy *et al.*, 1998). Por otro lado, para cámaras con ventilación natural, los registros fueron notoriamente mayores, con promedios horarios de 10°C el 25 de enero a las 1200.
- Entre inicios de marzo hasta mediados de mayo, el incremento en el rango diurno de temperaturas coincide con la caída de las temperaturas mínimas observada en otras estaciones en el Altiplano. Este cambio ocurre en simultáneo con incrementos en la radiación solar, disminución en la humedad específica e incrementos en el rango diurno del contenido de vapor de la atmósfera, una caída abrupta en la presión atmosférica y un pronunciado incremento en la velocidad del viento (Hardy *et al.*, 1998). En conclusión, Hardy *et al.*(1998) sugiere que el cambio de verano a invierno ocurre de manera abrupta.

v) Temperatura del aire, periodo 2011-2013

- En la estación Sururía, la estacionalidad de la temperatura del aire así como su relación con la radiación solar, se observaron en Soria (2013b). Al respecto, la misma referencia citada indica que el modelo de regresión lineal que asume a la radiación solar como la variable explicativa, define únicamente el 45% de la variabilidad registrada en la variable temperatura del aire. Las desviaciones estándar respectivas son de 68 W m^{-2} y tan solo de 2°C, para las variables radiación solar y temperatura media del aire, respectivamente, a escalas diarias, cuando se considera datos de toda la población (Soria, 2013b). Cuando se considera únicamente datos del invierno de las dos microcuencas, por ejemplo en el periodo donde coinciden las series de Sururía y Jaruma (julio y agosto de 2013), las desviaciones estándar se incrementan para ambas series en sus variaciones diurnas en 5.2^{o}C y 4.7^{o}C, comparable a la desviación en el pico del volcán Sajama (4.6°C). De manera similar, el rango en invierno se incrementa a 27°C y 22°C, mucho mayor al medio anual. Mediante los datos de la estación Sururía, se confirma también las observaciones en el pico del Sajama, donde la ocurrencia del invierno se da lugar a través de una transición abrupta alrededor a mediados de mayo, antes de la llegada de episodios de precipitación aislados a partir del 17 de mayo del 2013 (figura 3d).
- La relación entre los tiempos de respuesta de la temperatura del aire media horaria al estímulo de la radiación solar en Sururía descrita en Soria (2013b) indica que los ascensos ocurren casi en simultáneo, con una diferencia en la etapa de recesión de tres horas de retraso de la temperatura respecto a la radiación solar. En la cuenca Jaruma, el retraso relativo entre las dos series es similar (figura 4a), también con un retraso de tres horas.

vi) Humedad, periodo 1996-1997

- En verano, la mediana de la humedad relativa fue mayor a 90%, reflejando una humedad específica media de 3.6 k kg^{-1} (Hardy *et al.*, 1998). Estos valores altos se deben al transporte vertical turbulento de humedad desde niveles bajos, además de procesos de advección (P. Aceituno and A. Montecinos 1997, citado en Hardy *et al.*, 1998). Entiéndase por humedad relativa (en %) a la relación entre la fracción molar del vapor de agua en una muestra de aire húmedo y la existente en una muestra saturada en las mismas condiciones de temperatura (Chow *et al.*, 1998); en otras palabras, es el porcentaje de vapor de agua

que contiene el aire en relación al contenido potencial de humedad. La humedad absoluta se entiende como la masa de vapor de agua por unidad de masa de aire seco (en kg agua/kg aire seco) (Chow *et al.*, 1998), o en otras palabras, es la cantidad de vapor de agua contenida en el aire.

- El invierno se caracteriza por ser seco, con valores de humedad relativa que por lo general no son menores al 20%. Vientos fuertes, presiones bajas, temperaturas bajas y nevadas ocasionales.
- A escala diurna, la humedad específica es más alta por las tardes, con picos desplazados respecto a la radiación solar con alrededor de 1 a 3 h (Hardy *et al.*, 1998). Por otro lado, la humedad relativa también se incrementa por la tarde pero únicamente en invierno, cuando la humedad específica es baja (Hardy *et al.*, 1998). Cuando la atmósfera está húmeda, ambas humedades no estarían correlacionadas (Hardy *et al.*, 1998).
- Las fluctuaciones diurnas de temperatura definen las fluctuaciones diurnas de la humedad relativa (Hardy *et al.*, 1998).
- La transferencia de masa turbulenta (la evaporación) es alta en invierno, cuando los gradientes de humedad entre la superficie de la nieve y del aire se incrementan debido al incremento de la velocidad del viento (Hardy *et al.*, 1998). Esta observación refuerza la relevancia de la necesidad de contar con datos de vientos para los análisis de balance de energía en superficies cubiertas por nieves y glaciares (*e.g.,* Sicart *et al.*, 2007).

vii) Velocidad y dirección del viento, periodo 1996-1997

- Datos de reanálisis de Hardy *et al.* (1998) indican que la variabilidad mayor se registra a mediados de mayo, cuando los vientos se aceleran y permanecen altos para la mayor parte de la época de invierno como resultado del movimiento en dirección norte de la zona de vientos del oeste.
- Las velocidades medias horarias de los vientos en invierno registradas fueron por sobre los 20 m s^{-1} entre mayo y octubre, con máximos de 27 m s^{-1} registrados en junio (Hardy *et al.*, 1998). En verano, las medias son de 2.6 m s^{-1}, con vientos del sudeste y del este, como fuente de sostén de niveles altos de humedad sobre el Altiplano (Hardy *et al.*, 1998). La dirección cambia hacia el norte y el noroeste, desde abril hasta agosto (Hardy *et al.*, 1998).
- A escala diurna, los vientos más bajos se registran por la tarde, durante las horas de máxima expansión de la tropósfera (Hardy *et al.*, 1998).

viii) Velocidad y dirección del viento, periodo 2011-2013

- En la estación Sururía, Soria (2013b), coincide con las apreciaciones de (Hardy *et al.*, 1998) sobre los datos en el pico del Sajama, al señalar que las velocidades máximas se registran durante el invierno (máximos de 8.4 m/s en valores medios diarios) mientras que durante la época húmeda ocurren los valores mínimos. al respecto y en números, la velocidad mayor registrada en la estación Jaruma es de 11.33 m/s, para el periodo julio-agosto de 2013; en la estación Sururía, los datos son inexistentes debido al malfuncionamiento del instrumento desde mayo de 2013. La explicación física del incremento de la velocidad del viento durante el invierno fue otorgada en los puntos previos.
- A escala diurna, los picos pueden ocurrir a distintas horas. Durante los meses sin ocurrencia de precipitación (invierno), en Jaruma, los mismos ocurren por lo general por las noches (figura 4a), mientras que en Sururía puede darse la ocurrencia de dos picos, el primero por la mañana y el segundo al final de la tarde (figura 3a).

ix) Precipitación (nieve) , periodo 1996-1997

- Octubre fue seco, con 14 cm de ablación y dos eventos de precipitación mayores en noviembre. A partir de allí, la acumulación continuó de diciembre a febrero (Hardy *et al.*, 1998).
- La ocurrencia de precipitación, tal como se describió previamente en el presente informe, en invierno se caracteriza por una circulación norte-este, mientras que en el verano se caracteriza por alta convección y transporte de humedad desde el este (Hardy *et al.*, 1998).
- A escala diurna, la precipitación ocurre entre las 1800 y las 2200 (Vuille *et al.*, 2001).
- La precipitación ocurre en episodios discretos en lugar de continuos, a pesar de que durante el verano la incidencia de radiación es alta (Vuille *et al.*, 2001).

x) Precipitación (nieve), periodo 2011-2013

- Aparte de la periodicidad estacional de las precipitaciones, Soria (2013c) sugiere que la distribución espacial de las precipitaciones es heterogénea. Los datos de Jaruma y Sururía confirman este hecho, al demostrar que no solamente en magnitud (periodo jul-ago 2013: 3 mm en Sururía y 0.4 mm en Jaruma) sino también en la fecha de ocurrencia.

xi) Impactos del ENSO en el clima de los periodos 1996-1997 y 1997-1998

El gradiente meridional de presiones al norte de la alta boliviana, es alto durante la ocurrencia de La Niña, incentivando el transporte de humedad desde el interior del continente hacia el Altiplano (Vuille *et al.*, 2001). Por el contrario, durante la ocurrencia de El Niño es común observar anomalías en los vientos del oeste, que son mayores a los normales, inhibiendo el transporte de humedad desde el este (Vuille *et al.*, 2001). La ocurrencia de El Niño tiene impactos directos en ubicar la línea de nieve a alturas notablemente mayores a la de los años precedentes (Arnaud *et al.*, 2001). Aparte de estas observaciones generales, la literatura provee los siguientes datos:

- Temperaturas del aire.- Se observó una disminución inusual en el periodo octubre 1996 a septiembre 1997, con valores menores a los anteriores 79 años (Hardy *et al.*, 1998). Luego, en el verano del periodo 1997-1998 se observó un incremento de alrededor de 1°C hasta febrero y de 1°C para marzo, abril y mayo.
- Precipitación.- El periodo noviembre de 1996 a marzo de 1997 fue más húmedo de lo normal en el Altiplano (Hardy *et al.*, 1998).

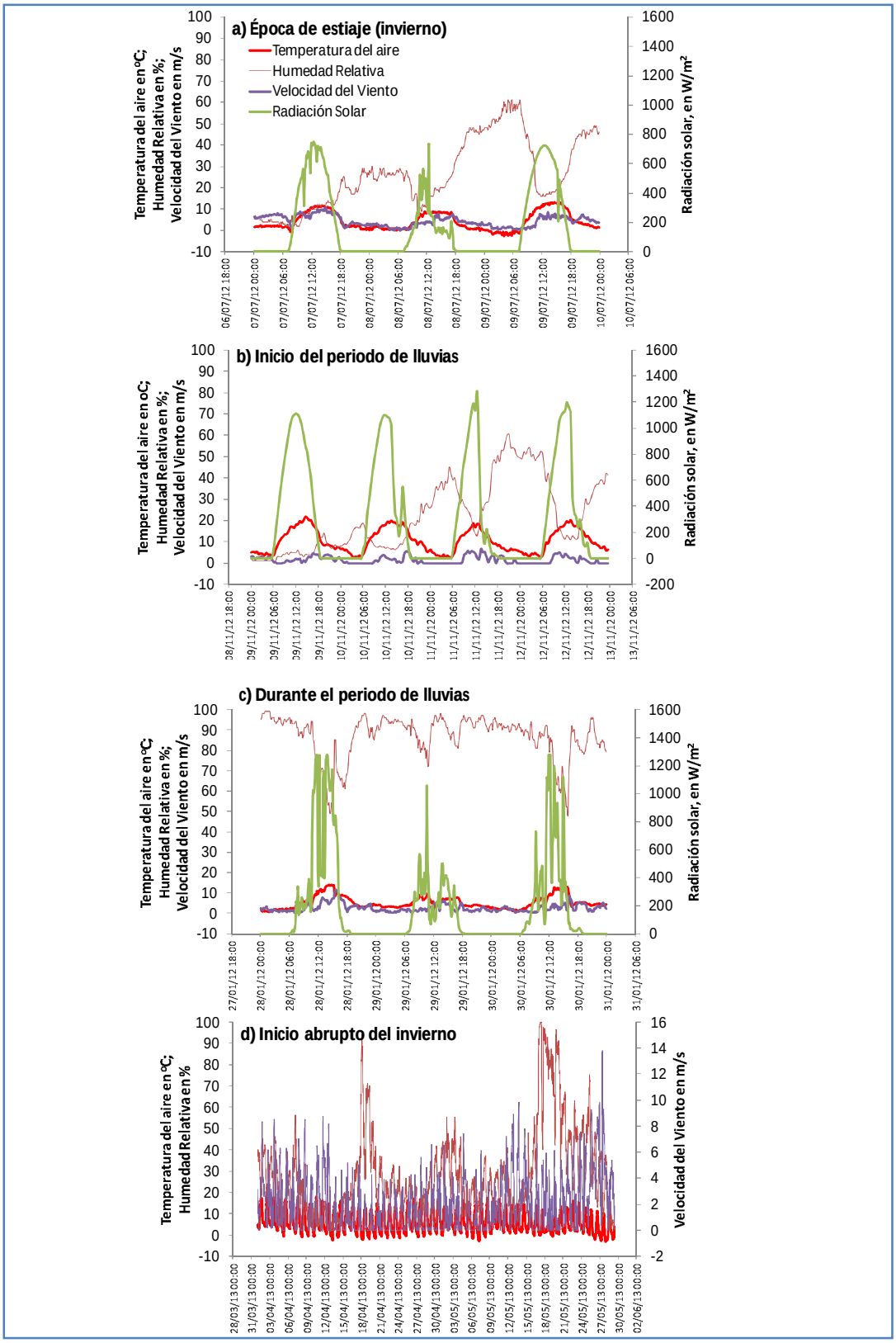

Figura 3 Registros de variables climáticas a escala horaria en la estación de la microcuenca Sururía

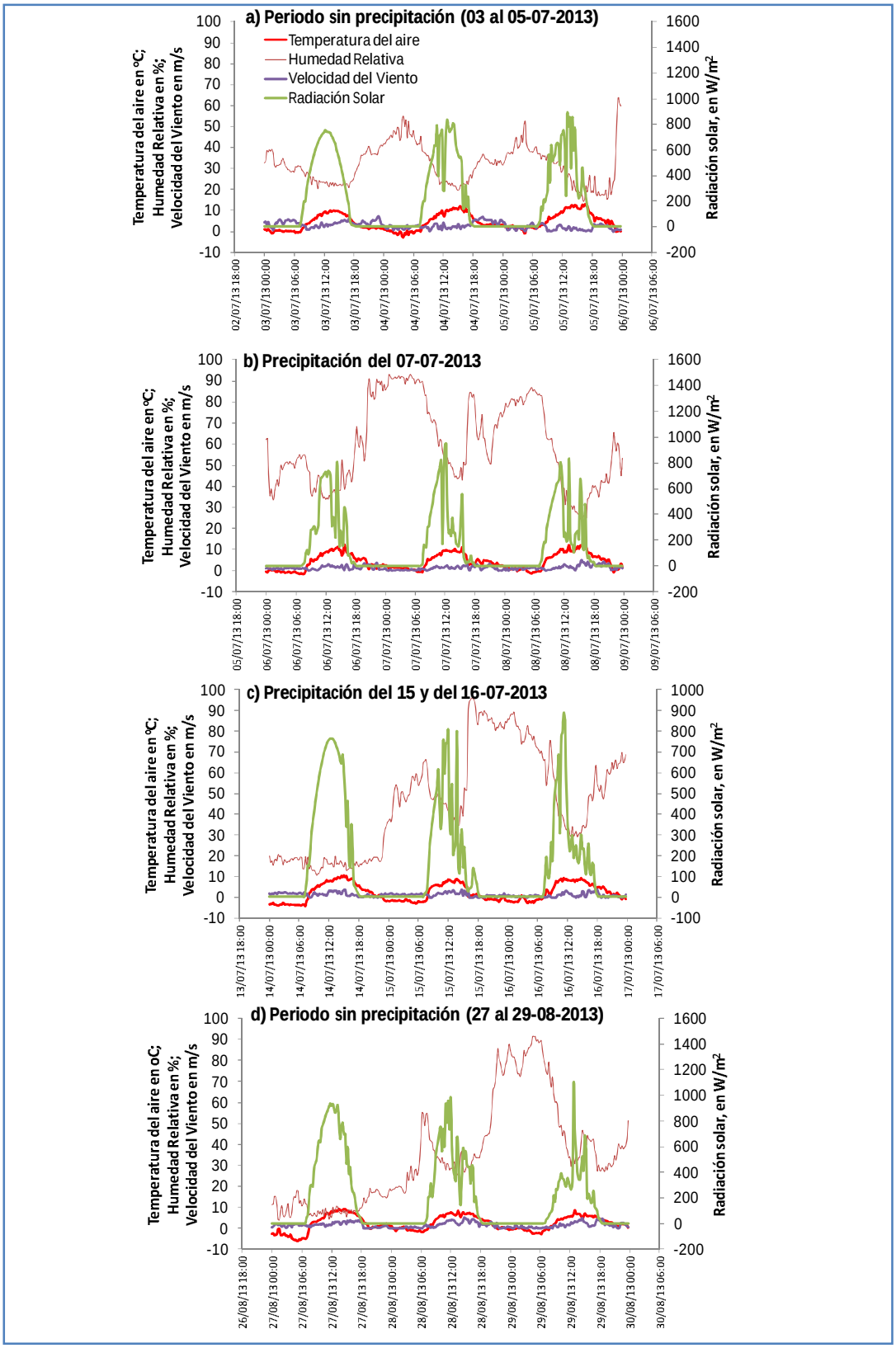

Figura 4 Registros de variables climáticas a escala horaria en la estación de la microcuenca Jaruma

4 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Luego de revisar y haber resumido brevemente los aportes de la literatura y de haberlos complementado con el análisis visual de los datos de las estaciones de las microcuencas Sururía y Jaruma, la interrogante es: ¿qué nueva información provee los datos de las estaciones de altura instaladas en las microcuencas Sururía (4595 msnm) y Jaruma (4427 msnm)? Con relación a los objetivos y alcances de la consultoría, los aportes principales identificados (efectivos y potenciales) son: i) conocimiento cuantitativo acerca de patrones de variables climáticas en sitios de altura en zonas de montaña, ii) conocimiento de la variabilidad altitudinal de variables importantes para la realización del estudio de relaciones precipitación-escurrimiento en la cuenca del río Sajama, iii) conocimiento para inferir posibles relaciones precipitación-escurrimiento en microcuencas de altura a escalas mayores a una escala mensual media, iv) conocimiento para inferir la variabilidad diurna del deshielo de uno de los glaciares del volcán Sajama (glaciar con orientación sudoeste) y v) conocimiento para inferir la variabilidad diurna de la descarga del agua almacenada en el reservorio natural de las microcuencas Sururía y Jaruma y sus posibles relaciones con las variables medidas en las estaciones meteorológicas instaladas.

i) Conocimiento cuantitativo acerca de patrones de variables climáticas en sitios de altura en zonas de montaña.- La ocurrencia de las variables temperatura del aire, radiación solar, humedad relativa e inclusive hasta cierto punto la velocidad del viento, constituyen parámetros que pueden ser extrapolados. Para la variable precipitación a diferentes escalas, sin embargo, se sugiere evitar su regionalización en zonas de montaña.

ii) Conocimiento de la variabilidad altitudinal de variables importantes para la realización del estudio de relaciones precipitación-escurrimiento en la cuenca del río Sajama.- García (2012) sugiere una tasa de incremento para la temperatura de 0.6^{o}C por cada 100 m en la vertical. Para la precipitación no es posible definir este tipo de incremento lineal.

iii) Conocimiento para inferir posibles relaciones precipitación-escurrimiento en microcuencas de altura a escalas mayores a una escala mensual media.- Los informes preliminares de Soria (2013b) y Soria (2013c) proveen detalles al respecto para las probables relaciones de la cuenca del río Sajama y para la microcuencia Sururía. Para Jaruma, sin embargo, se considera que al momento de finalizar la consultoría en octubre de 2013 no se contará con la información suficiente para hacer este tipo de inferencias.

iv) Conocimiento para inferir la variabilidad diurna del deshielo de uno de los glaciares del volcán Sajama (glaciar con orientación sudoeste).- Igualmente, este aspecto fue discutido en Soria (2013b). La interrogante de conocer la incertidumbre de extrapolar las predicciones a otros volcanes parece tener una respuesta simple: no es posible, dada la heterogeneidad en la respuesta de la precipitación.

v) Conocimiento para inferir la variabilidad diurna de la descarga del agua almacenada en el reservorio natural de las microcuencas Sururía y Jaruma y sus posibles relaciones con las variables medidas en las estaciones meteorológicas instaladas. El tema relacionado a este problema fue brevemente discutido en Soria (2013, 2013b). En Sururía al parecer se tiene información para realizar inferencias en futuros informes; por otro lado, en Jaruma, se debería esperar hasta recolectar datos de la época húmeda para realizar este tipo de tareas.

RECONOCIMIENTOS

Este estudio es financiado por Agua Sustentable a través de la Consultoría "Monitoreo hidrológico para el estudio de relaciones precipitación-escurrimiento en microcuencas con presencia de bofedales en la Cordillera Occidental de los Andes en Bolivia". En las campañas de campo, se agradece el trabajo y cooperación del técnico de Agua Sustentable Víctor Mamani, del consultor independiente Horacio Lorini y de las pasantes Vilma Alanoca y Viviana Casas, en las actividades de monitoreo en campo.

5 REFERENCIAS

Aceituno, P. y A. Montecinos, 1993. Análisis de la estabilidad de la relación entre la Oscilación del Sur y la precipitación en América del Sur. Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines 22, 53-64.

Arnaud, Y., Muller, F., Vuille, M., Ribstein, P., 2001. El Niño-Southern Oscillation influence on a Sajama volcano glacier from 1963 to 1998 as seen from Landsat and aerial photography, Journal of Geophysical Research 106, 17773-17784.

Asawa, G., 2008. Irrigation and water resources engineering. New Age International Ltd. Publishers, New Delhi, 623 p.

Casas, C. y Alarcón, M., 1999. Meteorología y clima. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. 155 p.

Chow, V., Maidment, D., Mays, L. 1998. Hidrología aplicada. McGraw-Hill: Nueva York.

Cook, K., 2009. South American Climate Variability and Change: Remote and Regional Forcing Processes. In: Past Climate Variability in South America and Surrounding Regions. Vimeux, F., Silvestre, F., Khodry, M. (eds). Developments in Paleoenvironmental Research 14, 193-212.

Fonseca, I., 2008. Clima y paisajes. Recursos en línea del proyecto CICA-Thales, Madrid. http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0151-01/ed99-0151-01.html

García, M., 2012. Caracterización agroclimática del Parque Sajama. Serie no publicada de informes técnicos de consultoría de agroclimatología del Parque Nacional Sajama. Agua Sustentable, La Paz.

Garreaud, R., Vuille, M., Clement, A., 2003. The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 194, 5-22.

Garreaud, R., Vuille, M., Compagnucci, R., Marengo, J., 2008. Present-day South American climate. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 281 (3-4), 180-195.

Garreaud, R., 2009. The Andes climate and weather. Advances in Geosciences 22, 3-11.

Hardy, D., Vuille, M., Braun, C., Keimig, F., Bradley, R., 1998. Annual and daily meteorological cycles at high altitude on a tropical mountain. Bulletin of the American Meteorological Society 79 (9), 1899-1913.

Hughes, D., 2012. Hydrological education and training needs in sub-Saharan Africa: requirements, constraints and progress. Hydrology and Earth System Sciences 16, 861–871.

Iriarte, J., 2005. Balance Hídrico microregional de las cuencas Mauri, Bajo Desaguadero, y los lagos Poopó y Uru Uru. Proyecto de Grado, UMSA, La Paz.

Lenters, J., Cook, R., 1997. On the Origin of the Bolivian High and Related Circulation Features of the South American Climate. Journal of the Atmospheric Sciences 64, 656-677.

Martínez, R., Ruiz, D., Andrade, M., Blacutt, L., Pabón, D., Jaimes, E., León, G., Villacís, M., Quintana, J., Montealegre, E., Euscátegui, C., 2011. Synthesis of the Climate of the Tropical Andes. In Herzog, K., Martinez, R., Jorgensen, P., Tiessen, H. (eds.). Climate change and biodiversity in the Tropical Andes. MacArthur Foundation, Inter-American Institute of Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), Sao Jose dos Campos and Paris, 97-109.

OMM, 2012. El tiempo, el clima y el agua, motores de nuestro futuro. OMM No. 1084. Organización Meteorológica Mundial (OMM), Ginebra. 35 p.

SENAMHI-IRD, 2006. Sajama-Bolivia, mediciones meteorológicas. Boletín no publicado. SENAMHI, La Paz.

Shaw, E., Beven, K., Chappell, N., Lamb, R., 2011. Hydrology in practice (4th edition). Taylor and Francis, Oxon, 558 p.

Shelton, M., 2009. Hydroclimatology: Perspectives and applications. Cambridge University Press, Cambridge. 438 p.

Sicart, J., Ribstein, P., Francou, B., Pouyaud, B., Condom, T., 2007. Glacier mass balance of tropical Zongo glacier, Bolivia, comparing hydrological and glaciological methods. Global Planetary Change 59, 27–36.

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M., Miller, H. (eds.), 2007. Contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Reporte de Asesoramiento del Panel Intergubernamental en Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, USA,996 pp.

Soria, F., 2013. Estudio de la oferta de agua en una región del Parque Nacional Sajama. Agua Sustentable, La Paz. 28 p. más anexos.

Soria, F., 2013b. Monitoreo de piezómetros, caudales y variables climáticas. Informe de avance de consultoría, junioi de 2013. Agua Sustentable. 29 p.

Soria, F., 2013c. Relaciones precipitación-escurrimiento en la cuenca del Río Sajama (punto de control en el Puente Río Sajama) y mapa para orientar el uso y aprovechamiento de los recursos hídricos. Informe de avance de consultoría, agosto de 2013. Agua Sustentable. 34 p.

Soruco, A., Vincent, C., Francou, B., Ribstein, P., Berger, T., Sicart, J.E., Wagnon, P., Arnaud, Y., Favier, V., Lejeune, Y. 2009. Mass balance of glaciar Zongo, Bolivia, between 1956 and 2006, using glaciological, hydrological and geodetic methods. Annals of Glaciology 50, 1–8.

Thompson, L., Davis, M., Mosley-Thompson, E., Sowers, T., Henderson, K., Zagorodnov, V., Lin, P., Mikhalenko, V., Campen, R., Bolzan, J., Cole-Dai, J., Francou, B., 1998. A 25,000-year tropical climate history from Bolivian ice cores. Science 282, 1858-1864.

Uhlenbrook, S., Steinbrich, A., Tetzlaff, D., Leibundgut, C., 2002. Regional analysis of the generation of extreme floods. In HAJ VanLanen & S Demuth (eds), FRIEND 2002-Regional hydrology: Bringing the gap between research and practice. IAHS, Wallingford, pp. 243-249.

Vuille, M., 1999. Atmospheric circulation over the Bolivian Altiplano during dry and wet periods and extreme phases of the southern oscillation. International Journal of Climatology 19, 1579-1600.

Vuille, M., Hardy, D., Braun, C., Kelmig, F., Bradley, R., 2001. Climate variability on intraseasonal to interannual timescales on the Bolivian Altiplano with special emphasis on the Nevado Sajama region. Ecología de Bolivia 35, 17-40.