

**PLAN MAESTRO METROPOLITANO DE AGUA  
Y SANAMIENTO DEL VALLE CENTRAL  
TARIJA**

**AGUAS SUPERFICIALES DE LOS MUNICIPIOS: TARIJA, SAN  
LORENZO, URIONDO Y PADCAYA**



Rio Guadalquivir Angosto de San Luís

*Octubre de 2012*

**Contenido**

## INDICE

|  |    |
|--|----|
| MUNICIPIO DE TARIJA .....  | 1  |
| 1. INTRODUCCIÓN.....   | 1  |
| 2. LAS CUENCAS Y SU CLIMA.....   | 1  |
| 2.1 ESTIMACIÓN DE LA POBLACIÓN .....   | 1  |
| 2.2 DESCRIPCION DE LAS CUENCAS.....  | 4  |
| 2.2.1 Cuencas del Guadalquivir.....  | 4  |
| 2.2.2 Cuenca de Tolomosa.....  | 5  |
| 2.2.3 Cuenca Camacho.....  | 5  |
| 2.2.4 Cuenca de Santa Ana.....   | 5  |
| 2.2.5 Cuenca de Huacata .....  | 6  |
| 3. VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN.....   | 6  |
| 3.1 CONCEPTO .....   | 6  |
| 3.2 Aplicabilidad .....  | 9  |
| 3.3 RESULTADOS .....   | 15 |
| 4. DISTRIBUCION DE LAS ESCORRENTIAS.....   | 16 |
| 4.1 CONCEPTOS Y SU APLICACIÓN.....   | 16 |
| 4.2 INFORMACIÓN DISPONIBLE Y SUS VALORES DE MEDIDA .....                                       | 19 |
| 4.3 Los valores de caudales medios .....   | 24 |
| 4.4 Valores de caudales mínimos.....   | 29 |
| 5. LOS RECURSOS HIDRICOS SUBTERRANEOS.....   | 32 |
| 5.1 CARACTERISTICAS DEL SISTEMA .....  | 32 |
| 5.2 Datos Disponibles y Estudios Realizados.....   | 35 |
| 5.3 Caudales disponibles y Garantía de Suministro .....  | 35 |
| 6. LA INCIDENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO.....   | 40 |
| 6.1 EFECTOS GLOBALES DEL CAMBIO CLIMATICO .....  | 40 |
| 6.2 PROBABLES IMPACTOS SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS .....                      | 41 |
| 6.3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....  | 43 |
| 6.4 NUESTRA APRECIACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DEL VALLE DE TARIJA..... | 44 |
| MUNICIPIO DE SAN LORENZO.....  | 47 |
| 7. RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES .....   | 47 |
| 7.1 Cuencas hidrográficas y Caudal superficial disponible.....                                 | 47 |
| 7.2 Análisis y comparación de resultados.....  | 63 |
| 7.2.1 Caudal disponible en la fuente actual .....  | 63 |
| 7.2.2 Caudal disponible en las fuentes futuras potenciales .....                               | 64 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 7.3  | Escenario probabilístico.....                                  | 64  |
| 7.4  | Escenario bajo influencia del cambio climático.....            | 65  |
| 8.   | RECURSOS HIDRICOS SUBTERRANEOS .....                           | 68  |
| 8.1  | Condiciones hidrogeológicas de la cuenca.....                  | 68  |
| 8.2  | Caudal producido y disponible.....                             | 70  |
|      | MUNICIPIO DE URIONDO.....                                      | 70  |
| 9.   | CUENCAS HIDROGRAFICAS Y CAUDAL DISPONIBLE .....                | 70  |
| 10.  | ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS .....                     | 87  |
| 10.1 | ESTUDIOS RELACIONADOS CON LAS FUENTES FUTURAS POTENCIALES..... | 87  |
| 10.2 | CAUDAL DISPONIBLE EN LAS FUENTES FUTURAS POTENCIALES .....     | 87  |
| 11.  | ESCENARIO PROBABILÍSTICO.....                                  | 88  |
|      | MUNICIPIO DE PADCAYA .....                                     | 91  |
| 12.  | CUENCAS HIDROGRAFICAS Y CAUDAL DISPONIBLE .....                | 91  |
| 13.  | ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS .....                     | 109 |
| 13.1 | ESTUDIOS RELACIONADOS CON LAS FUENTES FUTURAS POTENCIALES..... | 109 |
| 13.2 | CAUDAL DISPONIBLE EN LAS FUENTES FUTURAS POTENCIALES .....     | 109 |
| 14.  | ESCENARIO PROBABILÍSTICO.....                                  | 109 |
| 15.  | ESCENARIO BAJO INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO .....           | 110 |

## Índice de Tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 3.1. Precipitación total anual- valle de Tarija .....  | 7  |
| Tabla 3.2. Registro de precipitación total anual – Valle de Tarija.....  | 8  |
| Tabla 3.3. Valores característicos de la distribución de Precipitación total anual- Valle de Tarija.....   | 9  |
| Tabla 4.1. Estaciones Hidrométricas de la Cuenca del Valle Central de Tarija.....  | 20 |
| Tabla 4.2. Parámetros hidrológicos de las cuencas delimitadas en el sitio de ubicación de las Estaciones Hidrométricas de Registro Continuo.....   | 22 |
| Tabla 4.3. Balance hídrico Cuenca Tolomosa.....  | 22 |
| Tabla 4.4. Resumen de caudales naturales en los sitios de aprovechamiento .....  | 23 |
| Tabla 4.5. Datos de las diferentes estaciones pluviométricas en la región .....  | 24 |
| Tabla 4.6. Datos de la estación Tolomosa .....   | 24 |
| Tabla 4.7. Escorrentía anual (mm) .....  | 26 |
| Tabla 4.8. Distribución mensual de Escorrentías Estaciones continuas – Valle Tarija.....   | 27 |
| Tabla 4.9. Caudales medios anuales (m <sup>3</sup> /s) Año Normal .....  | 28 |
| Tabla 4.10. Caudales medios anuales (m <sup>3</sup> /s) Año Seco.....  | 28 |
| Tabla 4.11. Valores de Caudales en estaciones de la Región de Tarija (m <sup>3</sup> /s) .....   | 29 |
| Tabla 4.12. Resultados de ecuaciones que presenta el estudio de STCV para San Jacinto .....  | 30 |
| Tabla 4.13. Resultados de ecuaciones de Cañas –Camacho son: .....  | 30 |
| Tabla 4.14. Caudales mínimos.....  | 31 |
| Tabla 4.15. Valores de caudales mínimos diferentes escenarios.....   | 31 |
| Tabla 4.16. Caudales medidos en Vitoria (l/s).....   | 32 |
| Tabla 5.1 Valores registrados d caudal en L/s .....  | 36 |
| Tabla 5.2. Pozos a ser operados.....   | 39 |
| Tabla 6.1. Precipitación y temperatura promedio actual y pronosticado al 2036.....   | 42 |
| Tabla 6.2. Variación de la precipitación en relación a la normal (periodo 1961-1990) en los diferentes modelos de circulación GENERAL (HADCM2. UKHI. GISSEQ) PARA EL ESCENARIO IS92 E) ..... | 45 |
| Tabla 6.3. Caudal medio mensual de las fuentes superficiales actuales en Valle Tarija para un escenario pesimista de cambio climático.....   | 46 |
| Tabla 7.1. <b>Superficie de Cuenca</b> .....   | 47 |
| Tabla 7.2. AFOROS- San Lorenzo.....  | 49 |
| Tabla 7.3. Estaciones Hidrométricas de la Cuenca del Valle Central de Tarija.....  | 53 |
| Tabla 7.4. Valores característicos de precipitación .....  | 55 |
| Tabla 7.5. Parámetros hidrológicos de las cuencas delimitadas en el sitio de ubicación de las Estaciones Hidrométricas de Registro Continuo.....   | 59 |
| Tabla 7.6. Coeficiente de distribución media mensual del volumen de escurrimiento medio anual .....  | 61 |
| Tabla 7.7. Estaciones hidrométricas cercanas a las cuencas de uso actual .....   | 62 |
| Tabla 7.8. Caudal específico en la cuenca de la estación Canasmoro .....   | 62 |

---

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 7.9. Caudal medio anual estimado en las cuencas de Estudio .....  | 63  |
| Tabla 7.10. Distribución mensual de los caudales medios en la estación Canasmoro .....  | 63  |
| Tabla 7.11. Caudal medio mensual de las fuentes superficiales actuales .....  | 63  |
| Tabla 7.12. Caudal medio mensual de las fuentes superficiales aplicación .....  | 64  |
| Tabla 7.13. Caudal mínimo probabilístico mensual de las fuentes superficiales actuales para un periodo de diseño de 20 años .....   | 64  |
| Tabla 7.14. Variación de la precipitación en relación a la normal (periodo 1961-1990) en los diferentes modelos de circulación general (HADCM2. UKHI. GISSEQ) para el escenario IS92E ..... | 67  |
| Tabla 7.15. Caudal medio mensual de las fuentes superficiales actuales en San Lorenzo para un escenario pesimista de cambio climático .....   | 68  |
| Tabla 9.1. Estaciones Hidrométricas de la Cuenca del Valle Central de Tarija.....   | 76  |
| Tabla 9.2. Valores característicos de precipitación .....   | 78  |
| Tabla 9.3. Parámetros hidrológicos de las cuencas delimitadas en el sitio de ubicación de las Estaciones Hidrométricas de Registro Continuo.....  | 82  |
| Tabla 9.4. Coeficiente de Escorrentía Anual PRONAR.....   | 83  |
| Tabla 9.5. Coeficiente de distribución media mensual del volumen de escurrimiento medio anual .....   | 84  |
| Tabla 9.6. Caudal medio anual estimado en las cuencas de Alisos.....  | 86  |
| Tabla 9.7. Caudal medio mensual de las fuentes superficiales actuales .....   | 87  |
| Tabla 10.1. Estudios relacionados con las fuentes superficiales futuras.....  | 87  |
| Tabla 11.1. Caudal mínimo probabilístico mensual de las fuentes superficiales actuales .....  | 88  |
| Tabla 11.2. Oferta mínima probabilística mensual para un periodo de diseño de 20 años .....   | 88  |
| Tabla 11.3. Variación de la precipitación en relación a la normal (periodo 1961-1990) en los diferentes modelos de circulación general (HADCM2. UKHI. GISSEQ) PARA EL ESCENARIO IS92E.....  | 90  |
| Tabla 11.4. Caudal medio mensual de las fuentes superficiales actuales para un escenario pesimista de cambio climático.....   | 90  |
| Tabla 11.5. Caudal medio mensual de las fuentes superficiales actuales para un escenario pesimista de cambio climático.....   | 91  |
| Tabla 12.1. AFOROS-PADCAYA .....  | 93  |
| Tabla 12.2. Estaciones Hidrométricas de la Cuenca del Valle Central de Tarija.....  | 96  |
| Tabla 12.3. Valores característicos de precipitación .....  | 98  |
| Tabla 12.4. VARIACION PRECIPITACION ANUAL CON LONGITUD TERRESTRE .....  | 101 |
| Tabla 12.5. Parámetros hidrológicos de las cuencas delimitadas en el sitio de ubicación de las Estaciones Hidrométricas de Registro Continuo .....  | 104 |
| Tabla 12.6. Coeficiente de distribución media mensual del volumen de escurrimiento medio anual .....  | 107 |
| Tabla 12.7. Caudal medio anual estimado en las cuencas de Huacanqui .....   | 108 |
| Tabla 12.8. Caudal medio mensual de las fuentes superficiales actuales .....  | 109 |
| Tabla 13.1. Estudios relacionados con las fuentes superficiales futuras.....  | 109 |
| Tabla 14.1. Caudal mínimo probabilístico mensual de las fuentes superficiales actuales .....  | 110 |
| Tabla 14.2. Oferta mínima probabilística mensual para un periodo de diseño de 20 años .....   | 110 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 15.1. Variación de la precipitación en relación a la normal (periodo 1961-1990) en los diferentes modelos de circulación general (HADCM2. UKHI. GISSEQ) PARA EL ESCENARIO IS92E..... | 112 |
| Tabla 15.2. Caudal medio mensual de las fuentes superficiales actuales para un escenario pesimista de cambio climático.....  | 112 |
| Tabla 15.3. Caudal medio mensual de las fuentes superficiales actuales para un escenario pesimista de cambio climático.....  | 113 |

## Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1. Montañas y serranías de la Cordillera Oriental .....  | 2  |
| Figura 2.2. Relación del volumen de precipitación y el del uso consuntivo (Guadalquivir) .....                        | 3  |
| Figura 2.3. Relación del volumen de precipitación y el del uso consuntivo (Paicho).....                               | 3  |
| Figura 2.4. Relación del volumen de precipitación y el del uso consuntivo (San Telmo) .....                           | 4  |
| Figura 3.1. Variabilidad de la desviación Standard de Precipitación (total) .....                                     | 11 |
| Figura 3.2. Zonas pluviométricas .....  | 12 |
| Figura 3.3. Variabilidad de la desviación Standard de Precipitación Zona1 .....                                       | 13 |
| Figura 3.4. Variabilidad de la desviación Standard de Precipitación Zona 2.....                                       | 13 |
| Figura 3.5. Variabilidad de la Precipitación media (Total) .....  | 14 |
| Figura 3.6. Precipitación Media VS – Alturas S M M (Zona 1 y Zona 2) .....  | 15 |
| Figura 3.7. <b>Variación Precipitacional Anual con Longitud Terrestre</b> .....                                       | 15 |
| Figura 4.1. Cuencas de las Estaciones Hidrométricas Del Valle Central de Tarija con registro continuo .               | 21 |
| Figura 4.2. Comparación entre Caudal Observado y Calculado por el modelo.....   | 23 |
| Figura 4.3. Diagrama de Probabilidad Escorrentía - aflujos .....  | 25 |
| Figura 4.4. Perdidas del balance hidrológico.....   | 26 |
| Figura 4.5. Curva de agotamiento .....  | 30 |
| Figura 5.1. Ubicación pozos profundos- Tarija.....  | 34 |
| Figura 6.1. Áreas Climáticas Para El Uso De Los Modelos De Circulación General.....                                   | 44 |
| Figura 7.1. Cuencas hidrográficas de aprovechamiento actual.....  | 48 |
| Figura 7.2. Estaciones Hidrométricas del Valle Central de Tarija.....   | 51 |
| Figura 7.3. Estaciones Hidrometeorológicas del Valle Central de Tarija .....  | 52 |
| Figura 7.4. Cuencas de las Estaciones Hidrométricas Del Valle Central de Tarija con registro continuo .               | 54 |
| Figura 7.5. Variabilidad de la desviación Standard de Precipitación (total) .....                                     | 56 |
| Figura 7.6. Variabilidad de la desviación Standard de Precipitación (zona 1 y 2) .....                                | 56 |
| Figura 7.7. Variabilidad de la Precipitación media (Total) .....  | 57 |
| Figura 7.8. Variabilidad de la Precipitación media (Zona 1 y Zona 2) .....  | 57 |
| Figura 7.9. Coeficiente de Escorrentía Anual PRONAR.....  | 59 |
| Figura 7.10. Función de correlación entre Precipitación Media Areal y el Caudal Específico .....                      | 60 |
| Figura 7.11. Distribución relativa media mensual del volumen de escurrimiento anual .....                             | 61 |
| Figura 7.12. Correlación de caudales específicos medios anuales en relación a la precipitación media anual areal..... | 62 |
| Figura 7.13. Caudal medio mensual de aplicación (mínimo).....   | 65 |
| Figura 7.14. Áreas climáticas para el uso de los modelos de circulación general.....                                  | 66 |
| Figura 9.1. Estaciones Hidrométricas del Valle Central de Tarija.....   | 74 |
| Figura 9.2. <b>Estaciones Hidrometeorológicas del Valle Central de Tarija</b> .....                                   | 75 |

---

|  |     |
|--|-----|
| Figura 9.3. Cuencas de las Estaciones Hidrométricas Del Valle Central de Tarija con registro continuo .                | 77  |
| Figura 9.4. Variabilidad de la desviación Standard de Precipitación (total) .....                                      | 79  |
| Figura 9.5. Variabilidad de la desviación Standard de Precipitación (zona 1 y 2) .....                                 | 79  |
| Figura 9.6. Variabilidad de la Precipitación media (Total) .....   | 80  |
| Figura 9.7. Variabilidad de la Precipitación media (Zona 1 y Zona 2) .....   | 81  |
| Figura 9.8. Función de correlación entre Precipitación Media Areal y el Caudal Específico .....                        | 84  |
| Figura 9.9. Distribución relativa media mensual del volumen de escurrimiento anual .....                               | 85  |
| Figura 9.10. Correlación de caudales específicos medios anuales en relación a la precipitación media anual areal.....  | 86  |
| Figura 11.1. Áreas climáticas para el uso de los modelos de circulación general.....                                   | 89  |
| Figura 12.1. Obras de toma.....  | 92  |
| Figura 12.2. Estaciones Hidrométricas del Valle Central de Tarija.....   | 94  |
| Figura 12.3. <b>Estaciones Hidrometeorológicas del Valle Central de Tarija</b> .....                                   | 95  |
| Figura 12.4. Cuencas de las Estaciones Hidrométricas Del Valle Central de Tarija con registro continuo                 | 97  |
| Figura 12.5. Variabilidad de la desviación Standard de Precipitación (total) .....                                     | 99  |
| Figura 12.6. Variabilidad de la desviación Standard de Precipitación .....   | 99  |
| Figura 12.7. Variabilidad de la Precipitación media anual.....   | 100 |
| Figura 12.8. PRECIPITACION MEDIA VS- ALTURA S N M .....  | 100 |
| Figura 12.9. Precipitación Anual Estación Padcaya .....  | 102 |
| Figura 12.10. PRECIPITACION MENSUAL ESTACION PADCAYA.....  | 103 |
| Figura 12.11. Coeficiente de Escorrentía Anual PRONAR.....   | 105 |
| Figura 12.12. Función de correlación entre Precipitación Media Areal y el Caudal Específico .....                      | 106 |
| Figura 12.13. Distribución relativa media mensual del volumen de escurrimiento anual .....                             | 107 |
| Figura 12.14. Correlación de caudales específicos medios anuales en relación a la precipitación media anual areal..... | 108 |
| Figura 15.1. Áreas climáticas para el uso de los modelos de circulación general.....                                   | 111 |

## AGUAS SUPERFICIALES DE LOS MUNICIPIOS:

### TARIJA, SAN LORENZO, URIONDO Y PADCAYA

#### **MUNICIPIO DE TARIJA**

##### **1. INTRODUCCIÓN**

Vamos a iniciar este trabajo estableciendo que el mismo busca analizar y determinar caudales que puedan atravesar por una sección definida de un curso de agua que este siendo aprovechado o en el futuro sea aprovechado para dar agua a la ciudad de Tarija.

Estos caudales captados, que pueden ser superficiales o subterráneos dependiendo del recurso hídrico a ser explotado. En el caso de los recursos Superficiales, serán el mínimo que puede ocurrir, si la toma es superficial o sub superficial, si es galería filtrante o el caudal regulado en el caso de disponer de un embalse. En el caso de los recursos hídricos subterráneos será el caudal que permita la recarga del acuífero si es un acuífero libre o el volumen que disponga, si es una acuífero confinado. Ambas determinaciones, provendrán de un estudio hidrológico, sistemáticamente llevado a cabo.

En el caso de los recursos hídricos superficiales. Está claro que la condición Normal de la precipitación, escorrentía o de cualquier variable hidrometeorológica, será aquella que comúnmente podría presentarse y correspondiente al valor central de la información disponible en la(s) estación(es) de medida y que en una distribución probabilísticas corresponde al 50 % de los valores medidos. Y adoptando en la distribución de frecuencia los valores con una probabilidad de ocurrencia del 5% como años secos y mayores al 95 % como años húmedos, dentro de una distribución probabilística del valor normal o de Gumbel.

Bajo este principio metodológico se comenzará en el punto uno a realizar una descripción muy corta, de los cursos de agua que son aprovechados en la actualidad y de los potenciales curso naturales que podrán ser explotados, su clima y se indicarán las obras de captación para establecer si son tomas directas o con embalse y establecer la metodología apropiada para la determinación de los caudales de aprovechamiento.

Las cuencas hídricas en explotación son aquellas del rio Erquis, Vitoria, Guadalquivir y el embalse de San Jacinto sobre el rio Tolomosa. En el futuro se podrían mejorar las condiciones en el Rio Erquis y Vitoria al igual que en el Guadalquivir en Tipas y el bombeo desde el embalse de San Jacinto y recursos nuevos como Calderillas, Tolomosa, Los pinos y la cuenca de Huacata a través de un trasvase.

El segundo punto, analiza la precipitación como base del elemento fundamental que permite a través de balance hídrico deducir los caudales o la escorrentía que pueden circular por los cursos de agua y por la propia cuenca.

El tercer punto, es la deducción de los caudales, teniendo como base el balance hídrico de determinación de las pérdidas y de la escorrentía y finalmente los caudales de captación.

En el punto cuarto se analiza los recursos hídricos subterráneos sobre la base de la información con la cual se dispone.

##### **2. LAS CUENCAS Y SU CLIMA**

###### **2.1 ESTIMACIÓN DE LA POBLACIÓN**

El valle de Tarija se halla localizado en un clima Semiárido que se caracteriza por una precipitación media anual entre 400-750 mm con 3-6 meses húmedos con una precipitación > 80 mm/mes. Se subdivide en dos subtipos: semiárido con temperaturas altas y semiárido con temperaturas bajas. El primero se ubica en el norte del Sub andino, al oeste de la serranía de Aguarañe (Capirenda, Palos Blancos, Timboy), con temperaturas medias anuales de 21 a 23 °C, mientras que el segundo corresponde a los valles de la Cordillera Oriental (Valle Central de Tarija, Padcaya, San Lorenzo), con temperaturas medias anuales entre 13 y 18 °C.

En general, el verano se caracteriza principalmente por vientos dominantes del sud-sudeste, temperatura y humedad relativa altas y masas de aire inestables, produciéndose precipitaciones aisladas de alta intensidad y corta duración. Por otro lado, el invierno se caracteriza por temperaturas y humedad relativa

generalmente bajas y la ausencia de precipitaciones. El invierno también está asociado a la llegada de frentes fríos provenientes del sur, llamados "surazos", que traen consigo masas de aire frío, dando lugar a veces a precipitaciones de baja intensidad pero de larga duración.

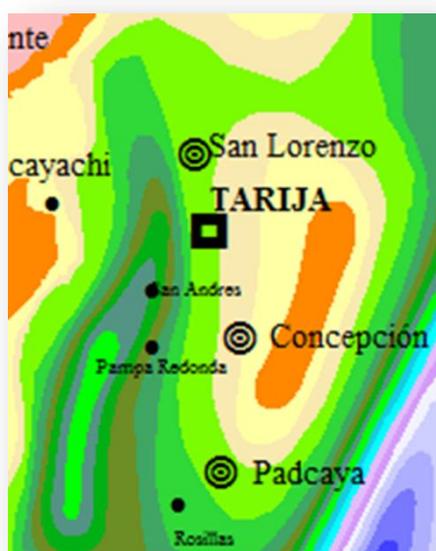
La precipitación, está fuertemente vinculada a las masas de aire húmedo que en la época lluviosa llegan desde el sudeste del continente, las mismas que al encontrarse con las serranías del Sub andino en primera instancia y luego con la cordillera de Sama, se elevan, enfrían y precipitan, determinando de esta manera la distribución de la precipitación.

Los datos muestran que la región de la cuenca del Río Bermejo es mucho más húmeda que la región de la cuenca del Río Pilcomayo. Esto explica que el caudal medio anual del Río Bermejo es 18 lts/seg/km<sup>2</sup> y el del Río Grande de Tarija 12 lts/seg/km<sup>2</sup> en el punto de la confluencia de ambos ríos, mientras que estos valores para el Río San Juan del Oro y el Río Pilaya son solo 3,3 y 5,2 lts/seg/km<sup>2</sup> respectivamente.

Los valores de precipitación media anual más bajos se presentan en la cuenca del Río Pilcomayo, en el noroeste de la Cordillera Oriental con valores que no sobrepasan los 300 mm y en la parte central de la Llanura Chaqueña con valores por debajo de los 400 mm. Precipitaciones altas se encuentran en la cuenca del Río Bermejo en la parte sur del Subandino donde en una gran área la precipitación anual es mayor a 1.000 mm y llega a valores máximos de 2.250 mm en Emborozú en el límite con Argentina. También en los contrafuertes de algunas montañas y serranías de la Cordillera Oriental (por ejemplo: Sama) la precipitación promedio anual muestra valores altos, oscilando alrededor de los 1.000 mm. En el valle está alrededor de los 700 mm

La distribución espacial y temporal de las lluvias, se caracteriza por presentar dos periodos marcados: el de precipitaciones, de noviembre a marzo, y el periodo seco de abril a octubre. De esta manera se observa que las actividades agrícolas se concentran en el periodo húmedo, aunque en muchas áreas estas actividades no son posibles sin riego. Con cierta regularidad, la cantidad y frecuencia de las lluvias se reduce, generando sequías más fuertes donde se tiene una ocurrencia aproximada de una sequía sería cada 5 años. A lo descrito anteriormente se suma una irregularidad de las precipitaciones. En algunos casos las lluvias se presentan tardíamente retrasando los cultivos y en otros casos llueve excesivamente al final del ciclo vegetativo de los mismos, siendo perjudicial para la actividad agrícola, especialmente en cultivos anuales.

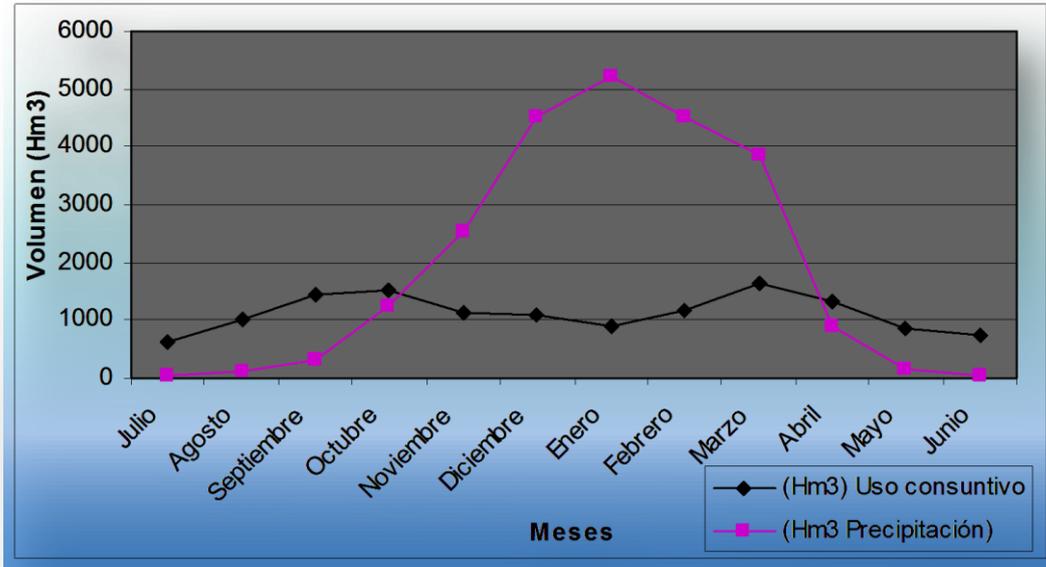
Figura 2.1. Montañas y serranías de la Cordillera Oriental



Fuente: Elaboración propia

En el caso del valle central se tienen cuencas representativas, como el Guadalquivir, que tiene una superficie potencial de 11.450 ha, de unidades agrícola intensiva y agropecuaria extensiva. En la H-1, se aprecia un gran volumen disponible en la época de lluvias, no así en los meses de estiaje, es de vital importancia la construcción de sistemas de regulación de caudales, sobre todo en los cursos secundarios, para atender las demandas de agua de riego en los lugares con potencial agrícola.

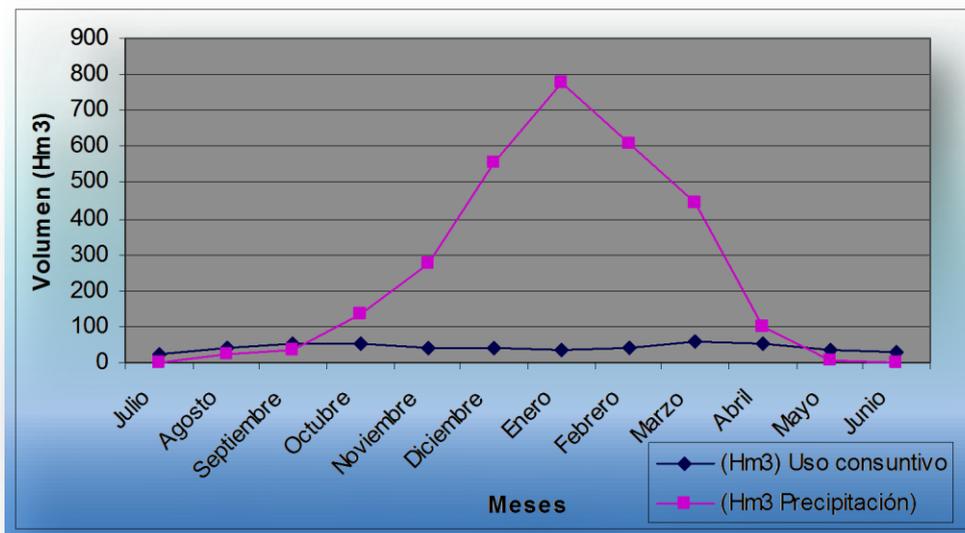
Figura 2.2. Relación del volumen de precipitación y el del uso consuntivo (Guadalquivir)



Fuente: Elaboración propia

En el caso de los valles altos, Paicho es un ejemplo de la poca disponibilidad de superficie con potencial agropecuario (510 ha) con relación al tamaño de la cuenca: 262,3 km<sup>2</sup>. En esta cuenca las actividades agropecuarias deben ser muy intensivas y aprovechar el agua disponible en la época de lluvias

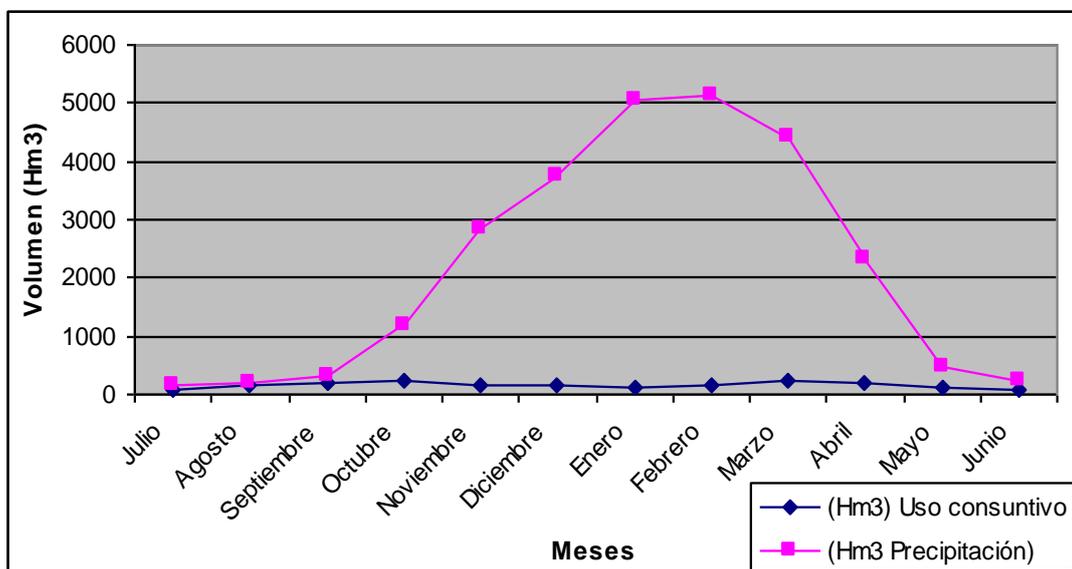
Figura 2.3. Relación del volumen de precipitación y el del uso consuntivo (Paicho)



Fuente: Elaboración propia

En el Subandino, de manera general existe una mínima superficie de tierras con vocación agropecuaria, y paradójicamente, la precipitación es importante.

Figura 2.4. Relación del volumen de precipitación y el del uso consuntivo (San Telmo)



Fuente: Elaboración propia

De esta manera, se ha ilustrado con gráficos las Cuencas, que dan una idea global de la manera como está distribuida la superficie con potencial agropecuario y su relación con los volúmenes de precipitación y el uso consuntivo.

## 2.2 DESCRIPCION DE LAS CUENCAS

En los mapas adjuntos del 1 al 6, se muestran las cuencas hidrográficas que se tienen en el Valle de Tarija, la vegetación, las obras de captación, el uso actual y potencial del suelo y las pendientes que existen en las cuencas que conforman la red hídrica del Valle. La descripción de ellas se indica a continuación.

### 2.2.1 Cuencas del Guadalquivir

Abarca las cuencas de la parte Norte hasta el angosto de Obrajes, con un río Canasmoro, importante por el lado izquierdo y el río Sella por el lado derecho, a continuación llega al valle por el lado izquierdo los ríos de Vitoria, Erquis, Los pinos y el principal el río Camacho con el cual concluye la red en el angosto de La angostura, para dar lugar al río Grande de Tarija, afluente del río Bermejo en la cuenca del río De La Plata.

Está Conformada por terrazas y llanuras aluviales, que se ubican entre alturas de 1.700 y 2.700 msnm en el Valle Central de Tarija. Tienen pendientes entre 0 y 5% con pedregosidad superficial menor a 15%. Los suelos son profundos, de texturas medias, con disponibilidad de nutrientes de moderada a baja. El clima es semiárido con un periodo de disponibilidad de agua en el suelo para el crecimiento de plantas de 3 a 5 meses. El periodo libre de heladas es de 7 meses. Las granizadas son frecuentes en esta zona, siendo una causa importante de pérdida de cosechas.

En la parte alta de la cuenca existe un componente de llanura fluvio-glacial, entre 3.400 y 4.300 msnm, con pendientes que varían entre 2 y 10% en la mayor parte de la unidad, aunque en los escarpes son de 30 a 60%. Los suelos son poco profundos a profundos, con muchos fragmentos gruesos en el perfil, acumulados sin ningún orden y de tamaño heterogéneo. La disponibilidad de nutrientes es baja. El clima es árido a semiárido con 2 a 3 meses de periodo de disponibilidad de agua en el suelo para el crecimiento de plantas y con la presencia de heladas durante 6 a 11 meses por año, las que disminuyen su intensidad en el periodo entre los meses de noviembre a marzo. La vegetación natural está compuesta por matorrales bajos a altos, ralos a dispersos, mayormente siempre verdes y xeromórficos

con un estrato herbáceo compuesto por gramíneas muy pobre. En el Valle Central la especie dominante es el churqui, arbustos de thola y diferentes pastos, formando los típicos churquiales con pastizales y tholar-pastizal.

En esta cuenca la erosión de riberas y el desborde de los ríos son fenómenos que se presentan con bastante frecuencia, ocasionando la pérdida de tierras y cosechas.

### **2.2.2 Cuenca de Tolomosa**

El paisaje está compuesto por una llanura fluvio-lacustre entre 1.700 y 2.150 msnm, con pendientes entre 15 y 60% y mostrando diferentes grados de disección, desde las poco disectadas hasta los badlands, constituyendo estos últimos aproximadamente el 50% de su extensión. El paisaje presenta un avanzado estado de degradación del suelo y la vegetación, siendo los procesos acelerados de erosión hídrica y el sobrepastoreo los aspectos más elocuentes. La pedregosidad superficial es variable, los suelos son moderadamente profundos y en algunos sitios presenten salinidad y sodicidad alta. El clima es subhúmedo con un periodo de disponibilidad de agua en el suelo para el crecimiento de plantas que varía entre los 4 y 6 meses y un periodo libre de heladas entre 7 y 9 meses.

La vegetación está formada por matorrales secundarios xeromórficos bajos a medios, con pastizales formando los denominados taquillares y churquiales con pastizales, donde la cobertura es variable, desde dispersa a semidensa.

La cuenca de Tolomosa también está compuesta por un abanico aluvial, ubicado entre alturas de 1.950 y 2.650 msnm, con pendientes entre 0 y 5%, con una pedregosidad superficial menor de 15%. Los suelos son profundos, de baja a moderada disponibilidad de nutrientes. El periodo de disponibilidad de agua para el crecimiento de las plantas es de 7 meses.

Las condiciones hidrogeológicas son muy buenas y se dispone de un buen potencial de agua subterránea con una surgencia de ella en la parte de unión del ordovícico y el cuaternario.

### **2.2.3 Cuenca Camacho.**

La cuenca Camacho tiene terrazas que se ubican entre alturas de 1.700 y 2.700 msnm en el Valle Central de Tarija. Tienen pendientes entre 0 y 5% con pedregosidad superficial menor a 15%. Los suelos son profundos, de texturas medias, con disponibilidad de nutrientes de moderada a baja. El clima es semiárido con un periodo de disponibilidad de agua en el suelo para el crecimiento de plantas de 3 a 5 meses. El periodo libre de heladas es de 7 meses. Las granizadas son frecuentes en esta zona, siendo una causa importante de pérdida de cosechas.

La zona alta de la cuenca presenta un paisaje de montañas planicies y piedemontes. Las pendientes generalmente varían entre 30 y 90% en las laderas y entre 5 y 30% en las cimas, mientras las áreas de valle menor, planicie y piedemonte tienen pendientes de 2 a 10%, generalmente con pedregosidad y rocosidad superficial entre 15 y 80% en todos los componentes con excepción de los componentes de valle menor. La profundidad de los suelos varía de superficial en los escarpes y laderas, a moderadamente profundos en los abanicos coluvio-aluviales. Generalmente los perfiles presentan considerables cantidades de fragmentos gruesos. La disponibilidad de nutrientes es baja, y se presentan valores de salinidad y/o sodio intercambiable altos en sectores puntuales en partes de la planicie y piedemonte. Los procesos de erosión hídrica son moderados y adquieren una mayor dinámica en el componente de escarpe. El clima es árido a semiárido, con un periodo de 3 a 5 meses de disponibilidad de agua para el crecimiento de las plantas. La cobertura vegetal dominante está constituida por pajonales de altura asociados con un matorral enano a medio con una baja a mediana producción de forraje.

### **2.2.4 Cuenca de Santa Ana**

La cuenca de Santa Ana, tiene componentes de abanico coluvial, superficie de llanura fluvio-lacustre, escarpes y badlands. Los suelos son moderadamente profundos, con pocos fragmentos gruesos en el perfil y una disponibilidad de nutrientes baja a muy baja. En sitios localizados se presentan contenidos salinos o sódicos moderadamente altos o altos. Estos paisajes presentan un avanzado estado de degradación de los suelos y vegetación, siendo los procesos de erosión hídrica acelerados y el sobrepastoreo los más relevantes. En la llanura fluvio-lacustre se presentan extensas zonas con suelos

desnudos expuestos a la acción del viento. El clima es árido con un periodo de disponibilidad de agua en el suelo para el crecimiento de plantas que varía entre los 2 y 5 meses y un periodo libre de heladas entre 5 y 8 meses. La vegetación que cubre estos terrenos en la Cordillera Oriental (andino) es de tipo matorral xeromórfico de sustitución y pastizales degradados, con especies clasificadas preponderantemente como forrajes duros.

Los piedemontes pendientes a los procesos de remoción en masa, determinada tanto por el tipo de material, como por la estructura geológica y el relieve fuertemente escarpado. En los pequeños valles las pendientes varían de 2 a 15%, con poco afloramiento rocoso y pedregosidad superficial. Generalmente presentan suelos profundos con pocos fragmentos rocosos y la disponibilidad de nutrientes es moderada.

### 2.2.5 Cuenca de Huacata

En el sector oeste y central, afluente del río Pilaya Cambly tributario del río Pilcomayo, se encuentra la cuenca de Huacata que presenta paisajes de montañas medias y colinas con disección ligera y fuerte respectivamente que oscilan entre altitudes de (2.550 a 4.600 msnm), las pendientes van de 5 a 60% (inclinado a escarpado), presenta una erosión hídrica laminar en las pendientes, en tanto que en el componente de valle menor es de tipo hídrica – eólica. Presenta afloramientos rocosos que llegan hasta un 40%, la pedregosidad, es dominante llegando a un 80%. Los suelos son superficiales y la fertilidad es baja. El clima es árido con precipitaciones medias de 603 mm anuales y un período libre de heladas de 5 a 7 meses. La vegetación es herbácea de graminoideas bajas, y en componente de valles se presenta matorrales enanos xeromórficos. El Uso actual es la ganadería de pastoreo extensivo de ovinos, en los valles existe agricultura de cultivos anuales sin riego.

Al sur este se tiene un paisaje de meseta, compuesta por tres componentes: pendiente general, cima y valle menor, ubicados entre 2.600 y 2.950 msnm, con pendientes desde ligeramente inclinados (2-5%) hasta moderadamente escarpados (15-30%), con presencia de erosión de tipo hídrica en cárcavas. La presencia de afloramientos rocosos, va desde ninguna hasta un 5% y con un 15% de pedregosidad. Los suelos son moderadamente profundos y con una fertilidad regular. Gran parte de este paisaje no presente vegetación, y en lugares localizados se tiene vegetación herbácea de gramíneas bajas y matorral enano semidecíduo. El uso actual es de cultivos anuales como la papa a secano, y la ganadería es extensiva de bovinos, ovinos y caprinos.

## 3. VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN

### 3.1 CONCEPTO

En el análisis del comportamiento de la precipitación se aplicará la metodología estocástica que permite a través del uso de los principios del cálculo de probabilidades determinar un régimen de precipitaciones en la cuenca

Para ello se considerará la información pluviométrica registrada por el SENAMHI en todo el valle de Tarija y en toda la amplitud del registro dejando de lado si las estaciones están operando o no. Ver cuadro H-1, cuadro H-2 y figura H-4.

Estos valores consideramos la variable hidrológica la misma que se distribuye con una frecuencia asignada ( $m/1+n$ ) como representativa de la ley de probabilidades logarítmica normal, adoptada como la más apta para representar la variación que se sucede año tras año en la cuenca.





La ley de probabilidades log normal, representa la distribución de la variable logaritmo de la precipitación, con valores característicos de

$$M \{h\} = \sum (h) / n = \text{valor medio de los valores de } h$$

$$\sigma \{h\} = \text{Desviación estándar de los valores de } h$$

$$M \{y'\} = \sum (\log h) / n = \text{valor medio de los valores de } \log h$$

$$\sigma \{y'\} = \text{Desviación estándar de los valores de } \log h$$

$$M \{y'\} = \log M \{h\} - 1.1513 * \sigma \{y'\}$$

$$\sigma \{y'\} = (\sigma \{h\} * 0.4343 / M\{h\}) ^{0.5}$$

Los diferentes valores de  $y'$  de la serie de registros de cada pluviómetro, estarán comprendidos individualmente dentro de una franja de control de probabilidad asignado (5 % de no ocurrencia) que probaran (test) que pertenecen a una misma población de valores de  $y'$  y en conjunto pertenecerán a una zona o región, en la cual el valor medio de ellos recaerá en el interior de ella o en su defecto responderán a una ley de relación entre el valor de  $\sigma \{y'\}$  o  $M\{y'\}$  y un parámetro físico como ser la altura sobre el nivel del mar, la longitud y latitud geográfica, distancia a una montaña o cualquier otro parámetro físico. En cualquiera de estos casos representará para todo la zona o región, un mismo valor en el cual no se tiene variabilidad o ella se rige por una ley como la señalada.

### 3.2 Aplicabilidad

Los valores de precipitación de cada estación han sido ordenados (m), de menor a mayor y asignado una frecuencia (m/n+1) donde n es el número de años de registro y determinado sus valores centrales de precipitación {h}, logprecipitación (y'), desviación estándar s {h} y s {y'} como se muestra en la Tabla 3.3

Tabla 3.3. Valores característicos de la distribución de Precipitación total anual- Valle de Tarija

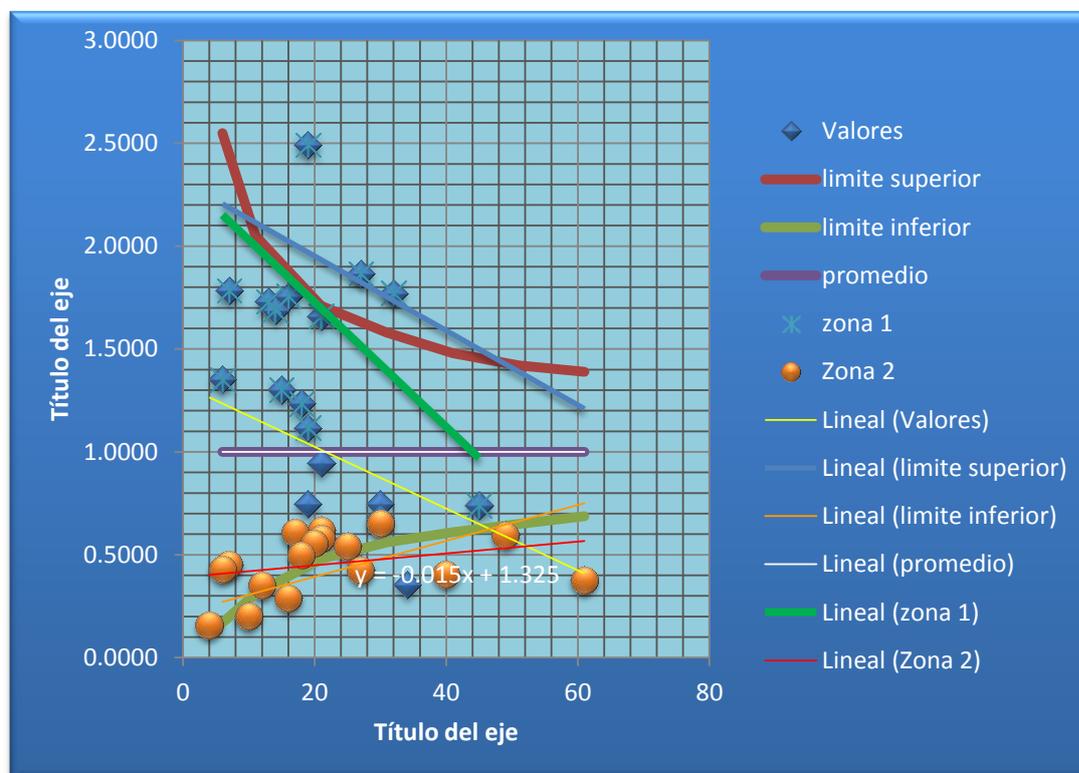
| VALORES CARACTERISTICOS DE PRECIPITACION ANUAL |         |          |        |                 |          |                     |         |                        |                               |
|--|---------|----------|--------|-----------------|----------|---------------------|---------|------------------------|-------------------------------|
| Estación                                       | Latitud | Longitud | Altura | Numero de datos | Promedio | Desviación estándar | M log x | s (log x) <sup>2</sup> | s (log x) <sup>2</sup> / prom |
| <b>Zona 1</b>                                  |         |          |        |                 |          |                     |         |                        |                               |
| Cejara   |         |          |        | 18              | 1121,23  | 498,2027            | 3,0068  | 0,037240               | 2,5542                        |
| La angostura                                   | -21,70  | 64,60    | 1690   | 15              | 339,31   | 97,8411             | 2,5125  | 0,015683               | 1,0756                        |
| El alto Cajas                                  | -21,30  | 64,47    | 2980   | 18              | 529,26   | 148,7678            | 2,7065  | 0,014903               | 1,0221                        |
| Guandacay                                      | -21,40  | 64,50    | 980    | 27              | 1095,65  | 416,2104            | 3,0083  | 0,027218               | 1,8668                        |
| San Andrés                                     | -21,62  | 64,82    | 1987   | 45              | 1034,93  | 247,6390            | 3,0025  | 0,010799               | 0,7407                        |
| Tucumillas                                     | -21,46  | 64,83    | 2557   | 19              | 790,18   | 346,7881            | 2,8559  | 0,036329               | 2,4917                        |
| Paicho centro                                  | -21,15  | 64,95    | 2570   | 9               | 607,44   | 348,7716            | 2,7119  | 0,062180               | 4,2648                        |
| Obrajes  | -21,50  | 64,76    | 1890   | 7               | 776,61   | 288,3371            | 2,8603  | 0,026000               | 1,7833                        |
| Sama   | -21,49  | 64,98    | 3820   | 18              | 749,38   | 231,6180            | 2,8540  | 0,018019               | 1,2359                        |
| León Cancha                                    | -21,18  | 64,72    | 2729   | 32              | 536,38   | 198,5542            | 2,6997  | 0,025846               | 1,7727                        |
| Gamoneda                                       | -21,48  | 64,63    | 1150   | 19              | 487,00   | 143,1020            | 2,6688  | 0,016286               | 1,1170                        |
| Sama Iscayachi                                 | -21,47  | 64,95    | 3440   | 13              | 409,72   | 149,8925            | 2,5834  | 0,025244               | 1,7314                        |
| El Molino                                      | -21,39  | 64,95    | 3387   | 14              | 465,59   | 168,2451            | 2,6397  | 0,024629               | 1,6893                        |
| Junacas  | -21,43  | 64,47    | 2300   | 21              | 511,56   | 183,3326            | 2,6810  | 0,024225               | 1,6615                        |
| Tja Cancha                                     | -21,40  | 64,77    | 2050   | 6               | 476,53   | 154,0485            | 2,6554  | 0,019711               | 1,3519                        |
| Colon Sud                                      | -21,75  | 64,65    | 2000   | 15              | 367,17   | 116,5176            | 2,5430  | 0,018995               | 1,3028                        |
| Tomayapo                                       | -21,27  | 65,05    | 2734   | 16              | 233,85   | 86,2068             | 2,3394  | 0,025632               | 1,7581                        |
| Concepción                                     | -21,70  | 64,62    | 1710   | 21              | 529,83   | 143,3438            | 2,7082  | 0,013806               | 0,9469                        |
| Cañas  | -21,90  | 64,85    | 2078   | 30              | 621,38   | 149,5876            | 2,7808  | 0,010931               | 0,7497                        |
| Ladera Centro                                  | -21,65  | 64,53    | 2080   | 19              | 375,86   | 90,2851             | 2,5625  | 0,010883               | 0,7465                        |

| <b>Zona 2</b>      |        |       |      |    |                 |                 |               |               |               |
|--------------------|--------|-------|------|----|-----------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|
| Calderillas        | -21,75 | 64,95 | 2800 | 30 | 1234,30         | 282,9806        | 3,0800        | 0,009914      | 0,6800        |
| Pinos Sud          | -21,73 | 64,88 | 2118 | 34 | 1147,27         | 189,5486        | 3,0537        | 0,005149      | 0,3531        |
| Padcaya            | -21,53 | 64,43 | 2010 | 30 | 610,06          | 137,1938        | 2,7744        | 0,009539      | 0,6543        |
| Canas Moro         | -21,35 | 64,75 | 2080 | 21 | 615,22          | 134,7748        | 2,7786        | 0,009052      | 0,6209        |
| San Lorenzo        | -21,42 | 64,75 | 1900 | 17 | 522,28          | 113,2503        | 2,7077        | 0,008869      | 0,6083        |
| Sn Jacinto sud     | -21,63 | 64,72 | 1820 | 49 | 566,07          | 121,4565        | 2,7429        | 0,008683      | 0,5956        |
| Yesera             | -21,37 | 64,55 | 1978 | 21 | 686,04          | 145,5538        | 2,8266        | 0,008490      | 0,5823        |
| Coimata            | -21,50 | 64,79 | 2027 | 20 | 713,68          | 147,6553        | 2,8442        | 0,008074      | 0,5538        |
| Juntas             | -21,81 | 64,80 | 1882 | 25 | 678,06          | 138,8657        | 2,8222        | 0,007911      | 0,5426        |
| CeNa Vit           | -21,73 | 64,66 | 1730 | 18 | 437,26          | 85,9230         | 2,6324        | 0,007283      | 0,4995        |
| Campanario         | -21,51 | 64,98 | 3460 | 7  | 353,84          | 66,1827         | 2,5412        | 0,006599      | 0,4526        |
| Huacata            | -21,24 | 64,85 | 2858 | 6  | 858,02          | 156,2935        | 2,9263        | 0,006258      | 0,4293        |
| Chococla           | -21,75 | 64,73 | 1795 | 27 | 637,57          | 115,7480        | 2,7974        | 0,006217      | 0,4264        |
| El Tejar           | -21,54 | 64,72 | 1851 | 40 | 619,81          | 109,9824        | 2,7854        | 0,005939      | 0,4073        |
| Tarija             | -21,55 | 64,71 | 1849 | 61 | 597,49          | 102,0837        | 2,7700        | 0,005506      | 0,3776        |
| Sn Ncolas          | -21,72 | 64,68 | 1800 | 12 | 487,97          | 80,5727         | 2,6825        | 0,005143      | 0,3527        |
| Trancas            | -21,31 | 64,82 | 3800 | 16 | 788,51          | 118,2330        | 2,8919        | 0,004241      | 0,2909        |
| Sn Jacinto embalse | -21,61 | 64,72 | 1820 | 4  | 497,95          | 55,2516         | 2,6945        | 0,002322      | 0,1593        |
| Qda. Sellas        | -21,39 | 64,68 | 2145 | 10 | 616,36          | 77,1455         | 2,7864        | 0,002955      | 0,2027        |
| <b>Promedio</b>    |        |       |      |    | <b>631,5781</b> | <b>162,2549</b> | <b>2,7581</b> | <b>0,0146</b> | <b>1,0000</b> |

Fuente: Elaboración propia

Con los valores de la desviación estándar al cuadrado del logaritmo de la precipitación anual y aplicando el test del chiquadro ( $\chi^2$ , para n grados de libertad), se determina qué valor de precipitación en toda el área adoptado como un valor medio e igual a 0.0146. Como señala la Tabla 3.3

Figura 3.1. Variabilidad de la desviación Standard de Precipitación (total)



Fuente: Elaboración propia

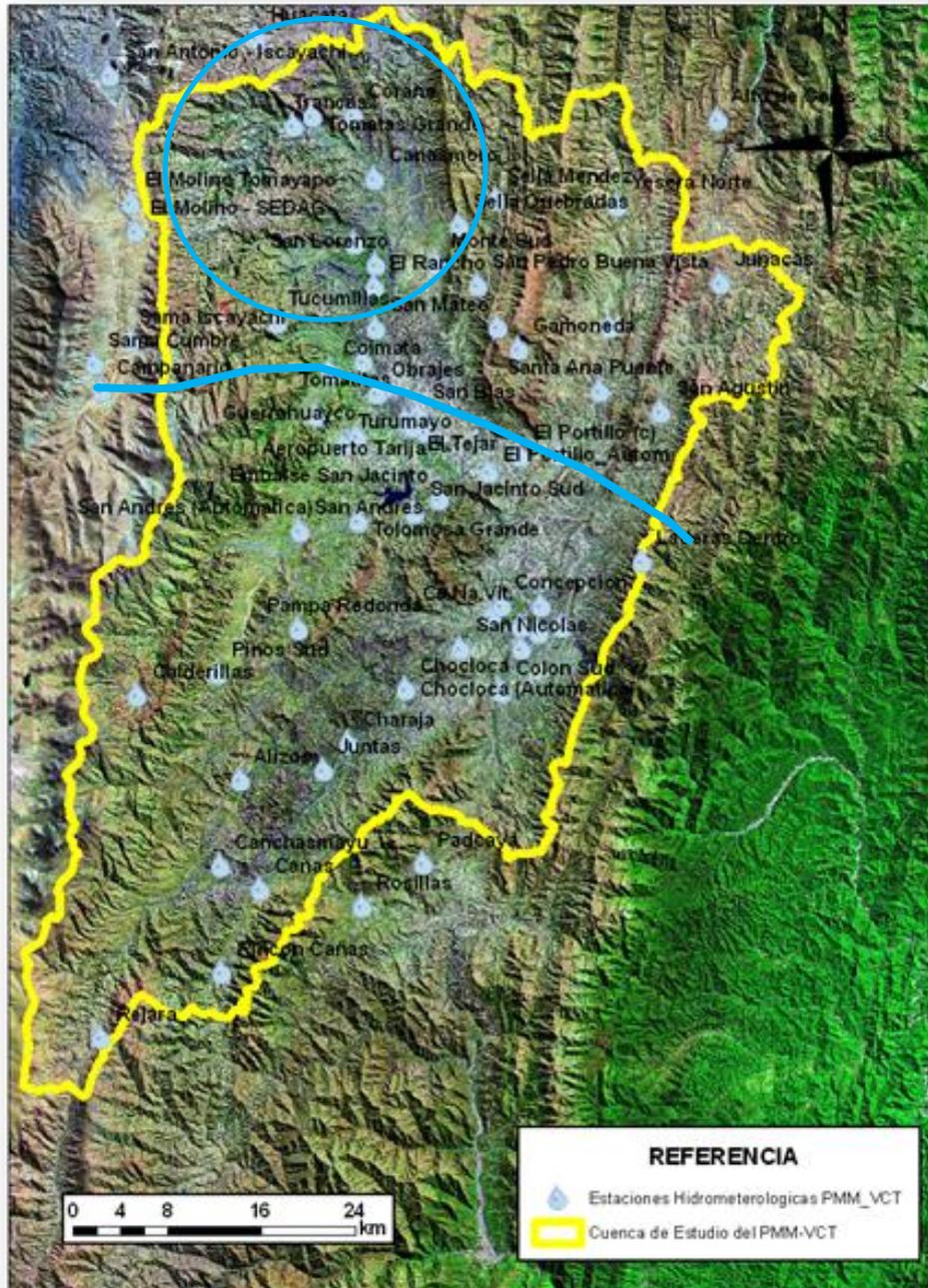
El valor “s” corresponde a la desviación estándar de los logaritmos de los valores registrados de precipitación anual en la estación i, mientras que corresponde al valor tomado como representativo de la población de los logaritmos de la precipitación anual en toda la región, en este caso el promedio de todos los  $s(\log h)^2$ . En este gráfico se puede advertir que la mezcla de los valores señalados en color verde como aquellos de color rojo, se encuentran agrupados, por un lado en la parte alta los de color verde y debajo los de color rojo, lo cual muestra que se tiene en dos Zonas o regiones con diferente valor de  $\sigma^2$ .

Tomando esta hipótesis, se puede verificar que existe una zona (denominada 1) que se encuentra en la parte superior de la cuenca y dispone de una variación de probabilidades de ocurrencia grande (valor de desviación estándar elevado), mientras que en el resto del valle, la diferencia o dispersión de los valores es menor (zona 2). El valor de  $\sigma^2$  muestra la inclinación de la recta de probabilidades, a menor inclinación la desviación estándar, respecto al valor central es menor. En la gráfica se muestran unos valores altos, sobre 0.020 (color verde) y otros con valores menores a 0.008 (color rojo) que se agrupan

Estas dos zonas se muestran en la figura H-5, la zona 1 abarca la parte alta de la cuenca del Guadalquivir hasta la serranía del sama, mientras que la zona 2, es la parte baja pasando Padcaya.

La determinación de las zonas se efectuó con el cálculo de la desviación estándar elevada a dos y el valor del chi-cuadrado sobre un diagrama de representación del par de valores de  $s^2 - n$ , donde n es el número de años de registro.

Figura 3.2. Zonas pluviométricas



Fuente: Elaboración propia

La serie del par de valores de  $s^2\{\log\}$  y el número de años, han sido representados en un diagrama similar para cada zona como se muestra en la Tabla 3.2.

Figura 3.3. Variabilidad de la desviación Standard de Precipitación Zona1

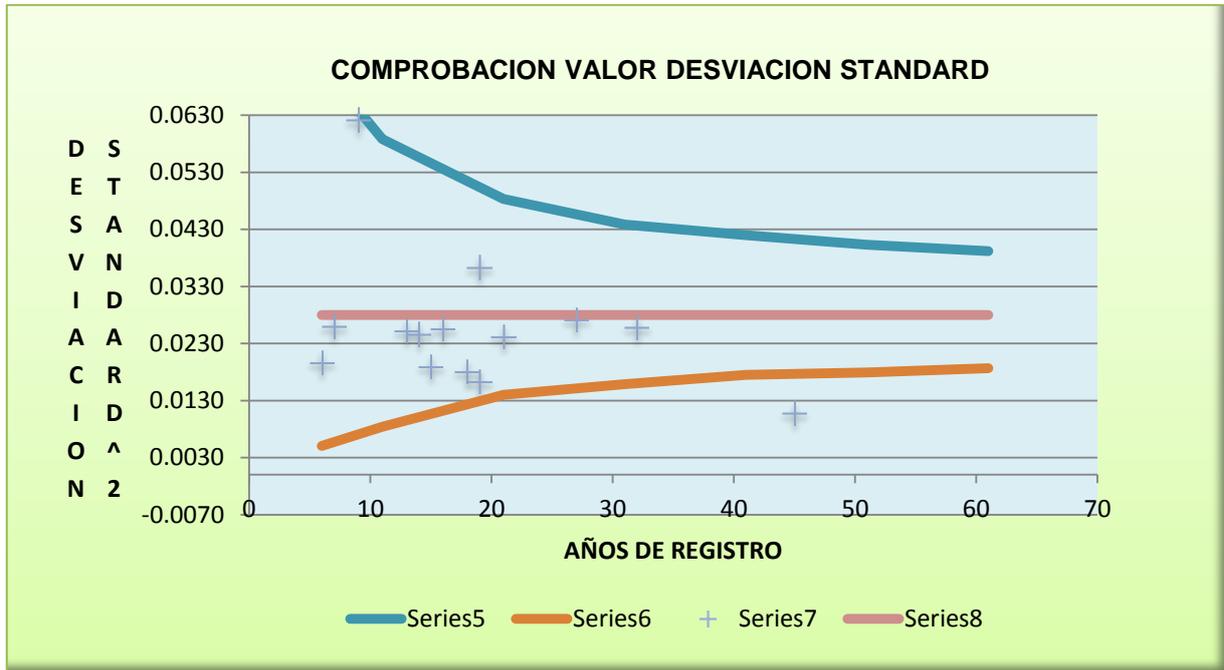
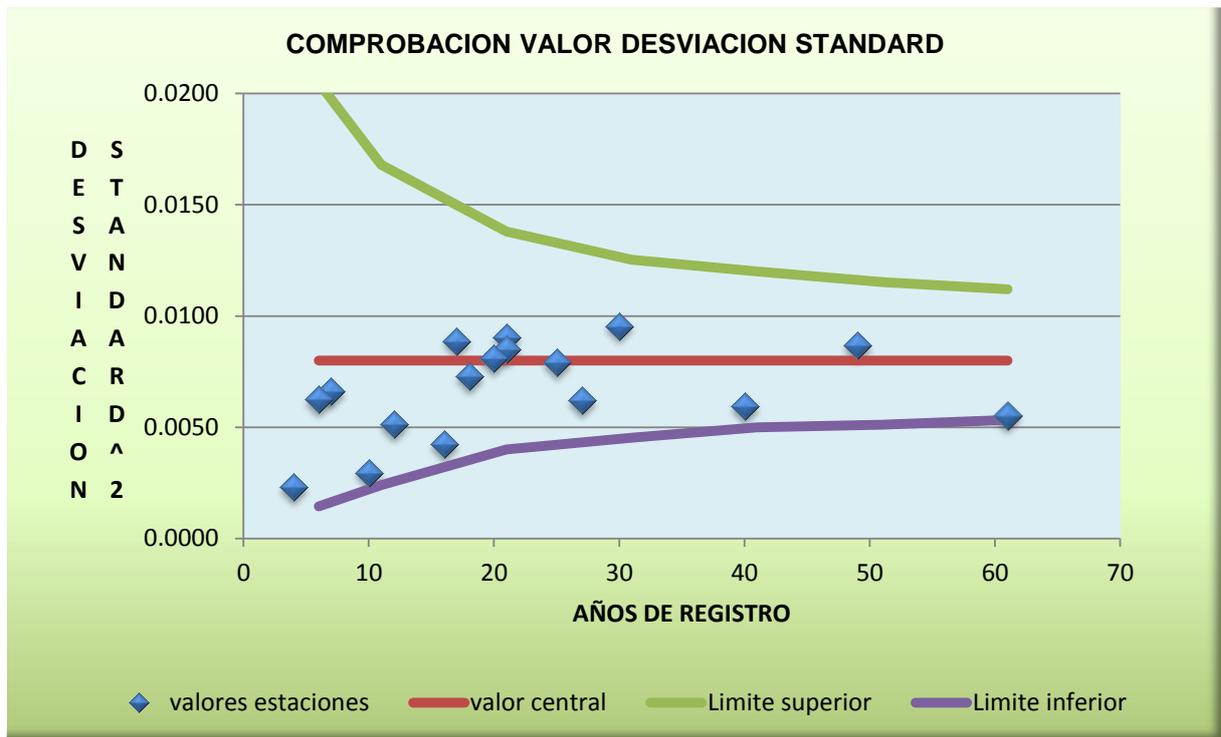


Figura 3.4. Variabilidad de la desviación Standard de Precipitación Zona 2



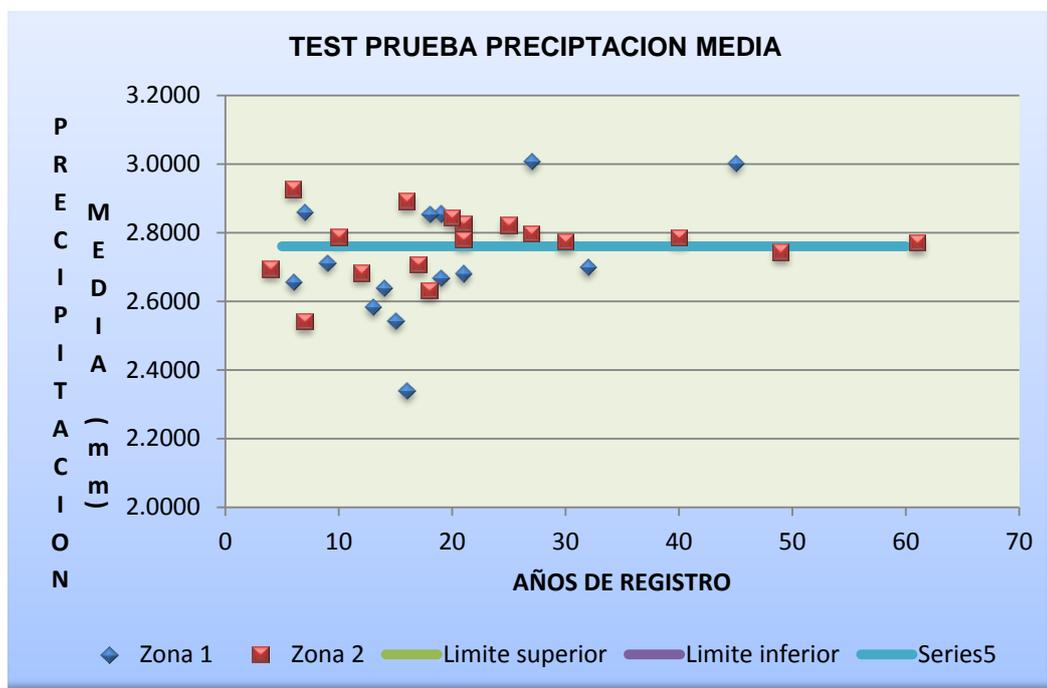
Fuente: Elaboración propia

En el test de ambas zonas, se muestra que los valores de cada estación recaen, en general, en el interno de las franjas de control, establecidas para un probabilidad de no ocurrencia del 5 %. Para la zona 1 el valor central de  $\sigma^2 \{y\}$ , es de 0.0249 y en la zona 2, es 0.0082.

El **valor medio de la precipitación**, tomando todos los valores que adopta  $M \{y\}$  para cada pluviómetro y sus valores de años de registro, se muestra que el par de valores en general está comprendido dentro

de las franjas de control y están mezclados los valores de cada zona como fue determinada anteriormente.

Figura 3.5. Variabilidad de la Precipitación media (Total)



Fuente: Elaboración propia

En general se podría aceptar un único valor representativo del logaritmo de la precipitación para toda la región, porque los distintos valores de la  $M(\log h)$  están mezclados sin tendencia alguna y los valores que salen de la franja de control para una probabilidad del 95 % son 7.

Para estar seguros, se ha dispuesto efectuar otra prueba y es la variación de la precipitación con la altura sobre el nivel del mar y en segunda instancia la variación con la longitud terrestre. La representación se muestra en la Figura 3.2.5

Figura 3.6. Precipitación Media VS – Alturas S M M (Zona 1 y Zona 2)

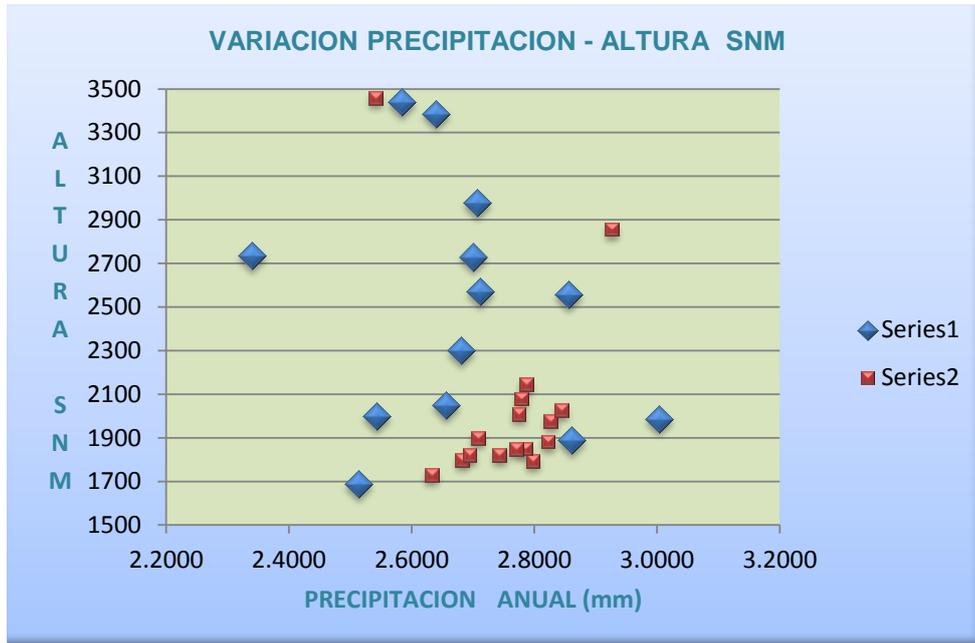
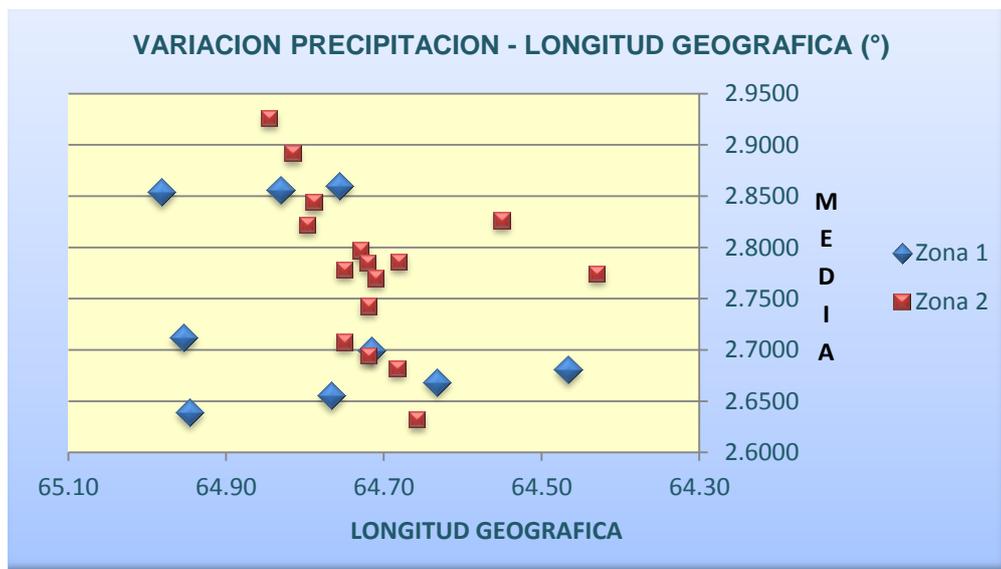


Figura 3.7. Variación Precipitacional Anual con Longitud Terrestre



Fuente: Elaboración propia

La variación de la altura sobre el nivel del tanto en la zona 1 como 2, no muestra un claro efecto, como se da con el posicionamiento de la estación en sentido Este a oeste, llevando a valores altos de cerca de 1000 mm cuando supera los 2800 nsnm y la longitud es mayor a 95.95 (°). Por otra parte, se puede apreciar que en la parte de la planicie de la cuenca del Camacho cuando se acerca a la cordillera el valor de precipitación disminuye a medida que se desplaza de este a oeste, posiblemente porque las masa de aire que circula hacia la cuesta de sama impiden el movimiento y se descarga la precipitación en una menor altura.

### 3.3 RESULTADOS

La variabilidad de la precipitación en cuanto se refiere a su desviación respecto a la media se da en dos zonas, la primera la parte central del valle donde la dispersión de valores año tras año es menor y otra zona ubicada en la parte norte en la cual la variación de la precipitación año tras año, es grande

haciendo que un año llueva más que en el siguiente o que se tenga períodos de notable humedad y otros de notable sequedad.

Dentro de estas zonas se establece que la parte de la cordillera del sama hasta el Taxara, adopte valores de precipitación media variable a según de ubique la estación de Este a oeste y supere la cota en el valor de 2800 msnm, mientras que se tendrá otra subzona ubicada en la parte central donde también aumentara el valor de precipitación al moverse de Este a oeste y finalmente una tercera subzona comprendida en la cuenca del río Camacho, en la cual se invierte la variación haciendo que la precipitación sea mayor al oeste hacia el Este

Por ello es importante considerar para cada sitio de obra, su localización y de la propia cuenca con lo cual se podrá estimar la precipitación media y de ella deducir los caudales tomando una distribución de ellas en las diferentes estaciones de medida.

## 4. DISTRIBUCION DE LAS ESCORRENTIAS

### 4.1 CONCEPTOS Y SU APLICACIÓN

En los párrafos que siguen, refiriéndose a una genérica sección Z de un curso de agua, se indicará:

- Con S, en km<sup>2</sup>, la proyección horizontal de la superficie de la cuenca que alimenta a Z;
- Con D, D<sub>s</sub> y con d<sub>min</sub>, expresada en 10<sup>6</sup> metros cúbicos o milímetros de lámina de agua uniformemente distribuida sobre la superficie S, los volúmenes de Agua que atraviesan Z, respectivamente, en un año (Escorrentía anual), D<sub>s</sub>, durante la estación seca (Escorrentía ocurrida en la estación seca) y en el mes de menor Escorrentía (mínimo flujo mensual).

Al igual que todas las demás magnitudes hidrológicas, consideradas hasta el momento, los valores asumidos año tras año de D, de D<sub>s</sub> y de d<sub>min</sub>, pueden ser tratados como variables aleatorias cuya distribución de probabilidad puede ser caracterizada por:

- Especificando la función de distribución  $\{\phi\{D\}, \phi\{D_s\} \text{ e } \phi\{d_{min}\}\}$
- O especificando los valores que corresponden a valores asignados de  $\phi(D\phi, D_s\phi \text{ y } d_{min}\phi)$ ,

Dicho esto, si en la sección Z existe una estación de medida:

- Se indica con n, la duración del período de observación, o, más precisamente, el número de años para los cuales se conocen los valores medidos respectivamente para D, D<sub>s</sub> y d<sub>min</sub>.

Si se dispone de los n valores de D, de D<sub>s</sub> y de d<sub>min</sub> registrados durante los sucesivos años del período de observación en orden ascendente, marcando con el índice 1 el más pequeño de estos valores, con el índice i, con  $1 < i \leq n$ , el i-ésimo de dichos valores a partir del valor mínimo, y con el índice n el más grande de dichos valores;

Si se asume igual a  $i/n+1$ , la frecuencia acumulada de  $F\{D_i\}$ ,  $F\{D_{si}\}$  y  $F\{d_{min}, i\}$ , que corresponden al valor iésimo en la serie estadísticas constituida por los n valores de D, DS y dmin registrados durante el período de observación;

Se indicará, con  $D_F$ . Con  $D_{s, F}$  y con  $d_{min, F}$ , los valores de D, DS y dmin correspondiente a una determinada frecuencia acumulada F.

Teniendo en cuenta, la definición introducida sobre el Aflujo, que representa la lámina de precipitación uniformemente distribuida en la superficie de la cuenca S, que ocurre en una cuenca, expresada en milímetros caído sobre la cuenca que alimenta Z, y sea la escorrentía D que atraviesa Z en un determinado año, se caracterizará el **balance hidrológico** de la cuenca para dicho año, haciendo referencia a los valores asumidos respectivamente por:

- $P = A - D$  (pérdida aparente anual)
- O, de  $p = (A-D)/A = P/A$  (perdida aparente anual por unidad de aflujo)

- O, de  $\mu = D/A = 1-p$  (coeficiente de escorrentía anual)

Para los pares de valores de A y de D, las cantidades P, p, y  $\mu$  son diferentes de año tras año y, como tal, deben tratarse como variables aleatorias, de las cuales es posible definir la función de distribución  $\Phi$ , de los valores correspondientes a una asignado valor de  $\Phi$  en la distribución acumulada F de la serie formada por los valores estadísticos que cada uno de ellos ha asumido año tras año en los sucesivos años de observación y, finalmente, los valores que en dicha serie corresponden a un valor dado de F.

Teniendo en cuenta que, en el tratamiento de la precipitación y de ella el aflujo A, es factible tener conocido el valor de  $A_\phi$  de A que corresponde a un mismo valor de  $\Phi$

Si se caracteriza el vínculo que existe entre la distribución de probabilidad de la A y la D, especificando los valores asumidos:

- De  $P_{F=\phi} = A_\phi - D_{F=\phi}$ , diferencia entre  $A_\phi$  e  $D_{F=\phi}$
- De  $P_{F=\phi} = \frac{A_\phi - D_{F=\phi}}{A_\phi} = \frac{P_{F=\phi}}{A_\phi}$  relación entre  $P_{F=\phi}$  e  $A_\phi$
- De  $\mu_{F=\phi} = \frac{D_{F=\phi}}{A_\phi} = 1 - P_{F=\phi}$  relación entre  $D_{F=\phi}$  e  $A_\phi$

Con criterio análogo, se puede indicar con  $M\{D\}$ , la media aritmética de los n valores de D registrados durante el periodo de observación y con  $M\{A\}$  el valor medio de la distribución de probabilidad de la A, se caracterizará el balance hidrológico de la cuenca con el valor asumido por la relación  $M\{D\}/M\{A\}$

Come es obvio,  $D_{F=\phi}$  e  $\bar{D}$  son solamente estimas empíricas de los frtiles  $D_\phi$  di  $\phi$  y del valor medio  $M\{D\}$  de la distribución de probabilidad de la escorrentía anual D y puede separarse de este valor por defecto de muestreo.

En consecuencia,

- $P_{F=\phi}$ ,  $p_{F=\phi}$  e  $\mu_{F=\phi}$  son estimas empíricas de  $P_\phi = A_\phi - D_\phi$ , de  $P_\phi = \frac{(A_\phi - D_\phi)}{A_\phi} = \frac{P_\phi}{A_\phi}$  y de  $\mu_{F=\phi} = \frac{D_\phi}{A_\phi} = 1 - p_\phi$
- Y  $\bar{m}$  es solamente estima empírica del coeficiente de escorrentía media anual  $\bar{\mu} = \frac{M\{D\}}{M\{A\}}$

Como es costumbre, para deducir la distribución de probabilidad de las escorrentía D (Escorrentía anual), Dos (Escorrentía en la estación seca) y min (valores mínimos mensual) para cada una de las estaciones de medida que sean consideradas, se debe tomar en cuenta las series estadística constituidas por los valores asumidos por D, Dos, y min en los sucesivos años del período para el cual la estación ha estado en funcionamiento.

En particular, con el fin de establecer posteriormente una comparación entre los valores que D, Dos y min, que pueden asumir a igualdad de probabilidad en una estación de medida con superficies de cuencas diversos una de la otra, en lugar de los volúmenes de agua que atraviesan cada una de las estaciones de medida en un asignado intervalo de tiempo, se prefiere hacer referencia a la cantidad por unidad de superficie, que la cuenca en cada estación, proporciona dichos volúmenes, considerando D, Dos y dmin en lugar de tomar en  $10^6$  m<sup>3</sup>, expresarlo en mm de lámina de agua distribuida uniformemente sobre la proyección horizontal de S de la cuenca sustentada en el punto Z.

Si se consideran sólo las estaciones con un período de observación mayor de 10 años y si para cada

una de ellas se asume como medida de variabilidad de las D, el parámetro  $D = \frac{\overline{D} + D_1}{2}$  (diferencia entre los valores asumidos de la media de D y el mínimo valor registrado D1) que expresa la relación con el valor medio  $M\{D\}$ , se pueden comparar las cuencas y en las estaciones de medida de Bolivia, varía de un máximo de 53, a un mínimo de 42 en las estaciones de la faja del subandino.

El flujo en la estación seca,  $D_s$ , como se definió anteriormente, representa siempre una proporción bastante baja de la escorrentía anual D (en promedio alrededor de 30 al 40 %, expresándolos en porcentaje, los valores asumidos de cada estación de la relación  $M\{D_s\}/M\{D\}$  entre las medias aritméticas de  $D_s$  y de D).

Como regla general, con el fin de identificar una conexión de enlace, en lugar de D, se hizo referencia a una u otra de las magnitudes  $P = A - D$  (perdida aparente anual),  $p = (A - D)/A = P/A$  (pérdida aparente por unidad de aflujo anual) y  $\mu = D/A = 1 - p$  (coeficiente de escorrentía anual) tratando de precisar, la ley de la dependencia de A de cada una de las estaciones.

Por supuesto, dado que, a la par de D y de A, cada una de las cantidades P, p y  $\mu$  de A, son relaciones intensas, en el sentido estadístico. Más precisamente se debe entender que para un mismo valor de A corresponden valores de P o de p o de  $\mu$  de vez en vez diversos, variables, pero, en torno a valores que resultan función de A. Por consiguiente, se puede concretar la ley de dependencia P (A), p (A) y  $\mu$  (A) de P, de p y de  $\mu$  de A. (Ley de la dependencia de P, de p y de  $\mu$  sobre A).

Como es evidente. Si, refiriéndose a la cuenca sustentada en una genérica sección Z, se indica con A el aflujo caído sobre la cuenca, en un determinado año, la escorrentía que A provoca en Z, no coincide con la escorrentía de D registrado en Z en el mismo año. En efecto una parte  $d_1$  de la escorrentía provocada por A, pasa en Z no en el mismo año al cual se refiere A, más en el año sucesivo y como tal, no está comprendida en D. Al mismo tiempo, una parte  $d_2$  de D, es debida al aflujo caído sobre la cuenca en el año precedente.

Por consiguiente se puede indicar que si se quiere hacer un balance entre el Aflujo A y la escorrentía D, que este provoca en Z, sería necesario corregir el valor de D por un lado sumando a este un término igual a  $d_1$  y del otro lado sustraer del mismo un término igual a  $d_2$ .

No obstante esto, las leyes de la regresión P (A), p (A) y  $\mu$  (A), definidas solamente desde el punto de vista estocástico, puede ser adoptada también desde un punto de vista físico para representar las leyes de la dependencia entre efecto causa que caracteriza el balance hidrológico, entre el aflujo A, que cae sobre una cuenca en un año determinado y la escorrentía que por efecto de ella pasa a través de la sección Z, que sustentada la cual en parte cruza en el mismo año y en parte en el año sucesivo.

Por cuanto se ha dicho aquí, de hecho, si se quiere emprender un balance, más estricto, introduciendo las variables P, p  $\mu$  tendría que referirse no a D, sino a la suma  $D + (d_1 - d_2)$ . Se tendría que tener en cuenta que a la par del valor de A, la escorrentía en Z, habría podido asumir valores diversos de caso en caso, no solamente porque varía el efecto debido a los múltiples factores que con A intervienen en el balance hidrológico de la cuenca, mas aunque porque varía de caso a caso la diferencia ( $d_1 - d_2$ ) entre la escorrentía  $d_1$ , provocada por A y pasada en Z en el años sucesivos y la escorrentía  $d_2$ , que atraviesa Z en el mismo año pero que ha estado provocada no por A, sino por la lluvia caída en el año precedente. – es evidente, pero, que si se fuera a calcular los valores medios asumidos de P de p y de  $\mu$  para un asignado valor de A, con el fin de deducir la ley de P(A), p(A) y  $\mu$ (A), las diferencia ( $d_1 - d_2$ ) habrán terminado por compensarse.

En particular, de acuerdo con lo que se encuentra en las investigaciones anteriores, se asume como hipótesis de trabajo que la regresión de la ley P en A puede volver a una expresión algebraica del tipo:

- $P = C A^{\pm n}$ , y en consecuencia, puede ser representada por medio de una recta en un diagrama en carta logarítmica. para cada una de las estaciones hidrométrica tomadas en consideración.

En el caso de la faja del subandino, donde se presentan años secos, la ley teórica de variación, que toma en consideración la evapotranspiración, la capacidad hídrica del suelo, adopta la función de

▪  $P=3.414 A^{-0.813}$

Si se representa en un diagrama en papel probabilístico correspondiente a la ley logarítmica normal del caso:

- La serie de puntos ( $D_f ; F[D]$ ) que representa la distribución de frecuencias acumuladas en una muestra compuesta por n valores de D registrados durante el período de observación.
- La línea recta  $\phi[A]$  deducida con los criterios para caracterizar la distribución de probabilidad de los aflujos anuales en la cuenca
- La serie de puntos ( $D\Phi ; \phi[D]$ ) que se deducen de  $\phi[A]$  para valores asignados de ajuste  $\Phi$  poniendo  $D\Phi = A\Phi - P\Phi$  y estimando  $P\Phi$  por medio de leyes de la regresión de P en A señalada anteriormente.

Se ha representado con P las pérdidas ocurridas del Aflujo, dentro las cuales están los valores de Evapotranspiración, Infiltración, detención de la escorrentía, la evaporación que hacen al balance hidrológico. De ellas la de mayor incidencia es la evapotranspiración.

Dicho esto, si se tiene en cuenta:

- Que la efectiva evapotranspiración en un período de tiempo dado se produce a expensas de la lluvia que cae en el mismo período de tiempo y del agua libre que está contenida en las capas de suelo afectado por las raíces de la vegetación.
- Que el volumen de agua contenida en el suelo libre y que puede vincularse con los fenómenos de evapotranspiración, puede alcanzar un valor máximo U, capacidad hídrica del terreno, que es función de la naturaleza del terreno, la vegetación que lo cubre y el tipo de cultura que se realice.

Indicando con  $E_s$ , con  $E_u$  y con E respectivamente la evapotranspiración efectiva en la estación seca, en la estación de lluvias y durante todo el año.

En la época de lluvias, para  $A_u > Ep_u$ , La evapotranspiración efectiva  $E_u$  coincide con  $Ep_u$  y , en su totalidad o en parte, la excedencia  $A_u - Ep_u$  se infiltra en el terreno hasta llevar el contenido de agua libre que se puede vincularse en los fenómenos de evapotranspiración en la estación seca posterior a un valor que como máximo puede ser igual a U. Se ha demostrado que en los climas áridos este valor es de 100 a 200 mm

En la estación seca, para  $A_s > Ep_s$ , la evapotranspiración efectiva  $E_s$ , resulta igual a la evapotranspiración potencial  $Ep_s$ , solamente si la suma de A y del contenido de agua libre aprisionada en el terreno, al final de la estación precedente húmeda, supera o es igual a  $Ep_s$ , mientras que si resulta inferior a  $Ep_s$  se tiene lo contrario .

#### 4.2 INFORMACIÓN DISPONIBLE Y SUS VALORES DE MEDIDA

En el valle de Tarija se dispone de información en diversas estaciones como muestra la Tabla 4.1, que las opera el SENAMHI, pero solo 8 tienen registros continuos y de pocos años de medición.

Tabla 4.1. Estaciones Hidrométricas de la Cuenca del Valle Central de Tarija

| Estación                  | Provincia | Tipo | Latitud <sup>1</sup> | Longitud <sup>6</sup> | Altitud | Cuenca       | Área(km <sup>2</sup> ) | Medición |
|---------------------------|-----------|------|----------------------|-----------------------|---------|--------------|------------------------|----------|
| Yesera Norte              | Cercado   | A    | 21°22'12.93"S        | 64°32'51.15"O         |         | Santa Ana    | 55.11                  | Eventual |
| Yesera Sur                | Cercado   | A    | 21°27'47.84"S        | 64°33'27.87"O         | 2092    | Santa Ana    | 155.76                 | Eventual |
| Calderas                  | Cercado   | A    | 21°27'54.83"S        | 64°33'41.10"O         | 2085    | Santa Ana    | 41.4                   | Eventual |
| Santa Ana Puente          | Cercado   | A    | 21°31'7.20"S         | 64°34'19.87"O         |         | Santa Ana    | 252.79                 | Eventual |
| Calderillas               | Cercado   | E    | 21°40'15.70"S        | 64°54'5.47"O          |         | Tolomosa     | 108.86                 | Eventual |
| San Andrés (Sola)         | Cercado   | A    | 21°40'15.70"S        | 64°54'5.47"O          |         | Tolomosa     | 168.39                 | Eventual |
| Pantipampa                | Cercado   | A    | 21°38'41.33"S        | 64°49'58.16"O         |         | Tolomosa     | 82.98                  | Eventual |
| San Andrés (Sola + Pinos) | Cercado   | A    | 21°38'30.11"S        | 64°49'45.42"O         |         | Tolomosa     | 251.37                 | Eventual |
| Tolomosita                | Cercado   | A    | 21°35'30.42"S        | 64°46'0.92"O          | 1913    | Tolomosa     | 73.96                  | Continua |
| Tolomosa                  | Cercado   | A    | 21°35'30.42"S        | 64°46'0.92"O          | 1913    | Tolomosa     | 336.02                 | Continua |
| San Jacinto               | Cercado   | A    | 21°36'8.04"S         | 64°43'35.86"O         |         | Tolomosa     | 438.26                 | Continua |
| Angosto Coimata           | Cercado   | E    | 21°29'41.21"S        | 64°48'36.28"O         |         | Guadalquivir | 13.14                  | Continua |
| Lajas                     | Cercado   | E    | 21°23'22.85"S        | 64°44'53.10"O         |         | Guadalquivir | 335.7                  | Eventual |
| Cañas                     | Arce      | A    | 21°54'14.51"S        | 64°51'27.02"O         |         | Camacho      | 72.91                  | Eventual |
| San Nicolás               | Avilés    | A    | 21°43'50.82"S        | 64°42'7.10"O          | 1800    | Camacho      | 751.37                 | Eventual |
| Trancas                   | Méndez    | A    | 21°18'26.35"S        | 64°48'58.06"O         |         | Guadalquivir | 131.64                 | Eventual |
| Canasmoro                 | Méndez    | A    | 21°21'23.13"S        | 64°44'52.90"O         | 2085    | Guadalquivir | 234.09                 | Continua |
| Sella Quebradas           | Méndez    | A    | 21°23'12.03"S        | 64°40'55.02"O         | 2119    | Guadalquivir | 147.26                 | Continua |
| Obrajes                   | Cercado   | A    | 21°30'20.52"S        | 64°45'45.62"O         | 1922    | Guadalquivir | 909.28                 | Continua |
| San Luis                  | Cercado   | A    | 21°35'17.66"S        | 64°41'10.95"O         |         | Guadalquivir | 1538.68                | Eventual |
| La Angostura              | Cercado   | A    | 21°42'24.29"S        | 64°35'46.89"O         |         | Guadalquivir | 3249.03                | Eventual |
| Huacata                   | Méndez    | A    | 21°14'24.36"S        | 64°50'37.73"O         | 2356    | Pilaya       | 41.26                  | Continua |

Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

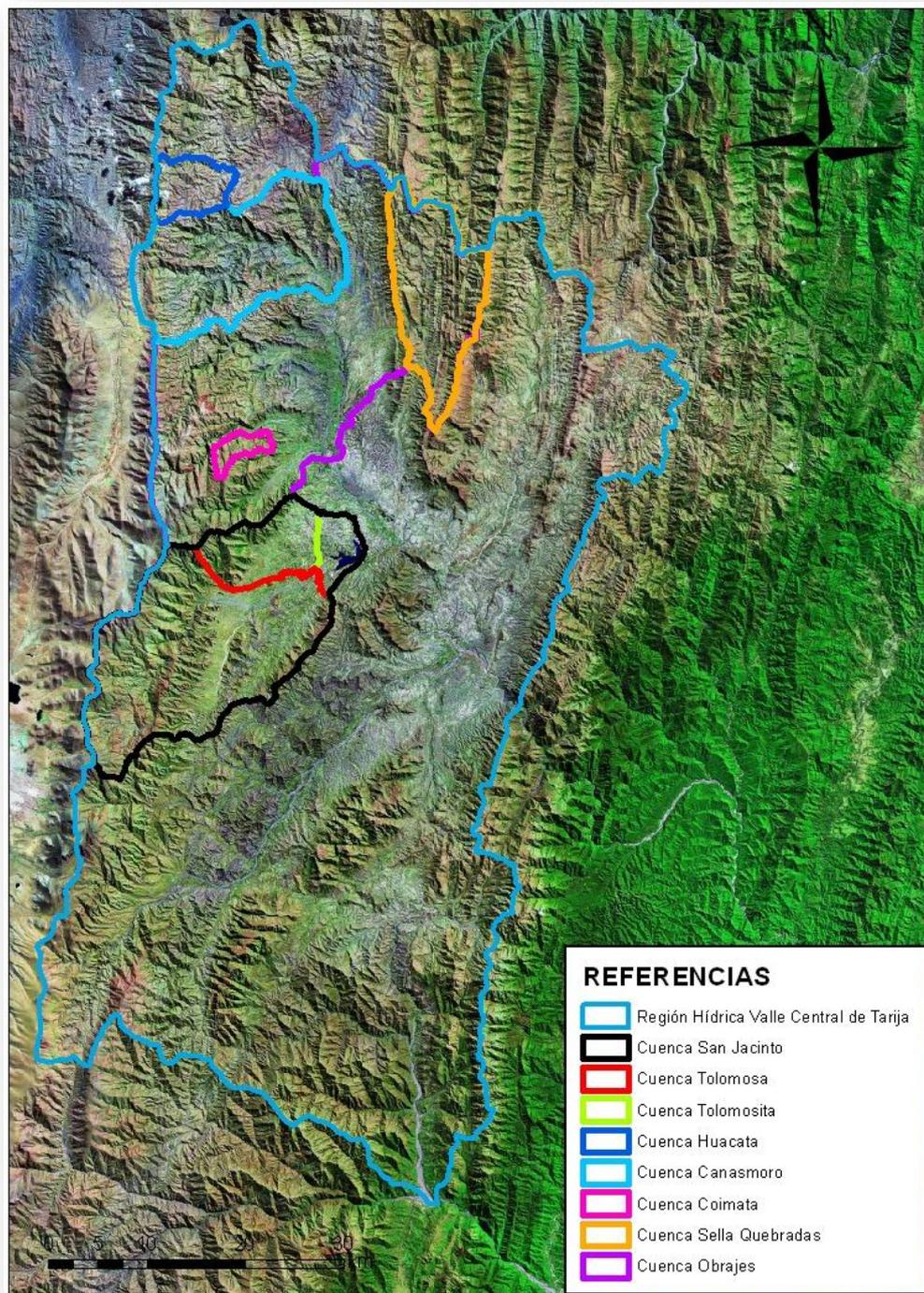
Las estaciones hidrométricas que poseen un registro continuo, de tal manera que permitieron inferir estadísticos son aquellas que se representan en la Tabla 4.2

Como se puede observar en la figura, las estaciones hidrométricas que poseen un registro continuo se encuentran ubicadas en la zona centro nor-oeste de la cuenca del Valle Central de Tarija, lo que se traduce en una regionalización de las variables en la zona de interés para fines del aprovechamiento hídrico de la serranía de Sama.

Con los valores registrados en las estaciones hidrométricas y la evaluación de la precipitación media del área de la cuenca delimitada en el punto de desembocadura coincidente con la ubicación de la estación hidrométrica, se determinaron los parámetros de la Tabla 4.2

<sup>1</sup> Coordenadas obtenidas en coordinación con el personal técnico del SENAMHI y el apoyo del software Google Earth, 2012

Figura 4.1. Cuencas de las Estaciones Hidrométricas Del Valle Central de Tarija con registro continuo



Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

Tabla 4.2. Parámetros hidrológicos de las cuencas delimitadas en el sitio de ubicación de las Estaciones Hidrométricas de Registro Continuo

| Estación        | Coefficiente de Escorrentía Anual | Área (km <sup>2</sup> ) | Escorrentía (mm/año) | Aflujo (mm/año) | Caudal específico (l/s/km <sup>2</sup> ) |
|-----------------|-----------------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------|--|
|                 | D/A                               |                         |                      |                 |  |
| Tolomosa        | 0,336                             | 336                     | 344                  | 1025            | 10,928                                   |
| Tolomosita      | 0,414                             | 74                      | 411                  | 993             | 13,061                                   |
| San Jacinto     | 0,690                             | 438                     | 482                  | 698             | 15,295                                   |
| Coimata         | 0,393                             | 13                      | 280                  | 713             | 8,904                                    |
| Canasmoro       | 0,329                             | 234                     | 202                  | 615             | 6,421                                    |
| Sella Quebradas | 0,184                             | 147                     | 113                  | 616             | 3,599                                    |
| Obrajes         | 0,225                             | 909                     | 175                  | 777             | 5,552                                    |
| Huacata         | 0,289                             | 41                      | 245                  | 849,4           | 7,780                                    |

Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

Existen dos estudios hidrológicos, de los últimos años, que se han desarrollado para proyectos en el área.

El primero sobre la cuenca de Tolomosa realizado por el INIBREH, el cual mediante un modelo matemático, analiza los valores registrados en la estación de medida en el periodo 1977 a 1981 y reproduce con el modelo, los caudales, determinando un balance hídrico diario y obtiene valores de escorrentía para dicho periodo. Estos valores ordenado y asignando una frecuencia  $F\{D\}$ , son:

Tabla 4.3. Balance hídrico Cuenca Tolomosa

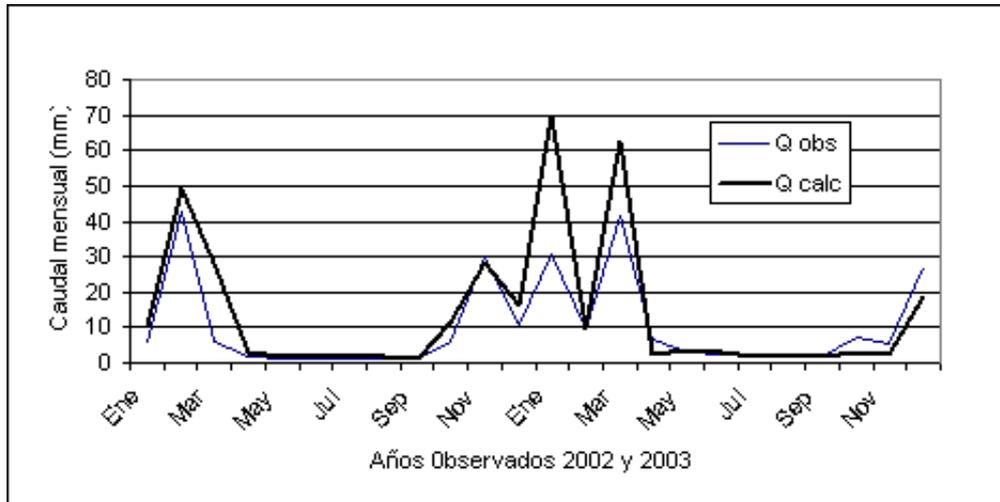
| Dm  | F(D)  | m |
|-----|-------|---|
| 227 | 0,125 | 1 |
| 369 | 0,250 | 2 |
| 443 | 0,375 | 3 |
| 504 | 0,500 | 4 |
| 524 | 0,625 | 5 |
| 524 | 0,750 | 6 |
| 593 | 0,875 | 7 |

Fuente: Elaboración propia

El otro estudio corresponde al proyecto Huacata en el cual se utiliza el modelo Caudal – Precipitación. El modelo utilizado es de tipo determinístico conceptual de parámetros globales, desarrollado por la Vrije Universiteit Brussel. Las entradas están constituidas por precipitaciones mensuales y datos de evaporación mensual representativa de la cuenca en estudio. Los parámetros, en número de cuatro han sido determinados basándose en la simulación para los meses observados y como éstos resultaban insuficientes fue necesario utilizar como base de comparación los parámetros determinados para otras cuencas como Misicuni que cuenta con varios años de observaciones concurrentes de Precipitación y Caudal.

Los resultados de la calibración pueden verse en la siguiente *figura* donde los valores están expresados en mm de lámina escurrida mensualmente.

Figura 4.2. Comparación entre Caudal Observado y Calculado por el modelo



Fuente: Elaboración propia

Basándose en los caudales determinados para el sitio de aforo se han estimado los caudales para los sitios relevantes del presente estudio. Los resultados se resumen a continuación:

Tabla 4.4. Resumen de caudales naturales en los sitios de aprovechamiento

| Alternativa Quebrada Negra (48,8 km <sup>2</sup> ) |            |            |            |            |            |            |           |           |           |           |           |           |            |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| <b>Med</b>   | <b>104</b> | <b>215</b> | <b>576</b> | <b>865</b> | <b>927</b> | <b>782</b> | <b>99</b> | <b>48</b> | <b>42</b> | <b>37</b> | <b>34</b> | <b>37</b> | <b>312</b> |
| <b>Min</b>   | 22         | 21         | 36         | 48         | 76         | 37         | 34        | 31        | 29        | 24        | 22        | 21        | 52         |
| <b>Max</b>   | 849        | 1121       | 2752       | 2317       | 4207       | 3415       | 328       | 122       | 112       | 104       | 96        | 103       | 702        |
| Quebrada Casa Cancha (13,08 km <sup>2</sup> )      |            |            |            |            |            |            |           |           |           |           |           |           |            |
| <b>Med</b>   | <b>28</b>  | <b>58</b>  | <b>154</b> | <b>232</b> | <b>248</b> | <b>210</b> | <b>26</b> | <b>13</b> | <b>11</b> | <b>10</b> | <b>9</b>  | <b>10</b> | <b>84</b>  |
| <b>Min</b>   | 6          | 6          | 10         | 13         | 20         | 10         | 9         | 8         | 8         | 6         | 6         | 6         | 14         |
| <b>Max</b>   | 227        | 300        | 738        | 621        | 1128       | 915        | 88        | 33        | 30        | 28        | 26        | 28        | 188        |

Fuente: Elaboración propia

En este cuadro la Alternativa Quebrada Negra (48,8 km<sup>2</sup>) se refiere al caudal disponible a la altura de la toma del río Huacata, mientras que los datos relativos a 13,08 km<sup>2</sup> son los caudales naturales en el sitio de presa en quebrada Casa Cancha.

En la zona de la toma, aguas abajo de la central hidroeléctrica, el caudal del trasvase se junta con los caudales del Río Corana, lo que permite un mayor caudal aprovechable, por lo que para el Diseño Final del Proyecto Huacata se ha estimado los aportes de esta cuenca.

Río Corana que escurre de Norte a Sur y tiene sus nacientes cerca de Quebrada Casa Cancha y Quebrada Negra. Su posible obra de toma estará ubicada antes de la confluencia con el río Guadalquivir, aguas debajo de la central hidroeléctrica.

Para efectuar una estimación de caudales del río Corana (43.3 km<sup>2</sup>) se utilizó la estadística de río Huacata en base a relaciones de áreas de drenaje y precipitación.

En base a los datos de las diferentes estaciones pluviométricas en la región, se adoptó el valor de 600 mm para el Río Corana como representativo de la precipitación media espacial.

Tabla 4.5. Datos de las diferentes estaciones pluviométricas en la región

|            |           |            |            |            |            |            |           |           |           |           |           |           |                   |
|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------|
| <b>Med</b> | <b>94</b> | <b>194</b> | <b>520</b> | <b>780</b> | <b>836</b> | <b>705</b> | <b>89</b> | <b>44</b> | <b>38</b> | <b>34</b> | <b>31</b> | <b>33</b> | <b><u>282</u></b> |
| <b>Min</b> | 19        | 19         | 33         | 43         | 68         | 33         | 31        | 28        | 26        | 22        | 20        | 19        | 47                |
| <b>Max</b> | 766       | 1011       | 2483       | 2091       | 3796       | 3082       | 296       | 110       | 101       | 93        | 86        | 93        | 634               |

Fuente: elaboración propia

### 4.3 Los valores de caudales medios

Para la aplicación de la metodología que se señaló en el punto 4.1, se han utilizado los datos de la estación Tolomosa, como están consignados en el estudio de INIBREH y con ellos se ha construido la función de distribución  $F\{D\}$ . El par de valores  $D, F\{D\}$ , se han graficado en un papel de probabilidades log-normal y se ha determinado la curva de frecuencia acumulada.

Tabla 4.6. Datos de la estación Tolomosa

| m | D   | F(D)  |
|---|-----|-------|
| 1 | 227 | 0,125 |
| 2 | 369 | 0,250 |
| 3 | 443 | 0,375 |
| 4 | 504 | 0,500 |
| 5 | 524 | 0,625 |
| 6 | 524 | 0,750 |
| 7 | 593 | 0,875 |

Fuente: Elaboración propia

Recordando que la cuenca del Tolomosa pertenece a una misma Zona y subzona pluviométrica, los valores que caracterizan a la distribución de frecuencia del Aflujo, está definida por:

$$M\{y\} = 2.$$

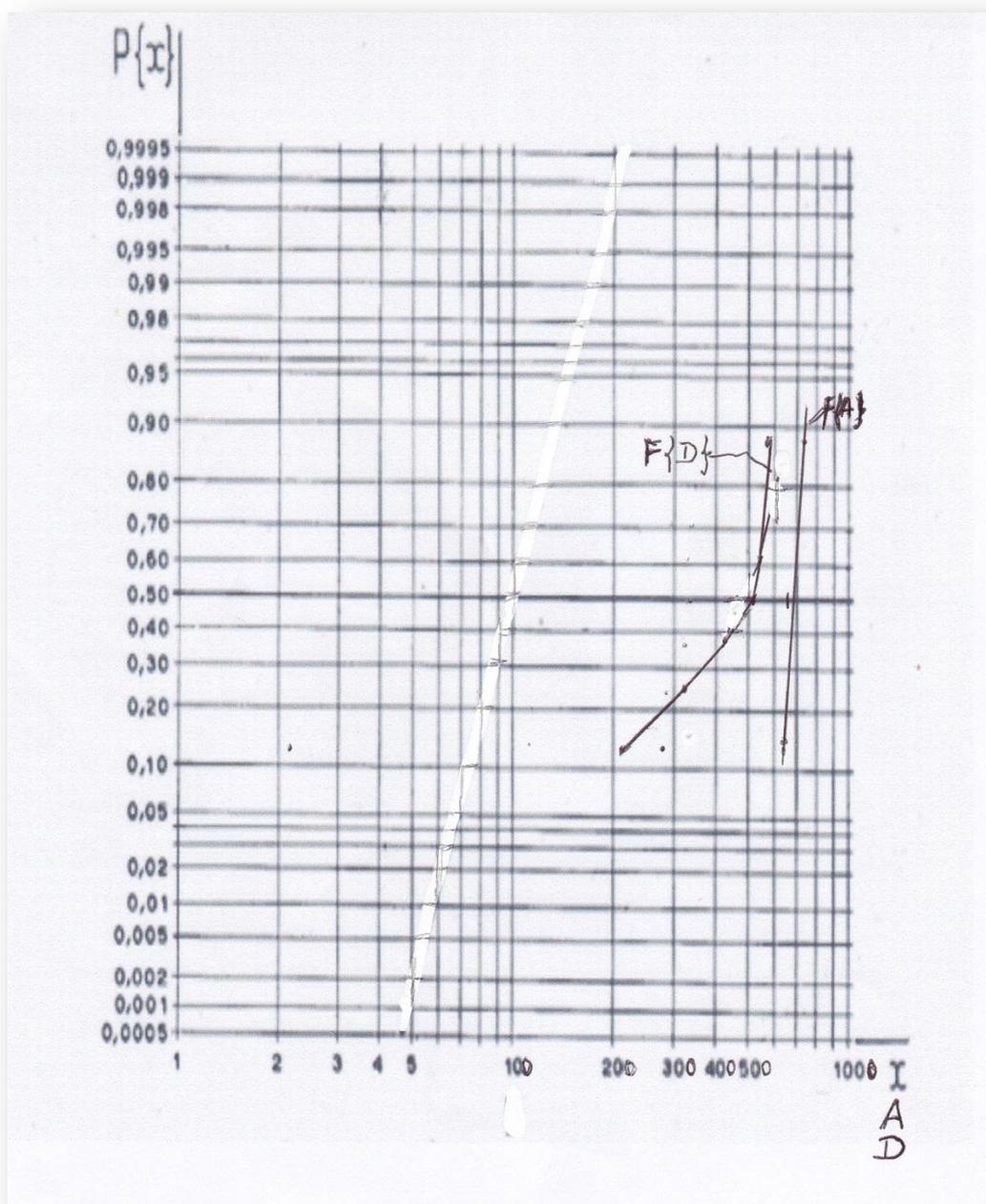
$$\sigma^2\{y\} = 0.0082$$

Y los valores característicos son:

| Probabilidad | Valor  |
|--------------|--------|
| 50 %         | 698 mm |
| 16 %         | 654 mm |
| 84 %         | 745 mm |

En el mismo diagrama de probabilidad de las  $D$ , Figura 4.3.1 se han graficado los valores que representan la recta teórica de la distribución de los aflujos en la cuenca y se han estimado gráficamente, los valores de  $F\{A\}$  para los mismos frtiles que  $F\{D\}$ , se sustrajo de  $A$  el valor  $D$  y determinado la  $F\{p\}$ , como se muestra en la Tabla 4.6

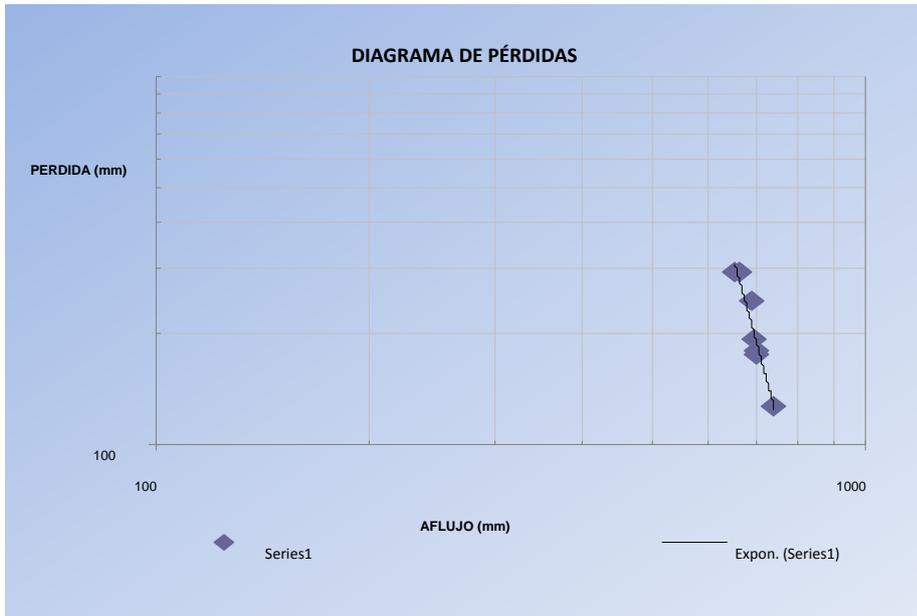
Figura 4.3. Diagrama de Probabilidad Escorrentía - aflujos



Fuente: Elaboración propia

Graficados los valores de pérdidas, como se muestra en la Figura 4.3.2, se aprecia que ellos se disponen en torno a una recta, en un papel logarítmico

Figura 4.4. Perdidas del balance hidrológico



Fuente: Elaboración propia

Se debe tener presente que la serie de valores de D, es reducida, que las pérdidas se disponen en una tendencia que muestra menor pérdida a mayor aflujo, que la cuenca, sobre todo de la parte alta es escasa teniendo formaciones rocosas fracturadas rocosas que le dan una permeabilidad secundaria enorme y que la infiltración es alta, El valor de la capacidad hídrica U, será de 100 mm, y la evapotranspiración está en el orden de los 752 mm. Características que llevan a aplicar una ley de Aflujo Perdida similar a la que se determinó para cuencas de la faja del subandino en Bolivia e igual a  $P=3.414 A^{-0.813}$ , con esta expresión se deduce que las pérdidas para los mismos frtiles de D se indican en la Tabla 4.7 y con ella se determina el valor de Dc, para las condiciones normales de comportamiento de la cuenca. La diferencia entre la D medida y la Dc calculada se la adopta como aquella correspondiente a la infiltración.

Tabla 4.7. Escorrentía anual (mm)

| m | F{D}   | Dm  | F{A} | F{P}  | Pc  | Dc   | Dm-Dc        |
|---|--------|-----|------|-------|-----|------|--------------|
|   |        |     |      |       |     | A-Pc | infiltration |
|   | 0.1600 | 360 | 654  | 294   | 529 | 125  | 235          |
| 1 | 0.1250 | 227 |      |       |     |      | 227          |
| 2 | 0.2500 | 369 | 665  | 296   | 536 | 129  | 240          |
| 3 | 0.3750 | 443 | 690  | 247   | 552 | 138  | 305          |
| 4 | 0.5000 | 504 | 698  | 194   | 557 | 141  | 363          |
| 5 | 0.6250 | 524 | 700  | 176   | 558 | 142  | 382          |
| 6 | 0.7500 | 524 | 703  | 179   | 560 | 143  | 381          |
| 7 | 0.8750 | 593 |      |       |     |      | 593          |
|   | 0.8400 | 617 | 745  | 127.7 | 586 | 159  | 458          |

Fuente: Elaboración Propia

En el modelo del INIBREH, la escorrentía del subálveo representa el 90 % del total.

Esta escorrentía total anual se distribuye durante el año según acontece con los aflujos y en las estaciones de medida continua se ha dispuesto de la manera que indica la Tabla 4.8

Tabla 4.8. Distribución mensual de Escorrentías Estaciones continuas – Valle Tarija

| Estación        | Volumen Relativo de Esgurrimiento Medio Mensual (Hm <sup>3</sup> /Hm <sup>3</sup> ) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | Total |
|-----------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 | Oct   | Nov   | Dic   | Ene   | Feb   | Mar   | Abr   | May   | Jun   | Jul   | Ago   | Sep   |       |
| Tolomosa        | 0.009   | 0.040 | 0.055 | 0.137 | 0.218 | 0.203 | 0.185 | 0.063 | 0.037 | 0.022 | 0.017 | 0.012 | 1.000 |
| Huacata         | 0.010   | 0.022 | 0.018 | 0.243 | 0.309 | 0.234 | 0.100 | 0.025 | 0.013 | 0.009 | 0.008 | 0.008 | 1.000 |
| Canasmoro       | 0.011   | 0.049 | 0.080 | 0.250 | 0.231 | 0.206 | 0.099 | 0.030 | 0.018 | 0.009 | 0.008 | 0.008 | 1.000 |
| San Jacinto     | 0.015   | 0.031 | 0.073 | 0.156 | 0.232 | 0.216 | 0.117 | 0.064 | 0.036 | 0.025 | 0.019 | 0.015 | 1.000 |
| Obrajes         | 0.016   | 0.032 | 0.060 | 0.136 | 0.291 | 0.240 | 0.097 | 0.052 | 0.031 | 0.021 | 0.014 | 0.010 | 1.000 |
| Tolomosita      | 0.021   | 0.048 | 0.036 | 0.115 | 0.262 | 0.160 | 0.149 | 0.071 | 0.049 | 0.035 | 0.032 | 0.023 | 1.000 |
| Sella Quebradas | 0.001   | 0.042 | 0.121 | 0.247 | 0.225 | 0.237 | 0.096 | 0.019 | 0.007 | 0.003 | 0.001 | 0.000 | 1.000 |

Fuente: Elaboración propia

Del cuadro se puede advertir que la distribución de valores de manera mensual, en porcentaje, no varía de curso a curso, lo cual se ratifica por ser una zona homogénea en cuanto a precipitación.

Apelando a la verosimilitud hidrológica y las condiciones en las cuales se desarrolla la precipitación (Aflujo), se puede señalar que es factible deducir la componente D para un determinado curso de agua y una determinada probabilidad de ocurrencia, el valor de P, mediante la fórmula señalada y con el calcular el valor de D, que representara la máxima escorrentía superficial que le permite las condiciones de suelo y de evapotranspiración y con la relación de área, poder determinar la escorrentía total que se tendrá en el curso de aguay la diferencia entre ambas será la infiltración que se produce y que podrá ser captada por una obra sub superficial (galería). En la aplicación de este principio se han determinado los valores de escorrentía para cada curso de agua actual y potencial, expresado en m<sup>3</sup>/s como señala la Tabla 4.9. Adoptando un valor de 50 % de probabilidad, para condiciones medias o normales, y para un año seco, el valor correspondiente a una probabilidad del 16 % que corresponde al límite de ocurrencia del 5 % dentro de los conceptos probabilísticos.

Informe Especial: Plan Maestro Integral de Agua y Saneamiento del Valle Central de Tarija

Tabla 4.9. Caudales medios anuales (m3/s) Año Normal

| Ep  | Dm  | prob | precip | Pm  | Pc  | Dc=A-P | Infiltrac |
|-----|-----|------|--------|-----|-----|--------|-----------|
| 752 | 504 | 0,5  | 698    | 194 | 557 | 141    | 363       |

|                     | Ene    | Feb    | Mar    | Abr    | May    | Jun    | Jul    | Ago    | Sep    | Oct    | Nov    | Dic      | TOTAL  |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|
| Relación Di/D       | 0,1740 | 0,2137 | 0,1894 | 0,1211 | 0,0595 | 0,0242 | 0,0110 | 0,0088 | 0,0066 | 0,0198 | 0,0573 | 0,114537 | 1,0000 |
| Rio Tolomosa (m3/s) |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |          |        |
| D (mm)              | 88     | 108    | 95     | 61     | 30     | 12     | 6      | 4      | 3      | 10     | 29     | 58       | 504    |
| infiltra (mm)       | 63     | 78     | 69     | 44     | 22     | 9      | 4      | 3      | 2      | 7      | 21     | 42       | 363    |
|                     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |          |        |
|                     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |          |        |
| Área (Km2)          |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |          |        |
| <b>Tipas</b>        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |          |        |
| Qs (m3/s)           | 29,905 | 39,940 | 32,555 | 21,514 | 10,221 | 4,303  | 1,893  | 1,514  | 1,173  | 3,407  | 10,170 | 19,684   | 14,690 |
| Qi (m3/s)           | 21,533 | 28,759 | 23,441 | 15,491 | 7,359  | 3,098  | 1,363  | 1,090  | 0,845  | 2,453  | 7,323  | 14,174   | 10,578 |
| q min (m3/s)        |        |        |        |        |        |        |        |        | 2,018  |        |        |          |        |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.10. Caudales medios anuales (m3/s) Año Seco

| Dm  | Prob | Precip | Pm  | Pc  | Dc=A-P | Pc  | Dm-Dc |
|-----|------|--------|-----|-----|--------|-----|-------|
| 360 | 0,16 | 663    | 303 | 535 | 128    | 306 | 232   |

|               | Ene      | Feb      | Mar      | Abr      | May      | Jun      | Jul      | Ago      | Sep      | Oct      | Nov      | Dic      | TOTAL    |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Relación Di/D | 0,1740   | 0,2137   | 0,1894   | 0,1211   | 0,0595   | 0,0242   | 0,0110   | 0,0088   | 0,0066   | 0,0198   | 0,0573   | 0,114537 | 1,0000   |
| D (mm)        | 63       | 77       | 68       | 44       | 21       | 9        | 4        | 3        | 2        | 7        | 21       | 41       | 360      |
| infiltra (mm) | 40       | 50       | 44       | 28       | 14       | 6        | 3        | 2        | 2        | 5        | 13       | 27       | 232      |
|               |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Área (Km2)    |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| tiempo (seg)  | 2,68E+06 | 2,46E+06 | 2,68E+06 | 2,59E+06 | 2,68E+06 | 2,59E+06 | 2,68E+06 | 2,68E+06 | 2,59E+06 | 2,68E+06 | 2,59E+06 | 2,68E+06 | 3,16E+07 |
| <b>Tipas</b>  |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Qs (m3/s)     | 21,361   | 28,528   | 23,253   | 15,367   | 7,301    | 3,073    | 1,352    | 1,082    | 0,838    | 2,434    | 7,264    | 14,060   | 10,493   |
| Qi (m3/s)     | 13,769   | 18,390   | 14,989   | 9,906    | 4,706    | 1,981    | 0,871    | 0,697    | 0,540    | 1,569    | 4,683    | 9,063    | 6,764    |
|               |          |          |          |          |          |          |          |          | 1,379    |          |          |          |          |

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4 Valores de caudales mínimos

La medición del valor de  $q_{min}$ , de la manera establecida en la escorrentía mensual permitirá conocer un valor que puede ser el más apto de tomarlo en cuenta, a pesar que se presentará el valor  $q_{min}$  dentro del año y en el mes más crítico.

En las cuencas en estudio, no se tienen estaciones hidrométricas o puntos de medición que permitan realizar análisis detallados del comportamiento de los escurrimientos y menos de los caudales mínimos ocurridos. En el punto 4.1, se explica y muestra la disponibilidad de estaciones de medida en las áreas circundantes y se demuestra la regionalización de la precipitación en toda el área del proyecto y se explica la metodología de obtención de caudales y escorrentía anuales y mensuales.

De las estaciones que disponen de medidas se puede obtener los valores de caudales medios y mínimos como se muestra en la Tabla 4.11 dado a continuación

Tabla 4.11. Valores de Caudales en estaciones de la Región de Tarija (m<sup>3</sup>/s)

| Estación    | Medio<br>Q <sub>m</sub> | Mínimo<br>q <sub>min</sub> | Q <sub>m</sub> /q <sub>min</sub> |
|-------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| Angostura   | 41,330                  | 0,780                      | 0,0189                           |
| Pintada     | 3,630                   | 0,001                      | 0,0003                           |
| Santa Ana   | 1,950                   | 0,001                      | 0,0005                           |
| San Jacinto | 9,660                   | 0,773                      | 0,0800                           |
| Obrajes     | 11,767                  | 0,553                      | 0,0470                           |
| Erquiz      | 0,890                   | 0,100                      | 0,1124                           |
| Sella       | 0,960                   | 0,001                      | 0,0010                           |
| Canasmoro   | 2,617                   | 0,077                      | 0,0294                           |

Fuente: Elaboración propia

Los cursos de agua del Camacho y de Alisos, no disponen de información que permita realizar los estudios de caudales mínimo ni medios, por ello se tomarán los valores de San Jacinto sobre la cuenca del río Tolomosa para con ellos poder determinar valores aceptables.

El estudio sobre el plan Maestro de agua y alcantarillado de Tarija, efectuado en el año 1994 por la consultora STCV, consigna entre las curvas de agotamiento, con sus valores para la Estación San Jacinto y solo la fórmula para la estación de cañas Camacho.

Conceptualmente se puede señalar que la escorrentía anual que se produce en un curso natural de agua se divide en aquella superficial que ocurre en el periodo húmedo y otra de flujo base que escurre hacia el río formando un caudal base. De esta escorrentía, en el periodo seco formado de marzo hasta agosto o septiembre (160 días) los caudales superficiales son casi nulos alcanzando milésimas de mcs.

En este periodo seco, por cuanto enseña la literatura técnica se puede hacer uso de la estadística para determinar el valor correspondiente al mismo y tratar estadísticamente los valores al ser una variable casual, lastimosamente los 7 años de registro son pocos para un tratamiento de este género.

También enseña la literatura técnica que existe una curva de agotamiento del río sobre la cual a medida que transcurre el tiempo, el caudal va descendiendo y aproximándose a un mínimo valor  $q_{min}$ , que año tras año varía muy poco. Esta función que liga los caudales de agotamiento está dada por la expresión  $Q = Q_0 e^{(-at)}$ , siendo Q el caudal en un determinado tiempo t del periodo seco y  $t_0$  al final del periodo mostrara el caudal mínimo que podría escurrir en el curso de agua.

Por cuanto resguarda la literatura técnica, los valores registrados de  $q_{min}$  también pueden ser tratados estadísticamente y obtenidos sus parámetros de frecuencia al ser una variable casual.

Tabla 4.12. Resultados de ecuaciones que presenta el estudio de STCV para San Jacinto

| Año hidrológico | $t_0$ | $Q_0$  | $a (-)$ |
|-----------------|-------|--------|---------|
| 77-78           | 10/4  | 7,500  | 0,0138  |
|                 | 28/6  | 2,850  | 0,0093  |
| 78-79           | 3/4   | 10,800 | 0,0180  |
|                 | 12/6  | 3,350  | 0,0122  |
| 79-80           | 4/4   | 8,000  | 0,00142 |
|                 | 28/6  | 2,400  | 0,0107  |

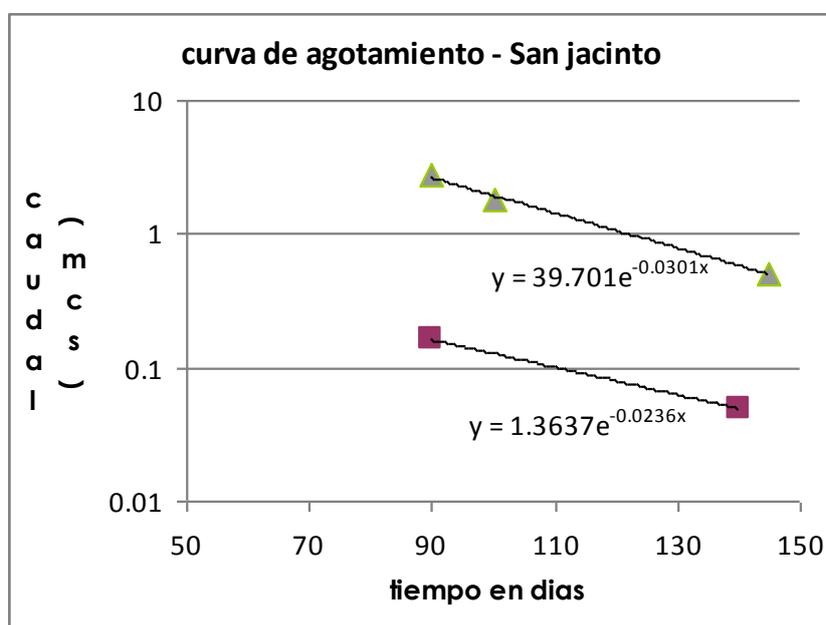
Fuente: Estudio de STCV

Tabla 4.13. Resultados de ecuaciones de Cañas –Camacho son:<sup>2</sup>

| Año hidrológico | $t_0$ | $Q_0$ | $a (-)$ |
|-----------------|-------|-------|---------|
| 76-77           | 1/5   | 3,200 | 0,0116  |
| 78-79           | 1/5   | 3,300 | 0,0130  |
| 79-80           | 1/5   | 3,300 | 0,0125  |

Estos valores representan la curva anual del año correspondiente, si son representados en papel semi logarítmico en el eje x el tiempo y en y, el log de Q, y desplazamos hasta que todos se alineen dentro de una misma recta, se consigue un diagrama como el de la Figura 4.4.1 y la ecuación que representa el valor total será  $Q = 4,459 e^{-0,016 t}$ , y el tiempo son 120 días (4 meses) que van de abril hasta agosto, donde comienza a llover y se produce escorrentía superficial.

Figura 4.5. Curva de agotamiento



Fuente: Elaboración propia

Al aplicar este valor promedio de los  $q_{min}$ , a las cuencas de cada uno de las actuales captaciones se tienen los valores mínimos de:

<sup>2</sup> En la aplicación de las ecuaciones no se tiene una relación coherente con San Jacinto

Tabla 4.14. Caudales mínimos

| Estación    | Qo (m3/s) | he(-ato)    | Q <sub>min</sub> (m3/s) | T <sub>o</sub> (días) | Área (km2) |
|-------------|-----------|-------------|-------------------------|-----------------------|------------|
| Sn. Jacinto | 4,549     | 0,1454      | 0,661                   | 120                   | 438,26     |
| SELLA       | 0.1       | 0.282120773 | 0.028                   | 40                    | 147.3      |
| Obrajes     | 39.701    | 0.008061564 | 0.320                   | 160                   | 909.3      |
| Erquis      | 1.3637    | 0.034236827 | 0.047                   | 140                   | 104.5      |
| Vitoria     |           |             | 0.052                   |                       | 34.46      |
| Erquis      |           |             | 0.158                   |                       | 104.45     |
| Tipas       |           |             | 1.377                   |                       | 913.31     |
| Calderillas |           |             | 0.057                   |                       | 38.00      |

Fuente: Elaboración propia

Los valores señalados son los caudales mínimos que podrían presentarse en las diferentes cuencas como extremo. Para no disponer de caudales extremos resulta aconsejable, tomar los caudales mínimos establecidos mensualmente como se señaló en el estudio hidrológico y que a continuación se indican.

Tabla 4.15. Valores de caudales mínimos diferentes escenarios

| media              |       |        | Probabilidad 95 %  |       |        | Cambio climático -8% |       |        | Cambio climático -22% |       |        |
|--------------------|-------|--------|--------------------|-------|--------|----------------------|-------|--------|-----------------------|-------|--------|
|                    | Sep   | TOTAL  |                    | Sep   | TOTAL  |                      | Sep   | TOTAL  |                       | Sep   | TOTAL  |
| <b>Vitoria</b>     |       |        | <b>Vitoria</b>     |       |        | <b>Vitoria</b>       |       |        | <b>Vitoria</b>        |       |        |
| Qs (m3/s)          | 0,044 | 0,554  | Qs (m3/s)          | 0,032 | 0,396  | Qs (m3/s)            | 0,035 | 0,432  | Qs (m3/s)             | 0,041 | 0,510  |
| Qi (m3/s)          | 0,032 | 0,399  | Qi (m3/s)          | 0,020 | 0,255  | Qi (m3/s)            | 0,027 | 0,338  | Qi (m3/s)             | 0,030 | 0,378  |
| q min (m3/s)       | 0,076 |        |                    | 0,052 |        | q min (m3/s)         | 0,062 |        |                       | 0,071 |        |
| <b>Erquis</b>      |       |        | <b>Erquis</b>      |       |        | <b>Erquis</b>        |       |        | <b>Erquis</b>         |       |        |
| Qs (m3/s)          | 0,134 | 1,680  | Qs (m3/s)          | 0,096 | 1,200  | Qs (m3/s)            | 0,105 | 1,310  | Qs (m3/s)             | 0,123 | 1,546  |
| Qi (m3/s)          | 0,097 | 1,210  | Qi (m3/s)          | 0,062 | 0,774  | Qi (m3/s)            | 0,082 | 1,026  | Qi (m3/s)             | 0,091 | 1,145  |
| q min (m3/s)       | 0,231 |        |                    | 0,158 |        | q min (m3/s)         | 0,187 |        |                       |       |        |
| <b>Tipas</b>       |       |        | <b>Tipas</b>       |       |        | <b>Tipas</b>         |       |        | <b>Tipas</b>          |       |        |
| Qs (m3/s)          | 1,173 | 14,690 | Qs (m3/s)          | 0,838 | 10,493 | Qs (m3/s)            | 0,915 | 11,458 | Qs (m3/s)             | 1,080 | 13,515 |
| Qi (m3/s)          | 0,845 | 10,578 | Qi (m3/s)          | 0,540 | 6,764  | Qi (m3/s)            | 0,716 | 8,968  | Qi (m3/s)             | 0,800 | 10,010 |
| q min (m3/s)       | 2,018 |        |                    | 1,379 |        | q min (m3/s)         | 1,632 |        |                       | 1,879 |        |
| <b>Calderillas</b> |       |        | <b>Calderillas</b> |       |        | <b>Calderillas</b>   |       |        | <b>Calderillas</b>    |       |        |
| Qs (m3/s)          | 0,049 | 0,611  | Qs (m3/s)          | 0,035 | 0,437  | Qs (m3/s)            | 0,038 | 0,477  | Qs (m3/s)             | 0,045 | 0,562  |
| Qi (m3/s)          | 0,035 | 0,440  | Qi (m3/s)          | 0,022 | 0,281  | Qi (m3/s)            | 0,030 | 0,373  | Qi (m3/s)             | 0,033 | 0,416  |
| q min (m3/s)       | 0,084 |        |                    | 0,057 |        | q min (m3/s)         | 0,068 |        | q min (m3/s)          | 0,078 |        |

Fuente: Elaboración propia

Es necesario analizar lo que acontece con el canal Vitoria. Se dispone de mediciones del agua que es provista al sistema durante los años 2007 al 2001, en el cual en el periodo seco y en el valor mínimo se tiene captado casi la totalidad del recurso., y en consecuencia se puede establecer con relativa seguridad cuales son los caudales que transitan por la obra y el curso de agua. En el periodo húmedo por limitaciones del canal de conducción el límite del caudal captado es la capacidad del canal 650 l/s y en el curso de agua transita un caudal mayor que no es medido.

Los valores de caudal medidos de manera diaria, en el desarenador del sistema de la Vitoria, en los respectivos meses asumen las cantidades que se muestran en la Tabla 4.16

Tabla 4.16. Caudales medidos en Vitoria (l/s)

| AÑO  | ENERO  | FEBRERO | MARZO  | ABRIL  | MAYO   | JUNIO  | JULIO  | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | DICIEMBRE | Min Mes | mes     |
|------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|---------|-----------|-----------|---------|---------|
| 2011 | 342.25 | 342.25  | 342.25 | 342.25 | 338.18 | 254.80 | 190.89 | 149.15 | 134.37     | 108.87  | 127.03    | 323.09    | 108.87  | octubre |
| 2010 | 342.25 | 342.25  | 366.70 | 366.70 | 342.25 | 342.25 | 151.77 | 140.01 | 112.08     | 100.94  | 77.78     | 165.01    | 77.78   | nov     |
| 2009 | 342.25 | 342.25  | 342.25 | 342.25 | 342.25 | 326.46 | 226.32 | 168.03 | 156.82     | 130.48  | 195.93    | 334.61    | 130.48  | octubre |
| 2008 | 342.25 | 342.25  | 342.25 | 342.25 | 338.18 | 286.68 | 210.73 | 160.39 | 130.68     | 150.51  | 235.31    | 334.61    | 130.68  | sept    |
| 2007 | 342.25 | 342.25  | 342.25 | 342.25 | 338.18 | 254.80 | 191.23 | 152.82 | 134.37     | 154.50  | 187.99    | 340.37    | 134.37  | sept    |

Fuente: Elaboración propia

Tomando el criterio estadístico, para el rango de medición efectuado, se puede señalar que el valor mínimo ocurrido en estos últimos años es de 77.78 l/s, lastimosamente no se dispone de un registro de más años que pueda permitirnos obtener un valor de caudal mínimo más atendible.<sup>3 4</sup>

## 5. LOS RECURSOS HIDRICOS SUBTERRANEOS

### 5.1 CARACTERISTICAS DEL SISTEMA

Un corte transversal al valle de Tarija, presenta que el paquete cuaternario está en su parte central, un basamento de rocas del ordovícico y cámbrico en las montañas de sama, que son la recarga natural de acuífero, y Ordovícico en el lado este.

De esta formación, el cámbrico y la base del ordovícico son de interés hidrogeológico por estar constituidas la mayoría de areniscas cuarcíticas, alcanzando un espesor de 600 m. Estas formaciones funcionan como acuíferos de permeabilidad secundaria dado el alto grado de fisuración y que se constituyen en la procedencia de gran parte del flujo base de los ríos.

Este acuífero, que se indica, tiene predominancia de materiales finos (arcillas y limos) existiendo variaciones faciales de tipo areno gravoso. Estas formas son muy comunes en las cuencas intramontanas del país.

Los acuíferos cuaternarios que rellenan la cuenca del Guadalquivir son depósitos aluviales (terrazas abanicos, y cauces de río) depósitos coluviales y algunos depósitos fluviolacustres que son de interés hidrogeológico por su comportamiento como zonas de recarga y formación acuífera. Y constituyen:

- Una zona de acuífero libre común
- Un acuífero confinado en toda la parte central de la cuenca
- Acuíferos freáticos a los largo de los ríos principales

El acuífero confinado y los acuíferos freáticos, están en conexión hidráulica directa con la zona de acuífero libre común. El acuífero libre común y el confinado conforman el acuífero principal del valle.

Cabe mencionar las pequeñas capas acuíferas lenticulares intercaladas a poca profundidad en los depósitos lacustres que actúan como acuífero semiconfinado.

La ubicación y profundidad de estas variaciones faciales, dependen de la ubicación de las quebradas que aportaron el material para formarlas. Por esta razón la profundidad y el espesor de estos lentes de mayor granulometría son totalmente aleatorios. De acuerdo con la investigación del año 1979.

El acuífero libre común, se extiende en las zonas altas de la parte oeste, norte y sud de las cuencas, hacia el sur y este, se transforma en confinada, al estar las formaciones permeables cubiertas por sedimentos lacustres impermeables, la profundidad del acuífero incrementa en su profundidad al

<sup>3</sup> En el informe del año 1976 de Connal, diseñista del sistema de agua potable y alcantarillado, señala el valor de 81 l/s como el mínimo disponible en el curso de agua, hasta el año indicado

<sup>4</sup> Sherr en su informe indica un valor de 110 l/s

aumentar la distancia de las zonas de recarga llegando en la ciudad a 56 m, a 70 m en San Luís, 122 a 164 m, en la tablada y morros blancos, río Camacho, 150 en concepción y aun mayor 182 en santa Ana, el espesor según los datos de geofísica en Tarija cancha, encontró 85 m de acuífero saturado y en san Lorenzo a lo largo del Guadalquivir probablemente supere los 250 m., que podría ser una zona apta para un campo de pozos.

Al igual que la profundidad, a medida que se aleja de las zonas de recarga el espesor disminuye y han encontrado que en la mayoría de los pozos se alcanza 20 a 45 m.

En conjunto el material de los acuíferos es grueso, por provenir de las serranías, generalmente constituidos por gravas y cantos rodados de cuarcitas en una matriz de arena mal clasificada de granulometría variable, que dispone de gran dureza sobre la línea de recarga y menor dureza a medida que se aleja hacia el valle. Este es un factor importante para decidir sobre el equipo de perforación.

La profundidad del nivel del agua, depende de las condiciones topográficas. Son profundos en las partes altas de las zonas de recarga que corresponde al acuífero libre común y se estima que el nivel freático supera los 40 m, pero en los valles del Calama, donde la gradiente hidráulica es fuerte igual a la pendiente topográfica, los niveles se encuentran cerca de la superficie

Ahora bien de todos los pozos perforados en el valle de Tarija, se obtuvo como porosidad eficaz un promedio de 6,6 m/d, como valor de permeabilidad y la capacidad específica promedio de 1 l/s/m que muestran que el pozo no fue desarrollado adecuadamente o que no se alcanzó la profundidad necesaria, que también resalta al señalar el caudal encontrado o que no se captó el acuífero.

El funcionamiento y régimen del flujo subterráneo se realiza a través de una escorrentía subterránea en el conjunto de formaciones paleozoicas que constituyen la gran parte de la montaña de las cuencas. Esta escorrentía proviene de la infiltración directa de la lluvia y de la infiltración de la escorrentía superficial. La mayor recarga se produce en la cordillera de Sama, donde las formaciones tienen una buena permeabilidad secundaria, en las partes bajas de la cuenca que están cubiertas por formaciones de limo arcillosas de origen lacustre la recarga es muy reducida o nula.

La dirección del flujo subterráneo de la zona desde Sella diverge hacia la región de San Lorenzo y la mayor parte del flujo subterráneo de la alta cuenca, hasta e Rancho, se concentra en la cuenca del río El monte y fluye al este del cauce del río Guadalquivir y en Tomatitas solo se tiene el flujo de las aguas subterráneas de las cuencas del Erquis y la Vitoria, y aquellas de la parte sur de San Andrés.

La elevación del nivel como consecuencia de la recarga del acuífero comienza generalmente en noviembre con poco desfase después de las primeras lluvias y crecidas importantes y la recesión tiene lugar durante la época seca, al producirse la fuga lateral de la recarga anterior, los pozos mostraron variaciones de un metro hasta 5 m, en un control mensual durante 2 años, y el máximo en la parte alta de Calama alcanzo 10 m.

La trasmisividad, en general es baja con excepción del acuífero principal que tiene trasmisividad aceptable especialmente en la zona que corresponde al antiguo cauce del río Guadalquivir en su curso medio y central. El valor promedio es de 200 m<sup>2</sup>/día. Sin embargo es necesario indicar que la trasmisividad es alta en San Andrés y La Victoria con valores de hasta 1000 m<sup>2</sup>/día

La recarga estimada por variaciones del nivel freático alcanza a 45.1 Hm<sup>3</sup>/año

Los aportes subterráneos en la zona central 0.50 m<sup>3</sup>/seg lo que equivale a 15.7 Hm<sup>3</sup>/año

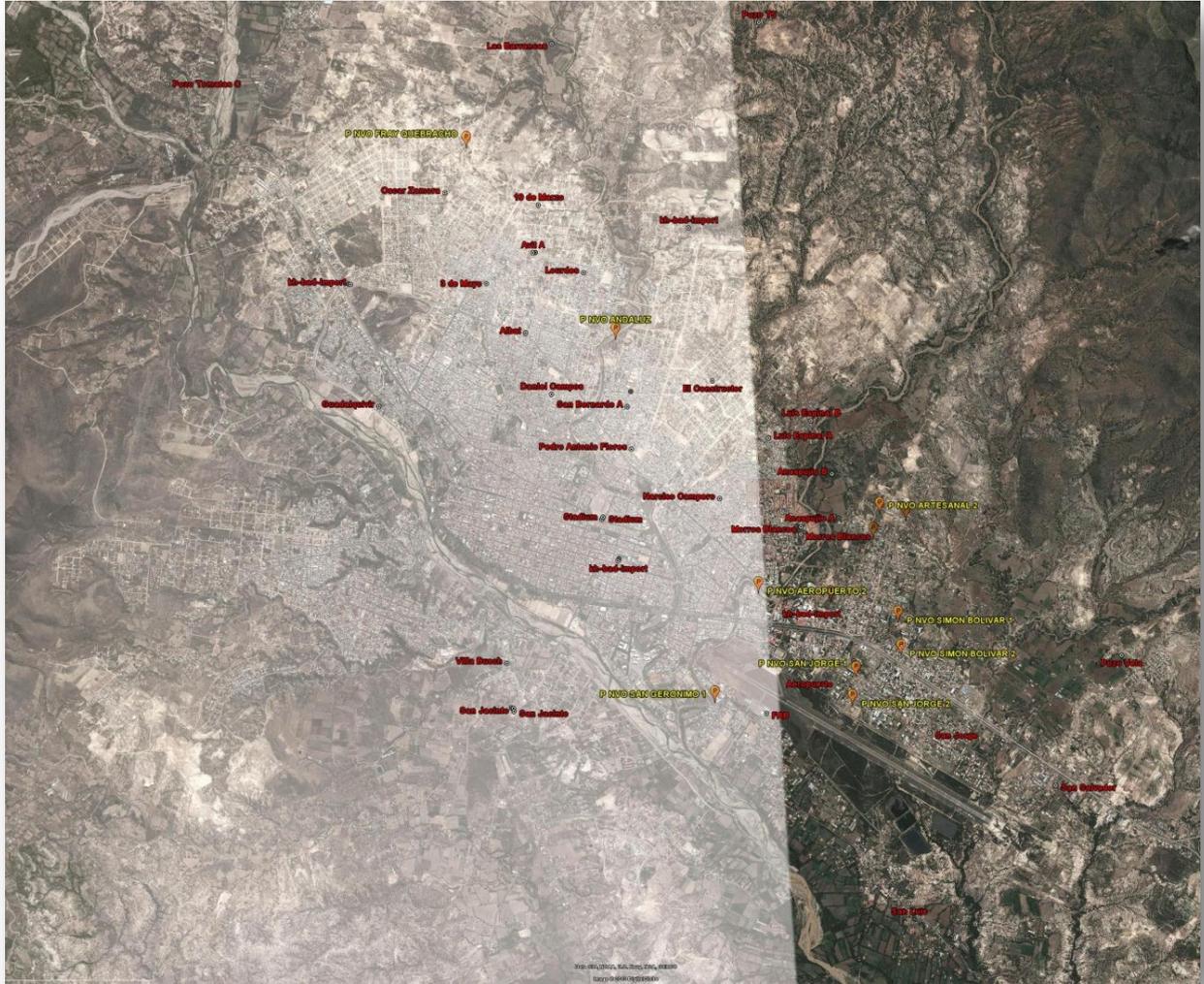
La recarga es muy reducida o nula en las partes bajas de la cuenca. En esta zona solo los acuíferos freáticos en terrazas y aluviones de cauce de ríos son recargados de manera significativa

El flujo subterráneo tiene una dirección predominante de norte a sur y sur al canal principal del Guadalquivir, y de NE a SO

El régimen de los acuíferos freáticos depende del régimen de los ríos perennes a los cuales están asociados. Los ríos recargan los acuíferos durante la época de lluvias y los drenan durante la época seca. En consecuencia los niveles se mantienen en ambos aproximadamente a la misma altura

En el acuífero de la ciudad, la explotación de las aguas subterráneas en el sector de la ciudad de Tarija se efectúa mediante 36 pozos profundos que son mostrados en la Figura 5.1.1

Figura 5.1. Ubicación pozos profundos- Tarija



Fuente: Elaboración propia

Estos pozos son operados por Cossalt y 5 pozos más, perforados bajo el programa de Evo cumplen, que atiende a varios lugares en las márgenes de la ciudad.

Los pozos disponen de líneas de impulsión hasta un tanque elevado del cual sale una línea de distribución del agua que atiende a una determinada población asentada en un barrio o parte del mismo.

En síntesis se puede indicar que el agua subterránea proviene enteramente de las recargas por condiciones pluviales que pertenecen a un mismo régimen, regidas por el movimiento de las masas de aire desde el sur, efectúan su ascenso desde el polo sud y van descargando la precipitación en el valle de manera homogénea para luego a medida que ascienden la montaña, van descargando, en lo que ocurre en la cadena del Sama y contrario en la cadena de Taxara, mientras en la primera se alcanza valores de precipitación media año de 500 mm, en la segunda se alcanza a los 1000 mm/año.

La cadena montañosa formada por rocas del paleozoico (Ordovico) se encuentra fracturadas y tienen una permeabilidad secundaria muy alta al existir poca vegetación, y en el encuentro con el cuaternario dan surgencia, la recarga de todo el acuífero es anual, y el movimiento de las aguas en sentido Oeste Este es de la montaña al río Guadalquivir y en sentido Norte sur, desde el Noroeste hacia el Sudeste, siguiendo el curso del Guadalquivir, aflorando en los estrechos de Obrajes, San Luís y Angostura.

## 5.2 Datos Disponibles y Estudios Realizados

La información sobre los pozos, ha sido obtenida de la gobernación, la misma que ha logrado reunir bajo archivo, la información, sobre las características del pozo, condiciones geológicas del pozo, sondeo geológico eléctrico y de algunos de ellos pruebas de bombeo. Esta información está consignada en la documentación GIS a ser entregada.

También se cuenta con el informe del Plan Maestro de STCV, el informe Sherr, dos informes sobre pozos de la gobernación y otro de ordenamiento territorial, sobre el cual se basó el análisis de las aguas subterráneas

Cossalt ha provisto información o registros de los pozos de carácter operativo, como número de horas de bombeo y caudales producidos. La información abarca el periodo 2007 al 2011.

## 5.3 Caudales disponibles y Garantía de Suministro

En conformidad a lo que se ha señalado anteriormente sobre las características de los mantos acuíferos y sus condicionantes y aquello, expresado en el punto anterior, se considera que la propuesta para la explotación de los recursos hídricos subterráneos, se debe efectuar en las áreas de:

- Antiguo lecho del río Guadalquivir. Donde se conserva un paquete cuaternario y al cual fluyen las aguas en su afloramiento.
- Actual lecho del Guadalquivir. Cuaternario y sitio en el cual afloran las aguas subterráneas, la ubicación de pozos sobre el lado derecho permitirá captar el agua que viene de las serranías al río sin que ellas crucen el río.
- Unión de Ordovícico con el cuaternario. Zona de recarga del acuífero, surgencia del agua. La mejor zona.

Se ha establecido en el estudio hidrogeológico del consorcio y el balance hídrico efectuado en el Plan Maestro elaborado por STCV, que la explotación del acuífero en la zona del valle central, debajo la ciudad, fluctúa entre 9.450.000 HM<sup>3</sup> (300 l/s) y 15.750.000 HM<sup>3</sup> (500 l/s), se podría tomar un promedio de hasta 400 l/s y englobaría las áreas 1 y 2.

La parte más prometedora, está en el abanico del río Erquis, Río La Vitoria, Los Pinos, San Andrés y Tolomosa, y de ella según el estudio de NNUU Codetar, con pozos perforados se dispone de un acuífero continuo, con un espesor de 300 m, surgente, con poco descenso del nivel freático y con profundidades de 40 m, el mejor sitio San Andrés- Tolomosa. La disponibilidad de agua subterránea es de (1250 l/s). Según el estudio de SHEER, solo alcanzarían a explotarse tres pozos de 30 l/s y STCV propuso en el Río Los Pinos y Tolomosa una Galería Filtrante para obtener un caudal cercano a los 500 l/s.

La información entregada por Cossalt respecto a los pozos que están siendo operados por ellos, ha sido procesada y se ha establecido el caudal medio que produce el pozo y cual el valor máximo que registro en el período 2007-2011 como aparece en el cuadro H-15.

El cuadro indica que en muchos de los meses y años para un determinado pozo, se obtuvo un valor de caudal máximo, que es superior con el que está actualmente funcionando. Se considera que en el futuro se podrá alcanzar este valor. Existen pozos, en los cuales el caudal de producción no alcanza los 5 l/s y varios han sido suspendidos y que en el futuro se podría prescindir de ellos. Estos pozos podrían ser eliminados en la conformación del nuevo sistema de explotación.

También se puede ordenar los pozos por caudal de producción y agruparlos en pozos con caudales que superan los 10 l/s, están comprendidos entre 8 y 10 l/s y otro grupo cuyos caudales no han superado los 5 l/s. y se puede zonificar áreas de mayor producción.

Tabla 5.1 Valores registrados d caudal en L/s

| 2011                  |       |       | 2010                  |       |       | 2009                  |       |       | 2008                          |       |       | 2007                          |       |       |
|-----------------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------------------------------|-------|-------|-------------------------------|-------|-------|
| SISTEMAS              | media | max   | SISTEMAS              | media | max   | SISTEMAS              | media | max   | SISTEMAS                      | media | max   | SISTEMAS                      | media | max   |
| Villa Fátima Pozo "B" | 2,45  | 8,86  | Villa Fátima Pozo "B" | 3,68  | 9,31  | Villa Fátima Pozo "B" | 5,08  | 18,23 | Villa Fátima Pozo "B"         | 6,67  | 18,57 | Villa Fátima Pozo "B"         | 5,80  | 18,50 |
| Oscar Zamora M.       | 12,22 | 14,46 | Oscar Zamora M.       | 10,01 | 10,58 | Oscar Zamora M.       | 10,74 | 11,72 | Oscar Zamora M.               | 13,85 | 18,56 | Oscar Zamora M.               | 16,83 | 17,69 |
| Avit Pozo B           | 13,36 | 15,72 | Avit Pozo B           | 12,03 | 18,59 | Avit Pozo B           | 14,00 | 17,57 | Avit Pozo B                   | 11,93 | 13,41 | Avit Pozo B                   | 12,23 | 14,61 |
| Avit Pozo A           | 13,12 | 14,82 | Avit Pozo A           | 11,02 | 16,96 | Avit Pozo A           | 11,81 | 14,22 | Avit Pozo A                   | 12,76 | 13,44 | Avit Pozo A                   | 10,86 | 13,06 |
| Villa Fátima Pozo "A" | 3,29  | 14,25 | Villa Fátima Pozo "A" | 4,58  | 11,58 |                       |       |       |                               |       |       |                               |       |       |
| Guadalquivir          | 4,78  | 12,87 | Guadalquivir          | 5,87  | 12,85 | Guadalquivir          | 8,00  | 15,83 | Guadalquivir Stadium Pozo "B" | 7,89  | 18,25 | Guadalquivir Stadium Pozo "B" | 7,73  | 17,49 |
| Anaspugio "B"         | 7,05  | 12,97 | Anaspugio "B"         | 5,15  | 10,27 |                       |       |       |                               |       |       |                               |       |       |
| Morros Blancos "B"    | 3,93  | 11,77 |                       |       |       |                       |       |       |                               |       |       |                               |       |       |
| Lourdes               | 7,82  | 11,62 | Lourdes               | 8,31  | 9,33  |                       |       |       |                               |       |       |                               |       |       |
| Narcizo Campero       | 2,93  | 10,68 | Narcizo Campero       | 4,43  | 8,90  | Narcizo Campero       | 3,89  | 9,50  | Narcizo Campero               | 4,23  | 10,33 | Narcizo Campero               | 6,46  | 9,63  |
| Simón Bolívar         | 8,38  | 10,46 | Simón Bolívar         | 7,36  | 11,17 | Simón Bolívar         | 10,92 | 11,71 | Simón Bolívar                 | 10,37 | 11,25 | Simón Bolívar                 | 8,14  | 10,25 |
| 19 de Marzo           | 3,86  | 10,89 |                       |       |       |                       |       |       |                               |       |       |                               |       |       |
| San Luis              | 8,10  | 9,48  | San Luis              | 12,13 | 15,71 | San Luis              | 6,30  | 7,64  | San Luis                      | 7,19  | 8,92  | San Luis                      | 6,81  | 7,79  |
| Luis Espinal A        | 7,05  | 8,43  | Luis Espinal A        | 7,07  | 9,24  | Luis Espinal A        | 5,79  | 6,70  | Luis Espinal A                | 5,26  | 6,01  | Luis Espinal A                | 5,15  | 6,52  |
| Albat                 | 5,35  | 7,23  | Albat                 | 5,03  | 6,88  | Albat                 | 6,74  | 8,43  | Albat                         | 5,99  | 8,57  | Albat                         | 6,68  | 7,84  |
| Pedro Antonio Flores  | 4,27  | 5,74  | Pedro Antonio Flores  | 4,62  | 6,55  | Pedro Antonio Flores  | 5,52  | 7,38  | Pedro Antonio Flores          | 5,20  | 7,77  | Pedro Antonio Flores          | 5,88  | 6,56  |
| Morros Blancos "A"    | 6,27  | 7,37  | Morros Blancos "A"    | 7,93  | 8,70  | Morros Blancos "A"    | 5,67  | 7,64  | Morros Blancos "A"            | 3,85  | 6,95  | Morros Blancos "A"            | 4,09  | 6,15  |
|                       |       |       | Morros Blancos        | 3,43  | 8,62  | Morros Blancos        | 3,30  | 8,71  | Morros Blancos                | 4,19  | 7,19  | Morros Blancos                | 4,81  | 6,96  |
| San Jacinto Pozo "B"  | 3,85  | 7,73  | San Jacinto Pozo "B"  | 2,11  | 6,65  | San Jacinto Pozo "B"  | 1,07  | 6,89  |                               |       |       |                               |       |       |
| San Jacinto Pozo "A"  | 3,29  | 6,80  | San Jacinto Pozo "A"  | 1,91  | 6,01  | San Jacinto Pozo "A"  | 2,20  | 8,52  |                               |       |       |                               |       |       |
| Luis Espinal B        | 6,76  | 7,65  | Luis Espinal B        | 3,74  | 7,50  |                       |       |       |                               |       |       |                               |       |       |





Bajo este análisis se puede indicar en las condiciones actuales de explotación, diámetro de pozo, bombas instaladas, horas de funcionamiento el caudal máximo obtenido está en 279.05 l/s, alcanzado el pasado año, y que se ha tenido un incremento de producción anual.

Este resultado, lleva a pensar que se podría realizar una homogenización de los valores de caudal, teniendo en cuenta el pasado y su ubicación del pozo y las horas de bombeo a 20 horas con lo cual se tendrá:

Tabla 5.2. Pozos a ser operados

| SISTEMAS                   | demanda       | 18 horas /24 h | produce<br>propuesta |            |
|----------------------------|---------------|----------------|----------------------|------------|
| Villa Fatima Pozo "B"      | 15.00         | 0.83           | 18                   |            |
| Oscar Zamora M.            | 16.67         | 0.83           | 20                   |            |
| Avit Pozo B                | 15.00         | 0.83           | 18                   |            |
| Avit Pozo A                | 12.50         | 0.83           | 15                   |            |
| Villa Fatima Pozo "A"      | 12.50         | 0.83           | 15                   |            |
| Guadalquivir               | 15.00         | 0.83           | 18                   |            |
|                            | 0.00          | 0.83           | 0                    |            |
| Anaspugio "B"              | 10.83         | 0.83           | 13                   |            |
| Morros Blancos "B"         | 10.83         | 0.83           | 13                   |            |
| Lourdes                    | 10.83         | 0.83           | 13                   |            |
| Narcizo Campero            | 10.83         | 0.83           | 13                   |            |
| Simon Bolivar              | 10.83         | 0.83           | 13                   |            |
|                            |               |                |                      |            |
| 19 de Marzo                | 8.33          | 0.83           | 10                   |            |
| San Luis                   | 10.83         | 0.83           | 13                   |            |
| Luis Espinal A             | 8.33          | 0.83           | 10                   |            |
| Albat                      | 8.33          | 0.83           | 10                   |            |
| Pedro Antonio Flores       | 8.33          | 0.83           | 10                   |            |
| Morros Blancos "A"         | 8.33          | 0.83           | 10                   |            |
|                            | 0.00          | 0.83           | 0                    |            |
| San Jacinto Pozo "B"       | 8.33          | 0.83           | 10                   |            |
| San Jacinto Pozo "A"       | 8.33          | 0.83           | 10                   |            |
| Luis Espinal B             | 8.33          | 0.83           | 10                   |            |
|                            |               |                |                      |            |
| San Salvador               | 8.33          | 0.83           | 10                   |            |
|                            | 6.67          | 0.83           | 8                    |            |
| 3 de mayo                  | 8.33          | 0.83           | 10                   |            |
| Aeropuerto "B"             | 8.33          | 0.83           | 10                   |            |
| San Jorge II               | 0.00          | 0.83           |                      |            |
| San Bernardo " B"          | 0.00          | 0.83           |                      |            |
|                            |               |                |                      |            |
| San Bernardo "A"           | 0.00          | 0.83           | 0                    |            |
| 1ro de Mayo                | 0.00          | 0.83           | 0                    |            |
| Los Alamos                 | 0.00          | 0.83           | 0                    |            |
| Anaspugio "A"              | 0.00          | 0.83           | 0                    |            |
| Aeropuerto "A"             | 0.00          | 0.83           | 0                    |            |
| El Constructor "A"         | 0.00          | 0.83           | 0                    |            |
| El Constructor "B"         | 0.00          | 0.83           | 0                    |            |
| Base Aerea                 | 0.00          | 0.83           | 0                    |            |
|                            | 0.00          | 0.83           | 0                    |            |
| Tomatas C                  | 0.00          | 0.83           | 0                    |            |
|                            | 0.00          | 0.83           | 0                    |            |
| Carcel Publica             | 0.00          | 0.83           | 0                    |            |
| Av. Circunvalacion "A"     | 0.00          | 0.83           | 0                    |            |
| Av. Circunvalacion "B"     | 0.00          | 0.83           | 0                    |            |
|                            | 0.00          | 0.83           | 0                    |            |
| Daniel Campos              | 0.00          | 0.83           | 0                    |            |
| Las Barrancas              | 0.00          | 0.83           | 0                    |            |
| Stadium Pozo "B"           | 0.00          | 0.83           | 0                    |            |
| Villa Bush                 | 0.00          | 0.83           | 0                    |            |
| Total sist. Bombeo pozos ( | <b>250.00</b> | <b>0.75</b>    | <b>300</b>           | <b>l/s</b> |

Fuente: Elaboración propia

Un caudal de explotación de 300 l/s que significan 250 l/s para satisfacer la demanda adoptando un tiempo de bombeo de 20 horas sobre 24.

Se puede indicar que el potencial de aguas subterráneas alcanza en el sitio de la ciudad a 500 l/s como ha sido determinado por el balance hidrológico de los cuales se utilizan al presente 300 l/s, y con nuevos pozos se llegará a 500 l/s, mientras que en el área de Tolosa y San Andrés el potencial es 1250 l/s y se dispondrá de 180 l/s, teniendo presente que también se debe atender el sector agropecuario y de usos doméstico en las poblaciones asentadas en el área.

## 6. LA INCIDENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO

### 6.1 EFECTOS GLOBALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

En esta sección se presentan los resultados de una revisión bibliográfica en relación a los pronósticos realizados mediante la aplicación de diferentes modelos climáticos globales, y los resultados o inferencias obtenidas a nivel de Bolivia y la región del proyecto.

Se realiza también un intento de corroborar ciertos hallazgos mencionados en la literatura con análisis sencillos de las posibles tendencias relacionadas con el comportamiento de las temperaturas promedio y las precipitaciones anuales registradas en algunas estaciones existentes en el país, con registros lo más extensos posible, como es el caso de San Calixto, que cuenta con registros de precipitación desde el año 1917.

Sin embargo, por la naturaleza de los fenómenos asociados al proceso de cambio climático, que requiere de la disponibilidad de registros centenarios, e incluso más largos, cabe indicar que las opciones de análisis confiables y representativos son muy limitadas en nuestro país, debido a que por lo general la longitud de los registros disponibles apenas cubren pocas décadas.

Respecto al fenómeno global del cambio climático, es bien conocido que el incremento de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero de origen antrópico, está elevando la temperatura media de la superficie terrestre, conduciendo a modificaciones en la interrelación entre los componentes del sistema climático. Se prevén consecuencias como aumentos en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos (como ser: precipitaciones más intensas, concentradas en determinadas zonas, con el consiguiente incremento de los caudales pico de crecida y la ocurrencia de inundaciones más severas; concentración de las precipitaciones en periodos más cortos del año, periodos de poca o ausencia de precipitación durante periodos más largos, incrementando por tanto los periodos de sequía, el estrés hídrico y la necesidad de construir opciones de almacenamiento de agua; etc.) u otros efectos crónicos que van agudizando la crisis de los sistemas naturales y humanos.

La investigación sobre la verdadera magnitud del cambio climático en el mundo y en Bolivia, en particular, tiene altas incertidumbres debido a la limitada cantidad de información sistemática, sin embargo, proporciona referencias sobre los posibles escenarios de cambio climático que se generarán en el futuro, lo cual es de mucha ayuda para realizar algunas estimaciones sobre los posibles escenarios de cambio en las características climáticas para determinar cuáles serán las condiciones futuras de los recursos o los sectores críticos fuertemente dependientes del clima, entre ellos, la disponibilidad de recursos hídricos.

Así, en la literatura se reportan efectos visibles del cambio climático en relación al agua. El Documento VI del IPCC (EL Cambio Climático y el Agua, 2008), reporta para los tres últimos decenios, que América Latina ha estado sometida a los impactos siguientes en relación con el clima, algunos de ellos vinculados a los episodios de ENOA (El Niño Oscilación Austral).

- Aumento de la frecuencia de extremos climáticos tales como crecidas, sequías o deslizamientos de tierra por ejemplo, las intensas precipitaciones de Venezuela (1999 y 2005); la inundación de la Pampa argentina (2000 y 2002), la sequía del Amazonas (2005), las destructivas tempestades de granizo de Bolivia (2002) y de Buenos Aires (2006), el ciclón Catarina en el Atlántico Sur (2004), o la estación de huracanes de 2005, sin precedentes en la región del Caribe). La frecuencia de desastres relacionados con el clima aumentó en un factor de 2,4 entre 1970-1999 y 2000-2005, continuando así la tendencia observada durante los años 90. Sólo se ha

cuantificado económicamente un 19% de los fenómenos acaecidos entre 2000 y 2005, que representan unas pérdidas de casi 20.000 millones de dólares.

- Estrés respecto a la disponibilidad del agua: diversas sequías relacionadas con La Niña restringieron gravemente el abastecimiento de agua y la demanda de agua de riego en la parte central y occidental de Argentina y en el centro de Chile. Sequías relacionadas con El Niño hicieron disminuir el caudal del río Cauca, en Colombia.
- Se han observado aumentos de la precipitación en el sur de Brasil, Paraguay, Uruguay, nordeste de Argentina (Pampas), y partes de Bolivia, noroeste de Perú, Ecuador y noroeste de México. El aumento de la precipitación incrementó en un 10% la frecuencia de crecidas en el río Amazonas a la altura de Obidos, y en un 50% el caudal de los ríos de Uruguay, del Paraná y del Paraguay, así como las crecidas en la cuenca del Mamoré, en la Amazonia boliviana.
- Se ha observado también en la región un aumento en cuanto a episodios de precipitación intensa y días secos. Recíprocamente, se ha observado una tendencia decreciente de la precipitación en Chile, suroeste de Argentina, nordeste de Brasil, sur de Perú y oeste de América Central (por ejemplo, en Nicaragua).
- Un aumento del nivel del mar de 2-3 mm/año durante los últimos 10-20 años en el sureste de América del Sur.
- En el área tropical andina de Bolivia, Perú, Ecuador y Colombia la superficie de los glaciares ha disminuido en magnitud similar a la del cambio mundial experimentado desde el final de la Pequeña Era Glacial.
- Los glaciares más pequeños han sido los más afectados, entre ellos el Glaciar de Chacaltaya, que prácticamente ha desaparecido. La razón de estos cambios, a diferencia de los experimentados en latitudes medias y altas, está vinculada a una combinación compleja y espacialmente variable de altas temperaturas y de cambios en el contenido de humedad de la atmósfera.

## 6.2 PROBABLES IMPACTOS SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS

Estudios realizados por Müller, muestran que como resultado del cambio climático, las tendencias en las zonas situadas al Sudoeste del país presentarán una mayor aridez, mientras que las zonas situadas en el Noreste, no presentarán modificaciones sustanciales en su régimen hidrológico<sup>1</sup>. Las áreas situadas en el sur del país serán las más afectadas por el cambio climático, requiriendo una consideración adicional de vulnerabilidad al cambio climático en su administración.

En general, sobre el conjunto de las cuencas de Bolivia, la precipitación media ha sido estimada en 1,419 mm/año<sup>5</sup>. Sin embargo, las tres grandes cuencas del país muestran importantes diferencias en cuanto a su pluviosidad media. La cuenca amazónica recibe 1,814 mm/año, mientras que la del Río de La Plata no se beneficia más que de 854 mm/año. El Altiplano, en la totalidad de su superficie endorreica, con 421 mm/año, es aún menos favorecido que las anteriores dos. Estos datos muestran que la cuenca amazónica tiene el doble de precipitación que la del Río de La Plata y cuatro veces más que la del Altiplano<sup>6</sup>.

En base a la anterior información, se concluye que la disponibilidad de agua se encuentra restringida principalmente en las cuencas del Plata y Endorreica y en menor magnitud en la cuenca amazónica, por la concentración de la precipitación en solo una época del año. Esto significa que en los meses de escasez se hace necesario el almacenamiento del recurso para su utilización, especialmente para uso doméstico e industrial. En el caso de la agricultura, la mayoría de los cultivos son de secano

<sup>5</sup> VAN DAMME, 2004. Disponibilidad, Uso y Calidad de los Recursos Hídricos en Bolivia. Consejo para la Gestión Integral del Agua en Bolivia. Cochabamba, Bolivia.

<sup>6</sup> Balance Hídrico Superficial de Bolivia, ORSTOM, SENAMHI, 1990.

precisamente por la baja disponibilidad de agua. Por lo tanto, no es raro observar que las principales demandas por infraestructura productiva estén orientadas a sistemas de riego.

Como se ha visto en las secciones anteriores, con la información disponible, no es posible realizar estimaciones aproximadas de las tendencias a nivel local, menos aún debido a que no se dispone de estadísticas largas y confiables de caudales en los ríos de la región.

Es claro sin embargo que, de acuerdo a los escenarios de proyecciones realizadas a escala global, se puede esperar en el área del proyecto que la variabilidad climática generará la ocurrencia de eventos de precipitación intensa en periodos cortos (se producirán precipitaciones con mayores intensidades, lo que a su vez modificará el patrón de Intensidad – Duración – Frecuencia), repercutiendo en crecidas de mayor magnitud. También se anticipa la ocurrencia de una mayor frecuencia de tormentas con menor número de días de lluvia, mayor frecuencia de la ocurrencia de eventos de granizadas, y, finalmente, posible reducción en los caudales de los ríos, esto último debido a que, si bien eventualmente se tengan mayores escurrimientos, debido a que se espera que los eventos de lluvia sean más concentrados en periodos más cortos, el agua escurrirá más rápidamente, con una consiguiente menor infiltración y menor recarga de acuíferos, lo que a su vez puede repercutir en menores caudales base de los ríos en el periodo de estiaje.

Con el objeto de intentar establecer un orden de magnitud de la afectación sobre la disponibilidad de los recursos hídricos en las cuencas actuales y potenciales, se ha realizado un ejercicio sencillo de balance hídrico, tomando como escenario extremo el supuesto de un incremento de la temperatura en 1.0 °C hasta el final del horizonte del proyecto (0.385 °C/década), y una disminución de la precipitación equivalente a la mencionada para la estación de AASANA (-1.0 mm/año, o -0.2%/año).<sup>7</sup>

Los datos básicos tomados, asumen una cuenca cualquiera en la Cordillera, a una altitud promedio de 4250 msnm y los datos de precipitación y temperatura promedio actual y pronosticado al 2036, de acuerdo a lo siguiente:

Tabla 6.1. Precipitación y temperatura promedio actual y pronosticado al 2036

|                         |               |       |
|-------------------------|---------------|-------|
| <b>Situación Actual</b> | H Prom (msnm) | 4250  |
|                         | P Prom (mm)   | 850   |
|                         | T Prom (°C)   | 6.3   |
|                         | ETR Turc (mm) | 416.2 |
|                         | R (mm)        | 433.8 |
| <b>Pronóstico 2036</b>  | P Prom (mm)   | 810   |
|                         | T Prom (°C)   | 7.3   |
|                         | ETR Turc (mm) | 432.7 |
|                         | R (mm)        | 377.3 |
| <b>Diferencia en R</b>  | (mm)          | 56.5  |
|                         | (%)           | 13.0  |

Para el efecto, se ha aplicado la fórmula empírica de Turc para determinar la Evapotranspiración Real, hallándose a través de ésta (asumiendo que no existe cambio de almacenamiento entre un año y otro, lo que es aceptable en el largo plazo), que bajo los supuestos tomados, se produce una disminución del escurrimiento promedio anual equivalente a un -13%.

Por otra parte, si se toma un incremento en la temperatura de 2 °C y una disminución en la precipitación de un 15% (-127.5 °C), en total se produciría una disminución del escurrimiento equivalente a un 34.5%.

<sup>7</sup> en el estudio de la cuenca de Tolomosa, el INIBREH, menciona que por efecto del Cambio climático debiera adoptarse una disminución del 10 % del total o una magnitud equivalente a 20 mm por mes en aquellos meses que llueve.

Frente a estos resultados, resulta recomendable analizar el impacto en las disponibilidades de las cuencas del proyecto, tomando una disminución de los caudales de un 5 al 30%. Es claro, que los impactos estimados representan valores groseros, y que otros factores, como por ejemplo un adecuado manejo de cuencas, podrían mitigar de manera importante tales potenciales impactos.

### 6.3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de los análisis realizados en las secciones anteriores, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Existen evidencias de que el calentamiento global está afectando a Sud América y al país, lo que se manifiesta a través de cambios evidentes, el más claro en nuestro país expresado a través del dramático retroceso de los glaciares medido en las últimas décadas y de la tácita desaparición del Glaciar de Chacaltaya.
- Aunque no existen predicciones directas para nuestro país y no es posible realizar estimaciones confiables directas por la precariedad y escasez de registros, la mayoría de los modelos climáticos a escala global anticipan para la región andina y el área del proyecto, un incremento de la temperatura promedio anual hasta el año 2050, de aproximadamente 1.5 °C.
- Del mismo modo, dichos modelos coinciden en la probable ocurrencia de un incremento de hasta un 22% para el año 2050 en las precipitaciones en las áreas tropicales, y un eventual decremento de hasta un 19% en la zona interandina, que podría coincidir con el área del proyecto.

Dichos escenarios coinciden también que en general se puede esperar que en el área del proyecto la variabilidad climática pudiera ocasionar los siguientes efectos:

- Ocurrencia de eventos de precipitación más intensa en periodos cortos, repercutiendo en crecidas de mayor magnitud
- Ocurrencia de una mayor frecuencia de tormentas con menor número de días de lluvia
- Mayor frecuencia de la ocurrencia de eventos de granizadas
- Posible reducción en los caudales de los ríos, esto último debido a que, si bien eventualmente se tengan mayores escurrimientos, debido a que se espera que los eventos de lluvia sean más concentrados en periodos más cortos, el agua escurrirá más rápidamente, con una consiguiente menor infiltración y menor recarga de acuíferos, lo que a su vez puede repercutir en menores caudales base de los ríos en el periodo de estiaje.

A su vez, los impactos esperados como consecuencia de los cambios climáticos y su influencia sobre el régimen y recursos hídricos, serían los siguientes:

- Competencia por el uso de agua (mayor demanda de agua potable y de riego en las tierras dentro y fuera de la cuenca, aguas abajo del sitio de presa)
- Pérdida de la biodiversidad
- Riesgos incrementados de deslaves, mazamorras y otros derivados
- Incremento de los riesgos y exposición a la erosión, que podría incrementar las tasas de transporte de sedimentos

En este contexto, para garantizar y prevenir la conservación de los recursos hídricos para el abastecimiento de agua potable, resulta recomendable implementar políticas y acciones de prevención y mitigación, tales como la construcción de embalses y manejo de cuencas.

Por otro lado, frente a los resultados encontrados, resulta recomendable analizar el impacto en las disponibilidades de las cuencas del proyecto, entre un 5 y 30%. Es claro, que los impactos estimados representan valores groseros, y que otros factores, como por ejemplo un adecuado manejo de cuencas,

podrían mitigar de manera importante tales potenciales impactos y atendiendo al trabajo efectuado por el INIBREH en la cuenca de Tolomosa, un valor recomendable y a ser adoptado es del 10 %.

#### 6.4 NUESTRA APRECIACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DEL VALLE DE TARIJA

Para desarrollar el escenario de la oferta hídrica bajo influencia del cambio climático, se requiere adoptar un modelo de cambio climático para el Proyecto

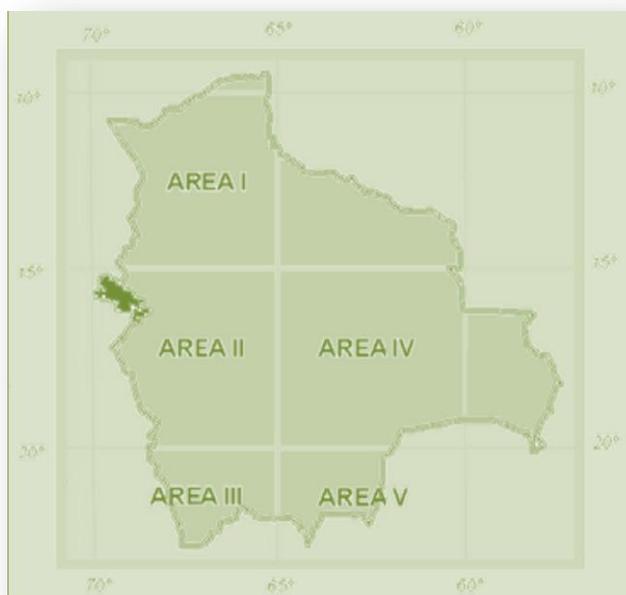
Los modelos de cambio climático que se han empleado para analizar las variaciones de temperatura, precipitación y caudal, difieren en su metodología y datos a ser aplicados. Entre los documentos que detallan la aplicación de modelos de cambio climático en el área de estudio, se tienen:

- Análisis del impacto de posibles cambios climáticos en la hidrología superficial de la cuenca del Río Bermejo, Formulación del Programa Estratégico de Acción para la Cuenca del Río Bermejo, 1999
- Primera Comunicación Nacional ante la Convención de Cambio Climático, Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación, 2000

El primer documento detalla la aplicación del modelo de Wigley y Jones (1985), sin embargo, su aplicación es para caudales anuales, y para ello se debe realizar la estimación de parámetros de cambio de la precipitación y la evapotranspiración potencial.

En el segundo documento, existen conclusiones importantes sobre el cambio en la temperatura y la precipitación, a partir de la aplicación de modelos de cambio climático en cinco zonas del territorio nacional, la que corresponde al área de estudio es la Zona V, como se observa en la siguiente imagen:

Figura 6.1. Áreas Climáticas Para El Uso De Los Modelos De Circulación General



Fuente: Mapa N°3 de la Primera Comunicación Nacional ante la Convención de Cambio Climático (2000)

En el documento de referencia, se analizaron varios escenarios climáticos que poseen las siguientes características:

El SENAMHI combinó los programas MAGICC (Model for the Assesment of Greenhouse gas Induced Climate Change) y el SCENGEN (Scenario Generator). El primero de ellos presenta las estimaciones de

las concentraciones de GEI, y la temperatura global entre los años 1990 al 2100; en tanto el segundo combina los resultados del MAGGIC y los MCG.

El trabajo realizado por el SENAEMI contempla tres escenarios globales de cambio climático: IS92a (considerado como escenario de referencia por el Comité de Negociaciones de la CMNUCC, estima un rango medio de emisiones futuras, asumiendo un grado modesto de intervención para reducir emisiones de GEI, se considera como escenario de referencia), IS92c5 (escenario optimista) y IS92e (escenario pesimista), respectivamente.

- El escenario IS92a hace las siguientes consideraciones; la población tendrá un incremento hasta el año 2100 alcanzando a 11.3 mil millones, el crecimiento económico será de 2.9% hasta el año 2025 y de 2,3% hasta el año 2100, el costo de la energía solar bajará a 0,075 Kw/h, el costo de petróleo será 70 \$US /barril. El esfuerzo de reducción de los países desarrollados será para mediados del próximo siglo.
- El escenario IS92c hace las siguientes consideraciones: la población alcanzaría 6.4 mil millones de habitantes para el año 2100. El crecimiento económico será de 2.0% hasta el año 2025 y 1.2% hasta el año 2100. El consumo global de energía es de 8.000 EJ de petróleo convencional y 7.300 EJ de gas natural. El costo de la energía nuclear disminuye anualmente en 0.4%.
- El escenario IS92e considera incremento de población hasta el 2100 de 11,3 billones, crecimiento económico de 3.5% entre el 1990 y el 2025 y posteriormente de 3.0% hasta el 2100 e incremento de la energía fósil del 30%.
- Ambos modelos consideran la existencia de medidas de control y acuerdos internacionales y esfuerzos de reducción de emisiones de los países en desarrollo a partir de mediados de siglo.

Las conclusiones abordadas en el documento a propósito de dos estudios desarrollados:

- Una comparación entre ambos estudios (PNCC, 1997 y SENAMHI, 1998) es difícil de realizar toda vez que los puntos de partida son diferentes, sin embargo en términos generales se aprecia comportamientos similares en los resultados.
- En la Cuenca del Plata, relacionada con el área V, se puede apreciar también aumento de temperaturas, sin embargo los estudios difieren en cuanto a precipitación toda vez que en un caso se presentaría reducción de precipitación y en el otro (SENAMHI) incremento.

Para el presente estudio se adoptó la influencia del cambio climático bajo un escenario pesimista (IS92e), para el cual las variaciones de la precipitación son como se expone en la siguiente Tabla:

Tabla 6.2. Variación de la precipitación en relación a la normal (periodo 1961-1990) en los diferentes modelos de circulación GENERAL (HADCM2. UKHI. GISSEQ) PARA EL ESCENARIO IS92 E)

|               | 2030        |                | 2050        |                | 2100        |                |
|---------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|
|               | AREA V      |                |             |                |             |                |
| Meses secos   | (-13) a 21% | (-0.6) a 4.2mm | (-19) a 33% | (-0.9) a 7 mm  | (-63) a 68% | (-1.8) a 14 mm |
| Meses húmedos | (-8) a 22%  | (-3) a 30mm    | (-13) a 34% | (-4.4) a 63 mm | (-25) a 69% | (-9) a 127 mm  |

Fuente: Tabla 3.6 de la Primera Comunicación Nacional ante la Convención de Cambio Climático (2000)

Para el análisis de la influencia del cambio climático, como se muestra a continuación, se adoptaron las condiciones más pesimistas del modelo, considerando el horizonte de análisis del año 2036, para lo cual la precipitación tiene una variación porcentual de -19 % en los meses secos y de -13% en los meses húmedos.<sup>8</sup>

Estableciendo que los meses secos se encuentran comprendidos entre Abril y Septiembre, y los meses húmedos en los restantes del año, se procedió a encontrar los valores medios mensuales de la precipitación bajo la influencia de un escenario de cambio climático pesimista, y consiguientemente afectados por los porcentajes que corresponden a cada periodo (seco y húmedo). Una vez encontrada la precipitación media mensual areal para cada cuenca, se procedió a determinar el caudal medio mensual aplicando el modelo del coeficiente de escorrentía anual. Los valores son:

Tabla 6.3. Caudal medio mensual de las fuentes superficiales actuales en Valle Tarija para un escenario pesimista de cambio climático

|                    |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          |          |          |
|--------------------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tomando el valor   | Deducción 22% |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          |          |          |
|                    |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          |          |          |
|                    | 393           | 0,5      | 544      | 151      | 459      | 85       | 308         |          |          |          |          |          |          |
|                    |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          |          |          |
| Relacion Di/D      | 0,020         | 0,057    | 0,115    | 0,174    | 0,214    | 0,189    | 0,121       | 0,059    | 0,024    | 0,011    | 0,009    | 0,007    | 1,000    |
| D (mm)             | 8             | 23       | 45       | 68       | 84       | 74       | 48          | 23       | 10       | 4        | 3        | 3        | 393      |
| infiltra (mm)      | 6             | 18       | 35       | 54       | 66       | 58       | 37          | 18       | 7        | 3        | 3        | 2        | 308      |
|                    |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          |          |          |
| Area (Km2)         | Vitoria       | 34,46    | Erquis   | 104,45   | Tipas    | 913,31   | Calderilla  | 38       |          |          |          |          |          |
| tiempo (seg)       | 2,68E+06      | 2,59E+06 | 2,68E+06 | 2,68E+06 | 2,46E+06 | 2,68E+06 | 2,59E+06    | 2,68E+06 | 2,59E+06 | 2,68E+06 | 2,68E+06 | 2,59E+06 | 2,36E+07 |
| <b>Vitoria</b>     |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          |          |          |
| Qs (m3/s)          | 0,100         | 0,299    | 0,579    | 0,880    | 1,175    | 0,958    | 0,633       | 0,301    | 0,127    | 0,056    | 0,045    | 0,035    | 0,432    |
| Qi (m3/s)          | 0,078         | 0,234    | 0,453    | 0,689    | 0,920    | 0,750    | 0,496       | 0,235    | 0,099    | 0,044    | 0,035    | 0,027    | 0,338    |
| q min (m3/s)       |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          | 0,062    |          |
| <b>Erquis</b>      |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          |          |          |
| Qs (m3/s)          | 0,304         | 0,907    | 1,756    | 2,668    | 3,563    | 2,904    | 1,919       | 0,912    | 0,384    | 0,169    | 0,135    | 0,105    | 1,310    |
| Qi (m3/s)          | 0,238         | 0,710    | 1,374    | 2,088    | 2,789    | 2,273    | 1,502       | 0,714    | 0,300    | 0,132    | 0,106    | 0,082    | 1,026    |
| q min (m3/s)       |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          | 0,187    |          |
| <b>Tipas</b>       |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          |          |          |
| Qs (m3/s)          | 2,657         | 7,933    | 15,354   | 23,326   | 31,153   | 25,393   | 16,781      | 7,972    | 3,356    | 1,476    | 1,181    | 0,915    | 11,458   |
| Qi (m3/s)          | 2,080         | 6,209    | 12,018   | 18,258   | 24,384   | 19,875   | 13,135      | 6,240    | 2,627    | 1,156    | 0,924    | 0,716    | 8,968    |
| q min (m3/s)       |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          | 1,632    |          |
| <b>Calderillas</b> |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          |          |          |
| Qs (m3/s)          | 0,111         | 0,330    | 0,639    | 0,971    | 1,296    | 1,057    | 0,698       | 0,332    | 0,140    | 0,061    | 0,049    | 0,038    | 0,477    |
| Qi (m3/s)          | 0,087         | 0,258    | 0,500    | 0,760    | 1,015    | 0,827    | 0,546       | 0,260    | 0,109    | 0,048    | 0,038    | 0,030    | 0,373    |
| q min (m3/s)       |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          | 0,068    |          |
|                    |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          |          |          |
| Tomando el valor   | Deducción 8%  |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          |          |          |
|                    |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          |          |          |
|                    | 464           | 0,5      | 642      | 178      | 522      | 120      | 343         | 343      |          |          |          |          |          |
|                    |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          |          |          |
| Relacion Di/D      | 0,0198        | 0,0573   | 0,114537 | 0,1740   | 0,2137   | 0,1894   | 0,1211      | 0,0595   | 0,0242   | 0,0110   | 0,0088   | 0,0066   | 1,0000   |
| D (mm)             | 9             | 27       | 53       | 81       | 99       | 88       | 56          | 28       | 11       | 5        | 4        | 3        | 464      |
| infiltra (mm)      | 7             | 20       | 39       | 60       | 73       | 65       | 42          | 20       | 8        | 4        | 3        | 2        | 343      |
|                    |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          |          |          |
| Area (Km2)         | Vitoria       | 34,46    | Erquis   | 104,45   | Tipas    | 913,31   | Calderillas | 38       |          |          |          |          |          |
| tiempo (seg)       | 2,68E+06      | 2,59E+06 | 2,68E+06 | 2,68E+06 | 2,46E+06 | 2,68E+06 | 2,59E+06    | 2,68E+06 | 2,59E+06 | 2,68E+06 | 2,68E+06 | 2,59E+06 | 2,36E+07 |
| <b>Vitoria</b>     |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          |          |          |
| Qs (m3/s)          | 0,118         | 0,353    | 0,683    | 1,038    | 1,386    | 1,130    | 0,747       | 0,355    | 0,149    | 0,066    | 0,053    | 0,041    | 0,510    |
| Qi (m3/s)          | 0,088         | 0,261    | 0,506    | 0,769    | 1,027    | 0,837    | 0,553       | 0,263    | 0,111    | 0,049    | 0,039    | 0,030    | 0,378    |
|                    |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          | 0,071    |          |
| <b>Erquis</b>      |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          |          |          |
| Qs (m3/s)          | 0,358         | 1,070    | 2,071    | 3,146    | 4,202    | 3,425    | 2,264       | 1,075    | 0,453    | 0,199    | 0,159    | 0,123    | 1,546    |
| Qi (m3/s)          | 0,266         | 0,793    | 1,534    | 2,331    | 3,113    | 2,537    | 1,677       | 0,797    | 0,335    | 0,148    | 0,118    | 0,091    | 1,145    |
| <b>Tipas</b>       |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          |          |          |
| Qs (m3/s)          | 3,134         | 9,357    | 18,110   | 27,513   | 36,745   | 29,950   | 19,793      | 9,403    | 3,959    | 1,741    | 1,393    | 1,080    | 13,515   |
| Qi (m3/s)          | 2,322         | 6,930    | 13,414   | 20,379   | 27,217   | 22,184   | 14,661      | 6,965    | 2,932    | 1,290    | 1,032    | 0,800    | 10,010   |
|                    |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          | 1,879    |          |
| <b>Calderillas</b> |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          |          |          |
| Qs (m3/s)          | 0,130         | 0,389    | 0,753    | 1,145    | 1,529    | 1,246    | 0,824       | 0,391    | 0,165    | 0,072    | 0,058    | 0,045    | 0,562    |
| Qi (m3/s)          | 0,097         | 0,288    | 0,558    | 0,848    | 1,132    | 0,923    | 0,610       | 0,290    | 0,122    | 0,054    | 0,043    | 0,033    | 0,416    |
| q min (m3/s)       |               |          |          |          |          |          |             |          |          |          |          | 0,078    |          |

## MUNICIPIO DE SAN LORENZO

### 7. RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES

#### 7.1 Cuencas hidrográficas y Caudal superficial disponible

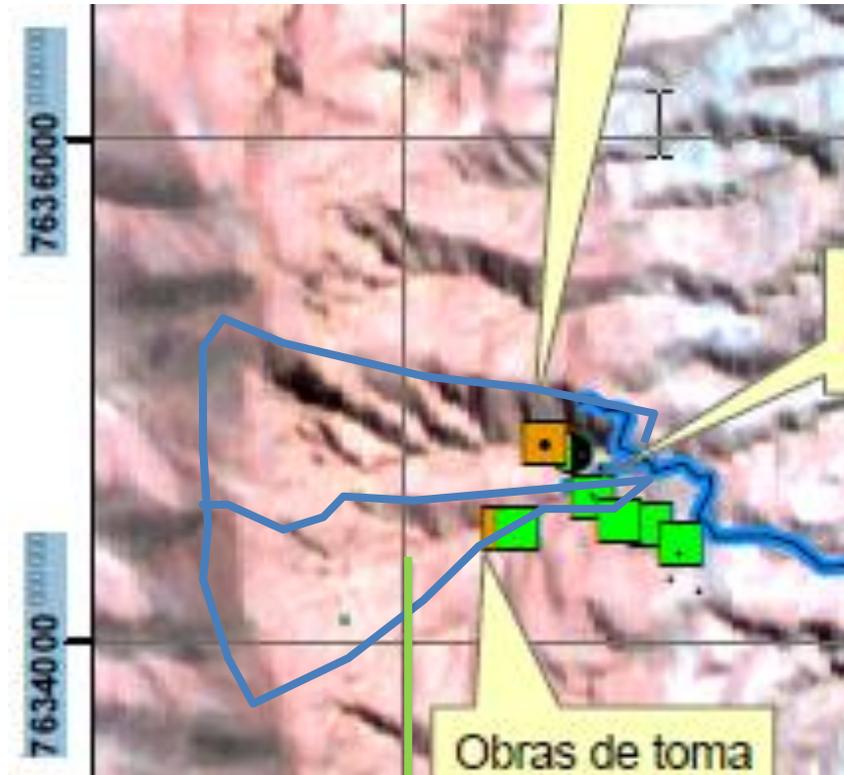
San Lorenzo para el suministro de agua por fuente superficial dispone de los recursos de la Qda Pajchani y de la quebrada La Queñua y de una vertiente Justo Ávila, cuyas características de área son:

Tabla 7.1. Superficie de Cuenca

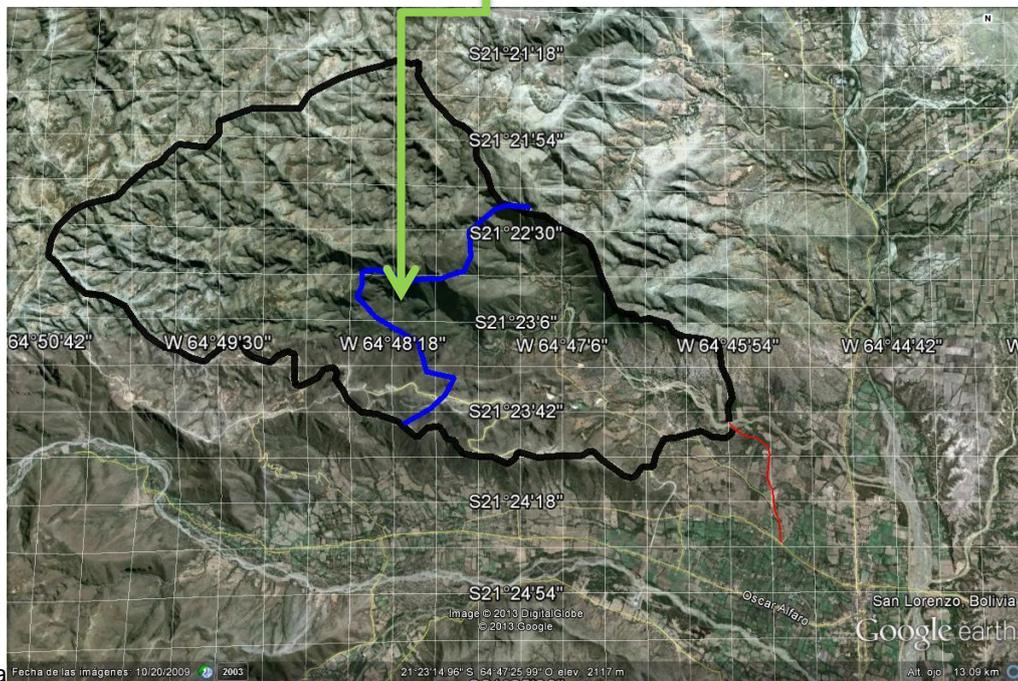
| Municipio   | Fuente                | Tipo de Toma   | Área (km <sup>2</sup> ) |
|-------------|-----------------------|----------------|-------------------------|
| San Lorenzo | La Queñua 1           | Superficial    | 0.59                    |
|             | La Queñua 2           | Superficial    | 0.59                    |
|             | Pajchani              | Subsuperficial | 21.14                   |
|             | Vertiente Justo Ávila | Superficial    | 0.06                    |

Las cuencas de drenaje están próximas las unas de las otras en la Figura 7.1 se muestra la ubicación de ambas respecto a la localidad de San Lorenzo.

Figura 7.1. Cuencas hidrográficas de aprovechamiento actual



Cuenca La Queñua



Cuenca del río Pajchani

La principal fuente de utilización, dispone de agua permanente es la Queñua donde se realizaron aforos en el año 1998 y el 2006 según detalla en la Tabla 7.2

Tabla 7.2. AFOROS- San Lorenzo

| Aforo realizado por:      | Sitio de aforo                      | Q (l/s)  | Fecha      |
|---------------------------|-------------------------------------|----------|------------|
| sub. Prefectura PROHISABA | Unión toma 1y2                      | 11,00    | 05-05-1998 |
| COTA s.r.l                | Toma 1                              | 5,42     | 24-11-1998 |
|                           | Toma 2                              | 0,93     |            |
|                           | Total                               | 6,35     |            |
| COTA s.r.l                | Toma 1                              | 7,10     | 28-12-1998 |
|                           | Toma 2                              | 0,92     |            |
|                           | Total                               | 8,09     |            |
| FICHTNER                  | Toma 1                              | 7.93 l/s | 7/03/06    |
|                           | Toma 2                              | 5.45 l/s |            |
|                           | Ingreso al tanque de almacenamiento | 9.23 l/s |            |

Es una obra que provee agua a San Lorenzo, Canchas Norte y otras comunidades. En la época seca, muchos años no produce la cantidad de agua requerida y se debe apelar a pozos y manantiales

Todo el caudal de diseño esta proporcionado por 2 tomas, con caudales de aporte igual a Q1= 6 l/s y Q2= 1 l/s, mediante una galería filtrante.

Estos valores muestran que en el año 1998 en noviembre, ambas tomas aportan 6.35 l/s que puede ser tomado como un mínimo, luego en ese mismo año sube en diciembre a 8.09 y la medida del año 2006 de 9.23 muestra que concluido el periodo lluvioso se tenga un caudal de 9.23 o 11 l/s como valores que después descenderán al mínimo. Estos aportes principalmente provienen de la infiltración, del flujo subsuperficial, puesto que de norma la precipitación total en los meses del periodo seco llega a cero como muestran los registros del área. Geológicamente, como ocurre en la serranía del Sama, la roca se presenta muy fracturada y ocasiona permeabilidad secundaria.

Existen dos obra de toma ubicadas en la zona denomina falda de la Queñua en la cumbre de la serranía de Sama, muy cerca al túnel en construcción de la carretera fundamental Tarija – Potosí. Consistente en un azud transversal a la quebrada, una cámara recolectora de hormigón ciclópeo con una cubierta de losa de hormigón armado y una rejilla de ingreso del agua. Está a una distancia aproximada de 27 Km. desde San Lorenzo y presenta un desnivel entre la obra de toma y el tanque de almacenamiento de 885 m.

La otra fuente de agua es la quebrada o rio Pajchani que no se procedió a las mediciones y no se dispone de dato del curso de agua, si no únicamente del agua que llega al tanque de servicio en el año 2006 alcanzo a 0.4 l/s habiendo informado el comité de agua de San Lorenzo que en tiempo de lluvias, la obra capta un valor de 4 l/s y en estiaje da 0.25 l/s. Estos valores menores que la Queñua llevan a pensar que la actual galería no está captando un caudal adecuado porque la magnitud de la cuenca es mayor entre ambas y es una zona done los aportes de precipitación son iguales, como se verá luego.

La captación del agua de Pajchani, se realiza a través de una galería filtrante que se encuentra al pie de la Serranía de Sama, está construida de mampostería de piedra y aporta agua a San Lorenzo en los meses de estiaje. No se cuenta con planos. El curso en el sitio en el cual se encuentra la obra de toma, aguas arriba y abajo es compartido por comuneros que aprovechan el agua para riego.

Como se mencionó, en las fuentes superficiales actuales para el abastecimiento de agua para San Lorenzo, no se realizan mediciones o se llevan registros del caudal que escurre en la misma o que circula por la obra de captación, y esporádicamente, cuando se efectúa un diseño de obra de captación, se realizan mediciones, solamente del agua captada y no así del agua que escurre por el sitio de la obra de toma de la fuente superficial.

Estos valores esporádicos de medición, se buscará confirmarlos, a través del presente estudio, para ser utilizados como dato en el estudio del Plan Maestro y analizar el efecto que tendrá sobre ellos el cambio climático.

El estudio, ante la ausencia de información de caudales en el propio curso, utilizará la metodología de la verosimilitud hidrológica aplicando criterios aereales o de similitud con las cuencas próximas a las cuencas de uso actual, que se dispone la región. Sobre la base de la información de precipitación, el balance hidrológico, está dado por la expresión

$$P = E - p$$

Donde P es la precipitación anual (en mm)

E es la escorrentía anual (en mm)

p son las pérdidas debido a la infiltración (i), la Evapotranspiración (Et), el escurrimiento subterráneo, etc. Cuya información es difícil obtener o no existe. De todas ellas la mayor pérdida está en la evapotranspiración como una función de la temperatura

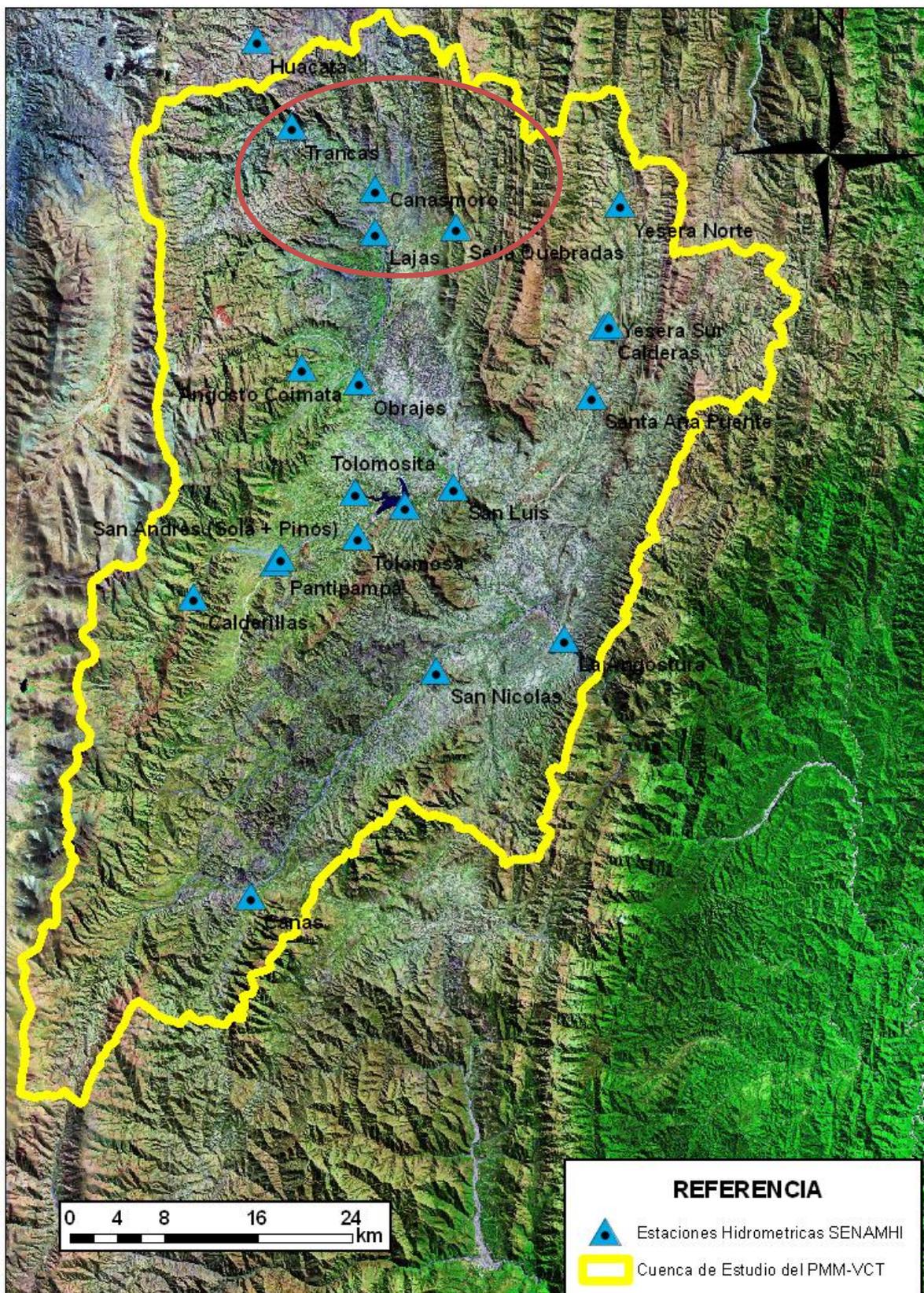
Cuyos valores en el transcurso de los años yendo de año tras año se complementan, cumpliendo la ecuación anterior, y por ello para una determinada probabilidad de ocurrencia de precipitación, también se cumple la ecuación anterior para esa determinada probabilidad de ocurrencia, para una determinada área en la cual las condiciones de precipitación y aquellas de clima, vegetación, uso del suelo, etc., son similares.

Las estaciones hidrométricas que se tienen en la cuenca de Río grande de Tarija, sobre algunos cursos principales del drenaje del valle central de Tarija y sobre todo del río Guadalquivir, hasta la Angostura, se muestran en la Figura 7.2 y sus registros en la Tabla 7.3 mientras que la precipitación tiene información que aparece en la Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

### Figura 7.3

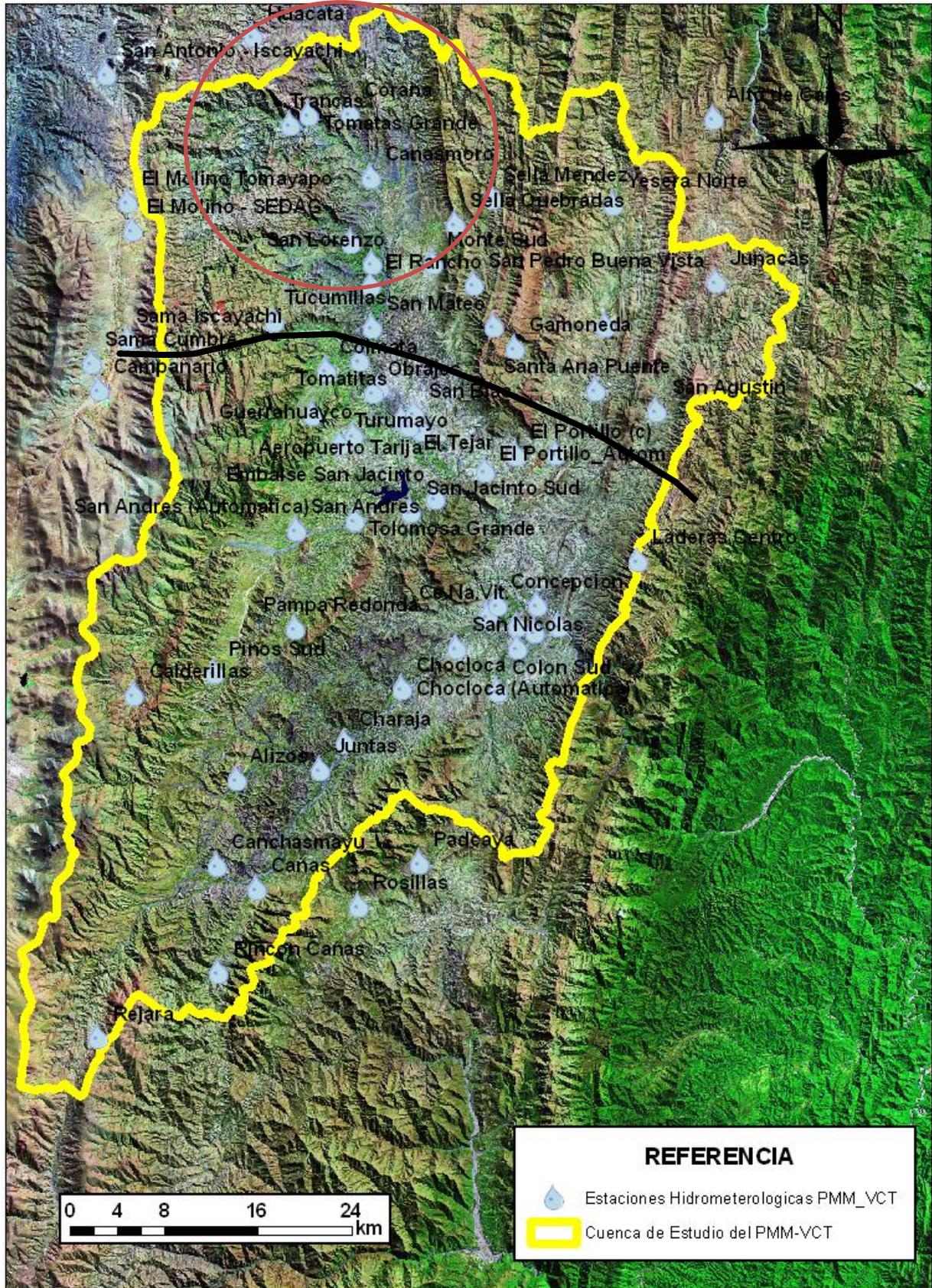
La información son registros del SENAMHI. A continuación se presentan los mapas de las estaciones hidrométricas e hidrometeorológicas que han operado y se mantiene en operación por el SENAMHI en los cuales se ha procedido a encerrar en una línea roja el área del estudio:

Figura 7.2. Estaciones Hidrométricas del Valle Central de Tarija



Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

Figura 7.3. Estaciones Hidrometeorológicas del Valle Central de Tarija



Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

Si bien existen registros de 20 estaciones hidrométricas en el área del valle en la cual se aplicará la verosimilitud, en la propia cuenca se dispone de cuatro estaciones hidrométricas (Trancas, Canasmoro, Sella, y Lajas) y de 11 pluviométricas (Trancas, Corama, Canasmoro, Tomayapo, Tomatas Grande, San Lorenzo, Monte sud, Sella, Tucumillas, el rancho, San Mateo)

La información hidrometeorológica, con la cual se cuenta no es continua y está presente en diversos periodos de tiempo, y para el valle de Tarija en 14 de ellas se realizan mediciones eventuales como se detalla en el Cuadro HSL-3, y únicamente en cuatro de forma continua, generalmente durante la época de aguas bajas y solamente en algunos años. En la zona del proyecto dos (Canasmoro y Sella disponen de registro continuo)

Las estaciones hidrométricas que se encuentran en la región de Tarija son:

Tabla 7.3. Estaciones Hidrométricas de la Cuenca del Valle Central de Tarija

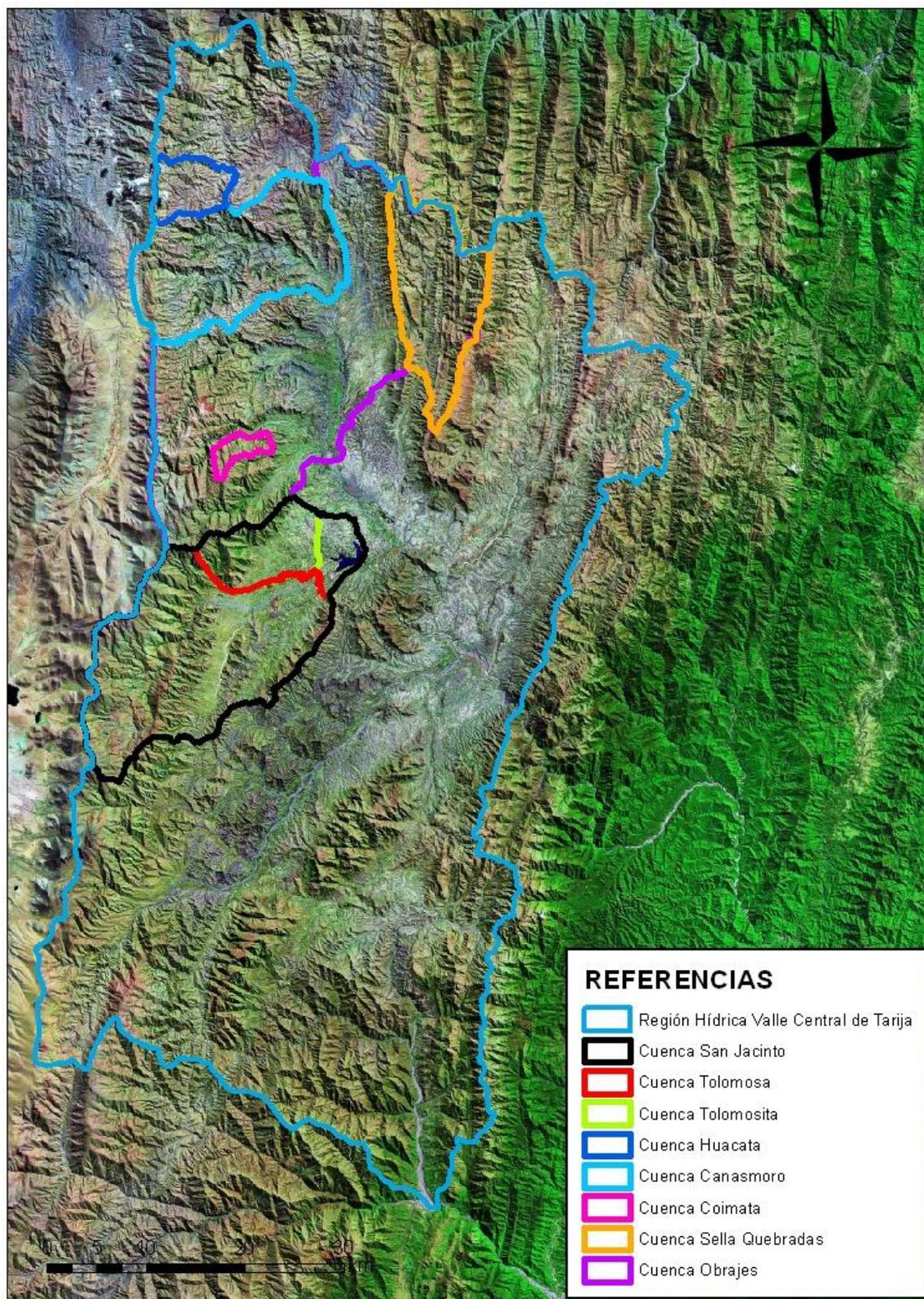
| Estación                  | Departamento | Provincia | Tipo | Latitud <sup>9</sup> | Longitud <sup>6</sup> | Altitud | Cuenca       | Área(km <sup>2</sup> ) | Medición |
|---------------------------|--------------|-----------|------|----------------------|-----------------------|---------|--------------|------------------------|----------|
| Yesera Norte              | Tarija       | Cercado   | A    | 21°22'12.93"S        | 64°32'51.15"O         |         | Santa Ana    | 55.11                  | Eventual |
| Yesera Sur                | Tarija       | Cercado   | A    | 21°27'47.84"S        | 64°33'27.87"O         | 2092    | Santa Ana    | 155.76                 | Eventual |
| Calderas                  | Tarija       | Cercado   | A    | 21°27'54.83"S        | 64°33'41.10"O         | 2085    | Santa Ana    | 41.4                   | Eventual |
| Santa Ana Puente          | Tarija       | Cercado   | A    | 21°31'7.20"S         | 64°34'19.87"O         |         | Santa Ana    | 252.79                 | Eventual |
| Calderillas               | Tarija       | Cercado   | E    | 21°40'15.70"S        | 64°54'5.47"O          |         | Tolomosa     | 108.86                 | Eventual |
| San Andrés (Sola)         | Tarija       | Cercado   | A    | 21°40'15.70"S        | 64°54'5.47"O          |         | Tolomosa     | 168.39                 | Eventual |
| Pantipampa                | Tarija       | Cercado   | A    | 21°38'41.33"S        | 64°49'58.16"O         |         | Tolomosa     | 82.98                  | Eventual |
| San Andrés (Sola + Pinos) | Tarija       | Cercado   | A    | 21°38'30.11"S        | 64°49'45.42"O         |         | Tolomosa     | 251.37                 | Eventual |
| Tolomosita                | Tarija       | Cercado   | A    | 21°35'30.42"S        | 64°46'0.92"O          | 1913    | Tolomosa     | 73.96                  | Continua |
| Tolomosa                  | Tarija       | Cercado   | A    | 21°35'30.42"S        | 64°46'0.92"O          | 1913    | Tolomosa     | 336.02                 | Continua |
| San Jacinto               | Tarija       | Cercado   | A    | 21°36'8.04"S         | 64°43'35.86"O         |         | Tolomosa     | 438.26                 | Continua |
| Cañas                     | Tarija       | Arce      | A    | 21°54'14.51"S        | 64°51'27.02"O         |         | Camacho      | 72.91                  | Eventual |
| San Nicolás               | Tarija       | Avilés    | A    | 21°43'50.82"S        | 64°42'7.10"O          | 1800    | Camacho      | 751.37                 | Eventual |
| Angosto Coimata           | Tarija       | Cercado   | E    | 21°29'41.21"S        | 64°48'36.28"O         |         | Guadalquivir | 13.14                  | Continua |
| Trancas                   | Tarija       | MéndeZ    | A    | 21°18'26.35"S        | 64°48'58.06"O         |         | Guadalquivir | 131.64                 | Eventual |
| Canasmoro                 | Tarija       | MéndeZ    | A    | 21°21'23.13"S        | 64°44'52.90"O         | 2085    | Guadalquivir | 234.09                 | Continua |
| Lajas                     | Tarija       | Cercado   | E    | 21°23'22.85"S        | 64°44'53.10"O         |         | Guadalquivir | 335.7                  | Eventual |
| Sella Quebradas           | Tarija       | MéndeZ    | A    | 21°23'12.03"S        | 64°40'55.02"O         | 2119    | Guadalquivir | 147.26                 | Continua |
| Obrajes                   | Tarija       | Cercado   | A    | 21°30'20.52"S        | 64°45'45.62"O         | 1922    | Guadalquivir | 909.28                 | Continua |
| San Luis                  | Tarija       | Cercado   | A    | 21°35'17.66"S        | 64°41'10.95"O         |         | Guadalquivir | 1538.68                | Eventual |
| La Angostura              | Tarija       | Cercado   | A    | 21°42'24.29"S        | 64°35'46.89"O         |         | Guadalquivir | 3249.03                | Eventual |
| Huacata                   | Tarija       | MéndeZ    | A    | 21°14'24.36"S        | 64°50'37.73"O         | 2356    | Pilaya       | 41.26                  | Continua |

Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

Las estaciones hidrométricas que poseen un registro continuo, de tal manera que permiten inferir estadísticos son las que se representan en la siguiente Figura 7.4 que indica que es posible tomar información de la estación de Canasmoro:

<sup>9</sup> Coordenadas obtenidas en coordinación con el personal técnico del SENAMHI y el apoyo del software Google Earth, 2012

Figura 7.4. Cuencas de las Estaciones Hidrométricas Del Valle Central de Tarija con registro continuo



Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

Los valores de precipitación total anual, han sido analizados mediante procesamiento estadístico y los valores anuales de cada estación y los valores característicos, según la distribución normal de probabilidad, se encuentran en la y en el A02 apéndice 5.1

Tabla 7.4. Valores característicos de precipitación

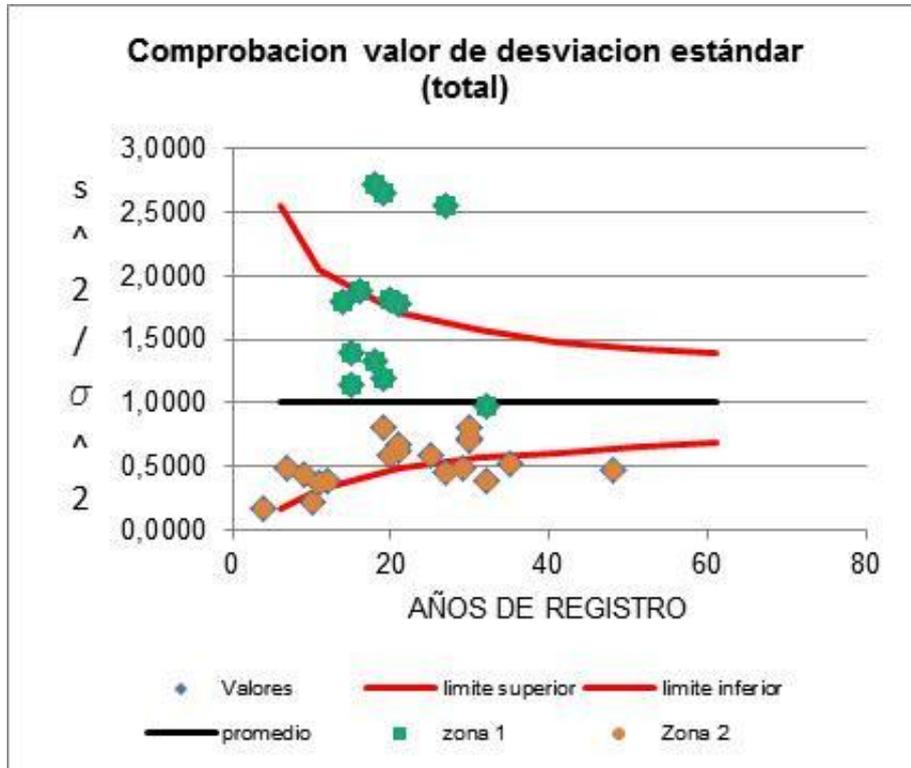
| VALORES CARACTERISTICOS DE PRECIPITACION ANUAL |          |          |        |                 |                 |                     |               |                    |                          |
|--|----------|----------|--------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------|--------------------|--------------------------|
| Estacion                                       | Latitud  | Longitud | Altura | Numero de datos | Promedio        | Desviacion standard | M log x       | $\sigma$ (log x )2 | $\sigma$ (log x )2/ prom |
| <b>zona 1</b>                                  |          |          |        |                 |                 |                     |               |                    |                          |
| Leon Cancha                                    | -21,1783 | 64,7153  | 2729   | 20              | 522,0           | 188,8220            | 2,6892        | 0,0247             | 1,8035                   |
| Tomayapo                                       | -21,2683 | 65,0450  | 2734   | 16              | 233,9           | 86,2068             | 2,3394        | 0,0256             | 1,8730                   |
| El Molino                                      | -21,3886 | 64,9469  | 3387   | 14              | 465,6           | 168,2451            | 2,6397        | 0,0246             | 1,7997                   |
| Tucumillas                                     | -21,4611 | 64,8311  | 2557   | 19              | 790,2           | 346,7881            | 2,8559        | 0,0363             | 2,6547                   |
| San Andres                                     | -21,6233 | 64,8150  | 1987   | 32              | 987,6           | 262,6494            | 2,9792        | 0,0133             | 0,9749                   |
| Junacas  |          |          |        | 21              | 511,6           | 183,3326            | 2,6810        | 0,0242             | 1,7702                   |
| Gamoneda                                       |          |          |        | 19              | 487,0           | 143,1020            | 2,6688        | 0,0163             | 1,1901                   |
| La angostura                                   |          |          |        | 15              | 339,3           | 97,8411             | 2,5125        | 0,0157             | 1,1460                   |
| Colon Sud                                      |          |          |        | 15              | 367,2           | 116,5176            | 2,5430        | 0,0190             | 1,3880                   |
| Sama   |          |          |        | 18              | 749,4           | 231,6180            | 2,8540        | 0,0180             | 1,3167                   |
| Cejara   |          |          |        | 18              | 1121,2          | 498,2027            | 3,0068        | 0,0372             | 2,7212                   |
| Guandacay                                      |          |          |        | 27              | 1057,5          | 455,6327            | 2,9840        | 0,0350             | 2,5587                   |
| <b>zona 2</b>                                  |          |          |        |                 |                 |                     |               |                    |                          |
| Yesera   | -21,3722 | 64,5508  | 1978   | 21              | 686,0           | 145,5538            | 2,8266        | 0,0085             | 0,6204                   |
| Trancas  | -21,3081 | 64,8158  | 2198   | 11              | 778,5           | 126,1293            | 2,8856        | 0,0050             | 0,3618                   |
| Qda. Sellas                                    | -21,3864 | 64,6811  | 2145   | 10              | 616,4           | 77,1455             | 2,7864        | 0,0030             | 0,2159                   |
| Coimata  | -21,4992 | 64,7889  | 2027   | 20              | 713,7           | 147,6553            | 2,8442        | 0,0081             | 0,5900                   |
| Padcaya  | -21,5300 | 64,4300  | 2010   | 30              | 610,1           | 137,1938            | 2,7744        | 0,0095             | 0,6970                   |
| Tarija   | -21,5467 | 64,7108  | 1849   | 48              | 596,2           | 109,0100            | 2,7681        | 0,0063             | 0,4608                   |
| El Tejar                                       | -21,5431 | 64,7211  | 1851   | 29              | 608,8           | 114,7257            | 2,7768        | 0,0067             | 0,4895                   |
| Sn Jacinto sud                                 | -21,6303 | 64,7200  | 1820   | 35              | 543,0           | 104,7993            | 2,7267        | 0,0070             | 0,5135                   |
| Pinos Sud                                      | -21,7347 | 64,8783  | 2118   | 32              | 1150,9          | 192,6704            | 3,0549        | 0,0053             | 0,3863                   |
| Chococla                                       | -21,7481 | 64,7294  | 1795   | 27              | 637,6           | 115,7480            | 2,7974        | 0,0062             | 0,4543                   |
| Juntas   | -21,8103 | 64,7975  | 1882   | 25              | 678,1           | 138,8657            | 2,8222        | 0,0079             | 0,5781                   |
| Cañas  | -21,9022 | 64,8508  | 2078   | 30              | 621,4           | 149,5876            | 2,7808        | 0,0109             | 0,7987                   |
| Sn Jacinto embalse                             |          |          |        | 4               | 498,0           | 55,2516             | 2,6945        | 0,0023             | 0,1697                   |
| Concepcion                                     |          |          |        | 9               | 437,3           | 77,1047             | 2,6341        | 0,0059             | 0,4284                   |
| Sn Ncolas                                      |          |          |        | 12              | 488,0           | 80,5727             | 2,6825        | 0,0051             | 0,3758                   |
| Calderillas                                    |          |          |        | 30              | 1234,3          | 282,9806            | 3,0800        | 0,0099             | 0,7244                   |
| Laderas Centro                                 |          |          |        | 19              | 375,9           | 90,2851             | 2,5625        | 0,0109             | 0,7953                   |
| Canas Moro                                     |          |          |        | 21              | 615,2           | 134,7748            | 2,7786        | 0,0091             | 0,6614                   |
| Campanario                                     |          |          |        | 7               | 353,8           | 66,1827             | 2,5412        | 0,0066             | 0,4822                   |
| Promedio                                       |          |          |        |                 | <b>641,1367</b> | <b>165,3289</b>     | <b>2,7603</b> | <b>0,0137</b>      | <b>1,0000</b>            |

Con los valores de la desviación estándar al cuadrado del logaritmo de la precipitación anual y aplicando el test del chiquadro ( $\chi^2$ , para n grados de libertad), se puede verificar que existe una zona (denominada 1) que se encuentra en la parte superior de la cuenca y dispone de una variación de probabilidades de ocurrencia grande (valor de desviación estándar elevado), mientras que en el resto del valle, la diferencia o dispersión de los valores es menor (zona 2).

Estas dos zonas se muestran en la Figura 7.3, la zona 1 abarca la parte alta de la cuenca del Guadalquivir hasta la serranía del sama, mientras que la zona 2, es la parte baja pasando Padcaya.

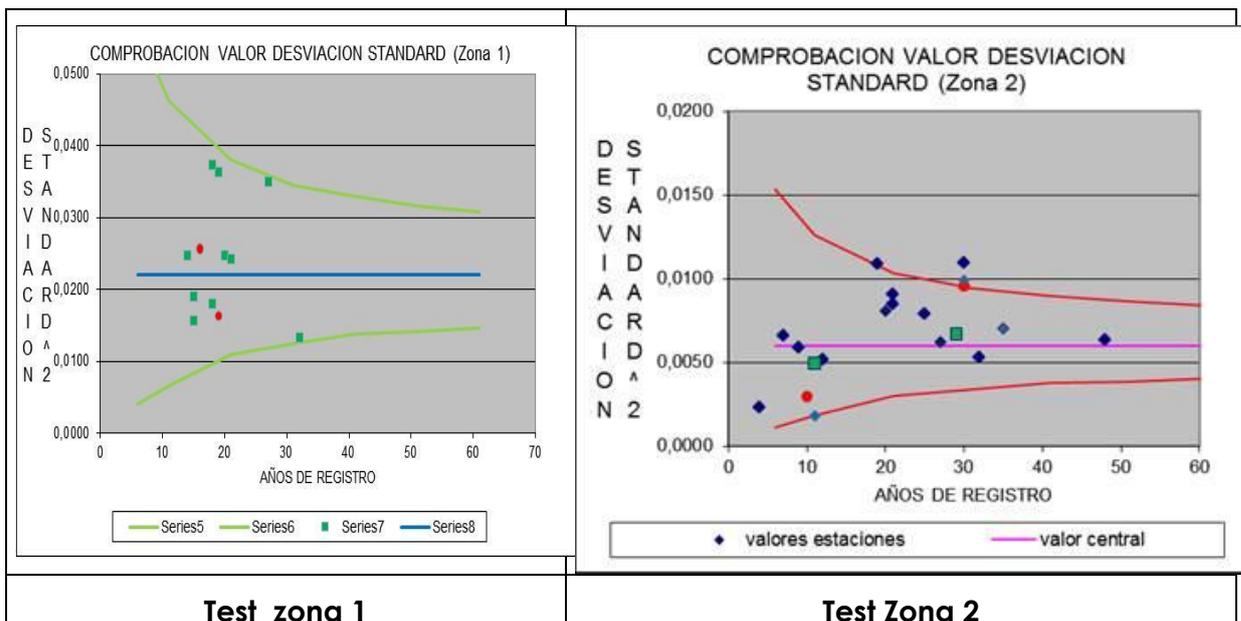
La determinación de las zonas se efectuó con el cálculo de la desviación estándar elevada a dos y el valor del chiquadro sobre un diagrama de representación del par de valores de  $s^2 - n$ , donde n es el número de años de registro. La relación se presenta en la Figura 7.5.

Figura 7.5. Variabilidad de la desviación Standard de Precipitación (total)



El valor "s" corresponde a la desviación estándar de los logaritmos de los valores registrados de precipitación anual en la estación i, mientras que  $\sigma \varepsilon$  corresponde al valor tomado como representativo de la población de los logaritmos de la precipitación anual en toda la región, en este caso el promedio de todos los  $s(\log P)^2$ . En la gráfica se muestra unos valores altos, sobre 0.020 (color verde) y otros con valores menores a 0.008 (color rojo) que se agrupan. Estas series de valores han sido representados en un diagrama similar para cada zona como se muestra en la Figura 7.6

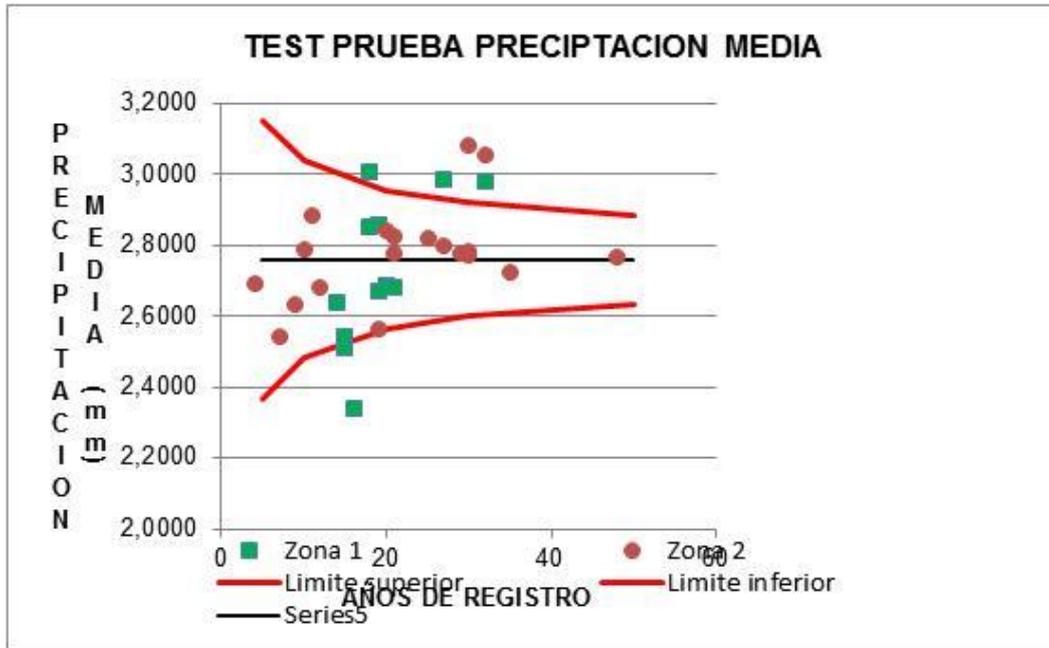
Figura 7.6. Variabilidad de la desviación Standard de Precipitación (zona 1 y 2)



En el test de ambas zonas, se muestra que los valores de cada estación recaen, en general, en el interno de las franjas de control, establecidas para un probabilidad de no ocurrencia del 5 %. Para la zona 1 el valor central de la desviación es de 0.1483 y en la zona 2, es 0.0806. El valor de desviación estándar representa la inclinación de la recta de probabilidad que en este caso será mayor en la zona 1 y pequeña en la zona 2.

El **valor medio de la precipitación**, tomando todos los valores de los pluviómetros muestra que no se tiene un comportamiento homogéneo y en el cual la variación solo se deba a defecto de muestreo o a un cambio climático, como se aprecia en la figura HSL 7,

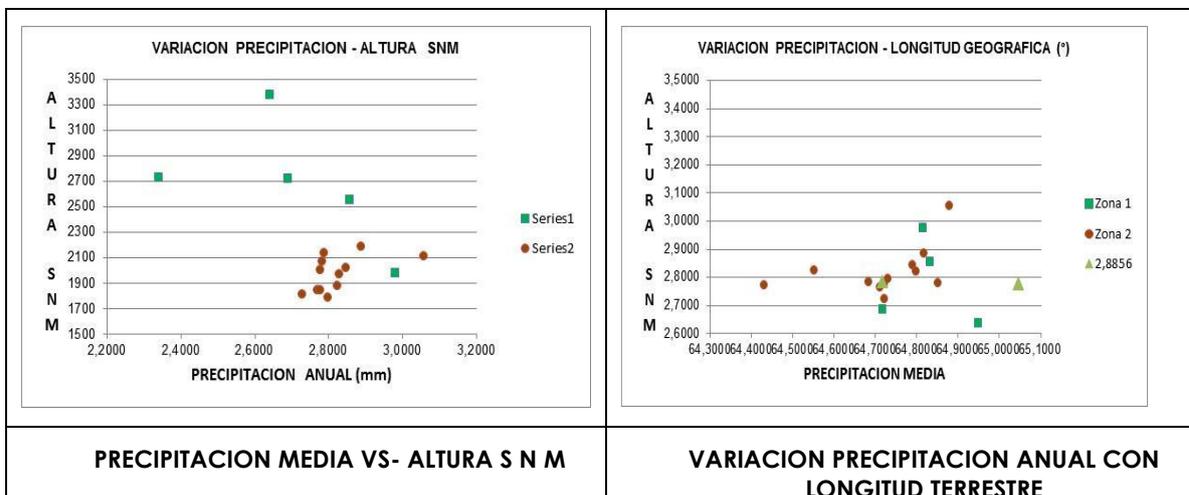
Figura 7.7. Variabilidad de la Precipitación media (Total)



En general se podría aceptar un único valor representativo del logaritmo de la precipitación para toda la región, porque los distintos valores de la  $M(\log P)$  están mezclados sin tendencia alguna y los que salen de la franja de control para una probabilidad del 95 % y por qué, 7 de las 27 estaciones salen de ella.

Para estar seguros, se ha dispuesto efectuar otra prueba y es la variación de la precipitación con la altura sobre el nivel del mar y en segunda instancia la variación con la longitud terrestre. La representación se muestra en la Figura 7.8.

Figura 7.8. Variabilidad de la Precipitación media (Zona 1 y Zona 2)



De la Figura 7.8 se puede establecer que mientras en la zona 2, no tiene efecto la altura sobre el nivel del mar en la primera Zona parece que a medida que se asciende en cota sobre el nivel del mar, la precipitación disminuye. Y mientras que en zona 1 y 2, no tiene influencia la ubicación geográfica. Por ello es importante considerar para cada sitio de obra su localización y de la propia cuenca con lo cual se podrá estimar la precipitación media y de ella deducir los caudales tomando una distribución de ellas en las diferentes estaciones de medida.

En el caso de las cuencas de aporte para San Lorenzo, los valores Registrados en el conjunto de estaciones próximas a las cuencas muestran que a medida que se asciende en cota disminuye el valor de  $M(\log P)$  adoptando un valor de 2.61 de acuerdo a la figura HSL -6 que significa en la distribución normal de probabilidades una precipitación media de 433 mm, y para la cuenca de La Queñua tiene un valor medio de 2.56 y su precipitación media es de 386 mm son tomados en cuenta para las apreciaciones a realizar sobre caudal.

Existen diversos modelos hidrológicos que fueron empleados regionalmente, y que permiten realizar la transformación lluvia-caudal, para obtener valores de los caudales medios mensuales, entre los cuales se pueden mencionar:

- Modelo del PRONAR.- El modelo es relativamente sencillo, de pocos parámetros, definido a través de la fórmula  $V_{esc_m} = (P_m - 15) * 0.75 * C * A$ , en donde A es el área de la cuenca en  $km^2$ , C es el coeficiente de escorrentía anual adimensional,  $P_m$  es la precipitación media mensual en m, y  $V_{esc_m}$  es el volumen de escorrentía media mensual en  $Hm^3$ . La desventaja del modelo es que produce valores bajos del caudal medio mensual durante el periodo de estiaje.
- Modelo del Coeficiente de Escurrimiento Anual<sup>10</sup>.- Es el modelo empleado en el estudio "Recursos Hídricos Superficiales y sus Posibilidades de Aprovechamiento en el Departamento de Tarija". El modelo se basa en la calibración de ecuaciones regionales basadas en parámetros hidrológicos de las cuencas de análisis, para su posterior aplicación en las cuencas donde se requiere determinar los valores de los caudales medios mensuales, considerando los coeficientes de distribución mensual regionalizados. Éste modelo es relativamente sencillo y es el más versátil en la determinación de los caudales medios mensuales, por lo que se empleará en esta oportunidad, debido a que proporciona una plataforma para la estimación de caudales medios mensuales considerando el desarrollo de escenarios afectados por el cambio climático.

El nivel de análisis requerido es mensual, para poder determinar los valores de la época de estiaje y época húmeda, es por ello que se realizó primeramente un análisis del modelo a ser empleado para determinar los caudales medios anuales y con apropiada relación proceder a encontrar los caudales medios mensuales, para luego deducir los caudales mínimos que se espera podrán presentarse con una probabilidad asignada del 95 % por lo menos una vez en un periodo de retorno de 20 años. Por otra parte con criterio de análisis de cambio climático definir valores que podrán presentarse en un escenario pesimista.<sup>11</sup>

### **Generación de caudales medios anuales y mensuales**

Con los valores de las precipitaciones medias anuales de las estaciones pluviométricas, de la manera obtenida en los párrafos anteriores se puede establecer la variación de la precipitación media mensual, considerando que se tiene dos Zonas de precipitación y que en el caso de las cuencas actuales influyen ambas

Con los valores registrados en las estaciones hidrométricas de toda la región y la determinación de la precipitación media areal de la cuenca, la misma que será delimitada en el punto de desembocadura coincidente con la ubicación de la estación hidrométrica, se determinaron los parámetros siguientes:

<sup>10</sup> Recursos Hídricos Superficiales y sus Posibilidades de Aprovechamiento en el Departamento de Tarija, 2008. Alfonso Vacaflores.

<sup>11</sup> Según la Primera Comunicación Nacional ante la Convención de Cambio Climático (2000), el cambio para el escenario pesimista es el IS92E para lo cual la precipitación tiene una variación porcentual de -19 % en los meses secos y de -13% en los meses húmedos

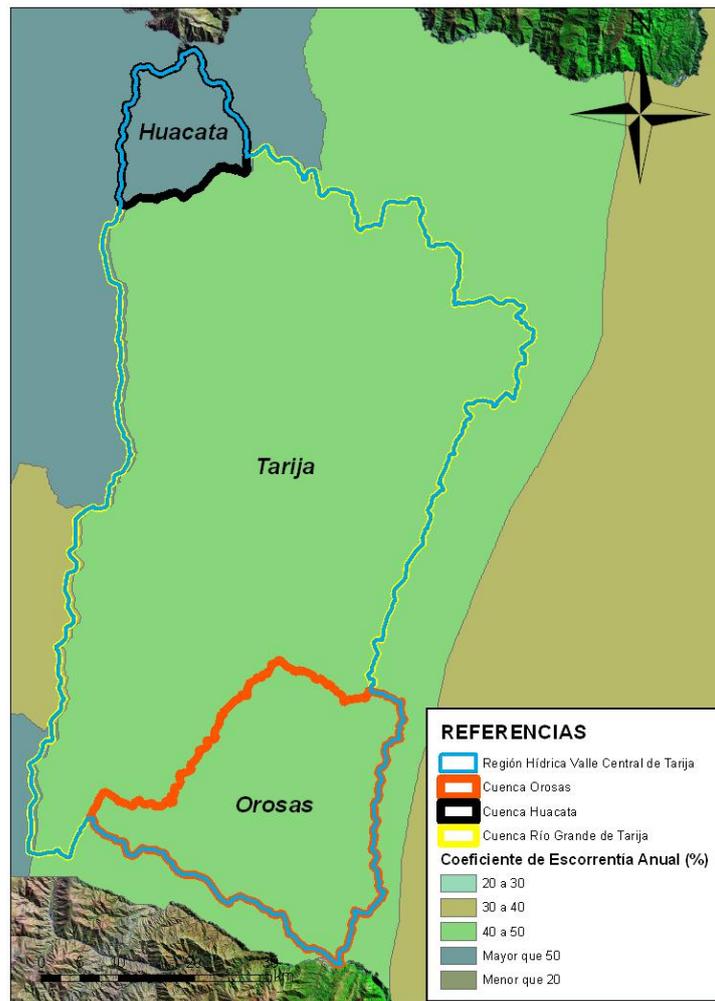
Tabla 7.5. Parámetros hidrológicos de las cuencas delimitadas en el sitio de ubicación de las Estaciones Hidrométricas de Registro Continuo

| Estación        | Coefficiente de Escorrentía Anual | Área (km <sup>2</sup> ) | Caudal medio anual (m <sup>3</sup> /s) | Precipitación (mm) | Caudal específico (l/s/km <sup>2</sup> ) |
|-----------------|-----------------------------------|-------------------------|--|--------------------|--|
| Tolomosa        | 0.337                             | 336.020                 | 3.672                                  | 1022.7             | 10.927                                   |
| Tolomosita      | 0.415                             | 73.960                  | 0.966                                  | 992.6              | 13.059                                   |
| San Jacinto     | 0.509                             | 438.260                 | 6.703                                  | 948.1              | 15.294                                   |
| Coimata         | 0.350                             | 13.140                  | 0.117                                  | 798.2              | 8.901                                    |
| Canasmoro       | 0.287                             | 234.090                 | 1.503                                  | 706.5              | 6.422                                    |
| Sella Quebradas | 0.187                             | 147.260                 | 0.530                                  | 605.1              | 3.597                                    |
| Obrajes         | 0.254                             | 909.280                 | 5.048                                  | 687.9              | 5.551                                    |
| Huacata         | 0.289                             | 41.260                  | 0.321                                  | 849.4              | 7.782                                    |

Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

Un mapa que corresponde al PRONAR expone rangos de valores aproximados del Coeficiente de Escorrentía Anual (CEA) para zonas de análisis amplias en su extensión, y es así que las cuencas de la región del proyecto, está contenida en una franja que establece valores del CEA comprendidos entre 40 y 50 %. El mapa de referencia se presenta a continuación:

Figura 7.9. Coeficiente de Escorrentía Anual PRONAR

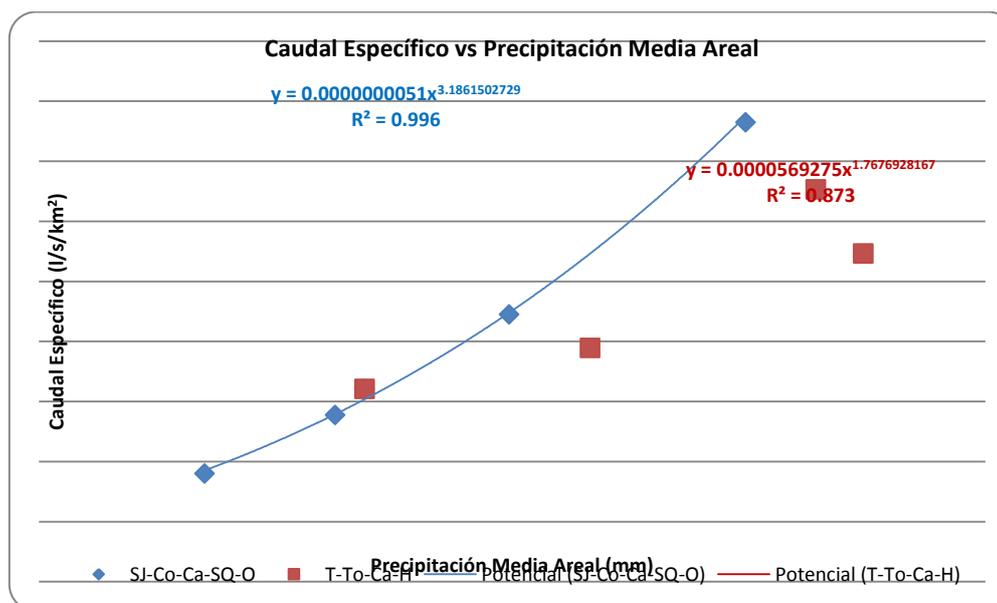


Fuente: Elaboración propia en base a información del PRONAR (2001)

Es evidente que los valores son referenciales y que para los fines del alcance de este estudio, únicamente nos sirve para comparar que el 50 % de los valores estimados y presentados en la anterior tabla, se acercan al valor propuesto por el PRONAR, y es por las condiciones locales de las cuencas que ese valor para algunos casos como ser la cuenca Sella Quebradas se encuentra bastante alejada del rango PRONAR debido principalmente a las escalas de trabajo para su determinación.

Al observar la correlación entre la precipitación media areal y el caudal específico, es evidente la presencia de dos zonas que poseen un comportamiento diferenciado por las condiciones regionales, y se puede:

Figura 7.10. Función de correlación entre Precipitación Media Areal y el Caudal Específico



Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (SJ: San Jacinto, Co: Coimata, Ca: Canasmoro, SQ: Sella Quebradas, O: Obrajes, T: Tolomosa, To: Tolomosita, H: Huacata) (Periodo de registro variable)

Al observar el mapa de las cuencas que corresponden con las estaciones hidrométricas de registro continuo, y considerando la correlación anteriormente descrita, se observa que las zonas estarían comprendidas, la primera en la franja nor-oeste del área de estudio para el caso de la correlación Potencial (T-To-Ca-H) y la segunda en la franja centro-nor-oeste del área de estudio para el caso de la correlación Potencial (SJ-Co-Ca-SQ-O), la primera restringida a cuencas de las más propias nacientes y relativamente más pequeña área de aporte, y la segunda para cuencas de un tamaño más significativo .

Si bien el anterior gráfico nos permite encontrar el caudal específico de una cuenca, conocido el valor de la precipitación media areal, es necesario luego distribuir el caudal medio anual en los diferentes meses del año.

Para ello, se procede a analizar la distribución media mensual del volumen de escurrimiento medio anual, que está directamente relacionado con la distribución media mensual de los caudales que escurren en las estaciones hidrométricas.

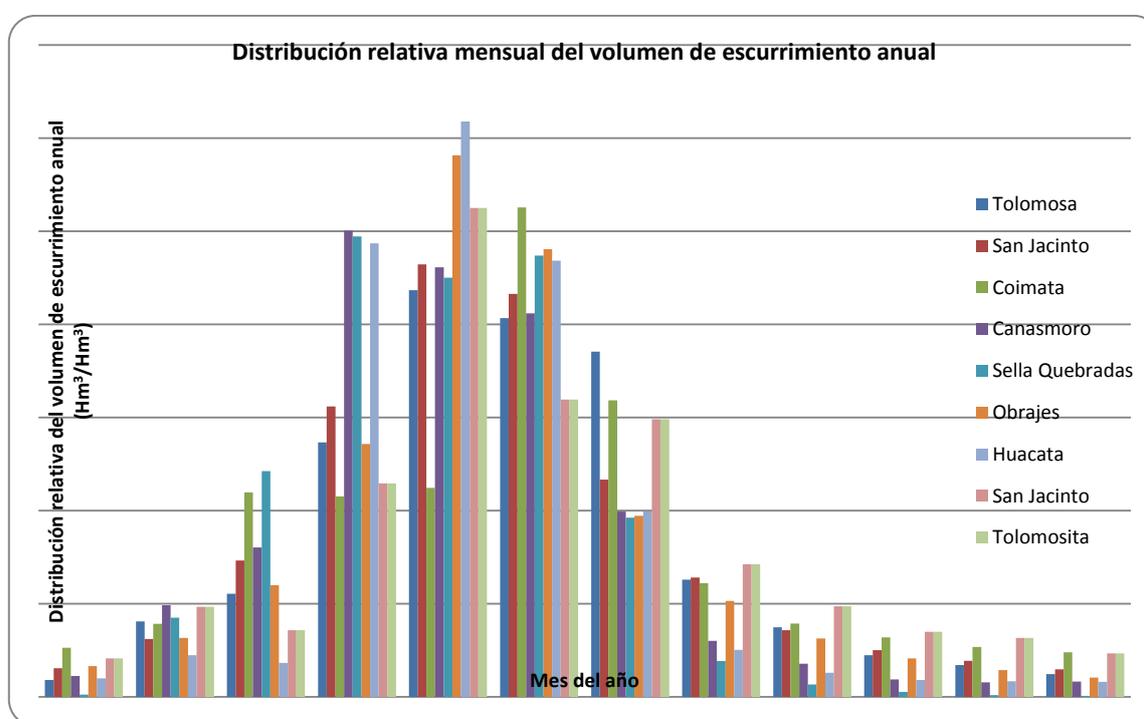
En el siguiente gráfico se puede observar un comportamiento regional de la distribución de caudales medios, independiente de la magnitud del caudal que escurre y del área de la cuenca y se lo ha expresado como valor de relación del volumen mensual al volumen total que se midió en la estación, sobre la escurrentía media de la cuenca en la cual existen datos como se muestra en la Tabla 7.6 y en la Figura 7.11.

Tabla 7.6. Coeficiente de distribución media mensual del volumen de escurrimiento medio anual

| Estación        | Volumen Relativo de Escurrimiento Medio Mensual (Hm <sup>3</sup> /Hm <sup>3</sup> ) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | Total |
|-----------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 | Oct   | Nov   | Dic   | Ene   | Feb   | Mar   | Abr   | May   | Jun   | Jul   | Ago   | Sep   |       |
| Tolomosa        | 0.009   | 0.040 | 0.055 | 0.137 | 0.218 | 0.203 | 0.185 | 0.063 | 0.037 | 0.022 | 0.017 | 0.012 | 1.000 |
| Tolomosita      | 0.021   | 0.048 | 0.036 | 0.115 | 0.262 | 0.160 | 0.149 | 0.071 | 0.049 | 0.035 | 0.032 | 0.023 | 1.000 |
| San Jacinto     | 0.015   | 0.031 | 0.073 | 0.156 | 0.232 | 0.216 | 0.117 | 0.064 | 0.036 | 0.025 | 0.019 | 0.015 | 1.000 |
| Coimata         | 0.026   | 0.039 | 0.110 | 0.108 | 0.112 | 0.263 | 0.159 | 0.061 | 0.039 | 0.032 | 0.027 | 0.024 | 1.000 |
| Canasmoro       | 0.011   | 0.049 | 0.080 | 0.250 | 0.231 | 0.206 | 0.099 | 0.030 | 0.018 | 0.009 | 0.008 | 0.008 | 1.000 |
| Sella Quebradas | 0.001   | 0.042 | 0.121 | 0.247 | 0.225 | 0.237 | 0.096 | 0.019 | 0.007 | 0.003 | 0.001 | 0.000 | 1.000 |
| Obrajes         | 0.016   | 0.032 | 0.060 | 0.136 | 0.291 | 0.240 | 0.097 | 0.052 | 0.031 | 0.021 | 0.014 | 0.010 | 1.000 |
| Huacata         | 0.010   | 0.022 | 0.018 | 0.243 | 0.309 | 0.234 | 0.100 | 0.025 | 0.013 | 0.009 | 0.008 | 0.008 | 1.000 |

Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

Figura 7.11. Distribución relativa media mensual del volumen de escurrimiento anual

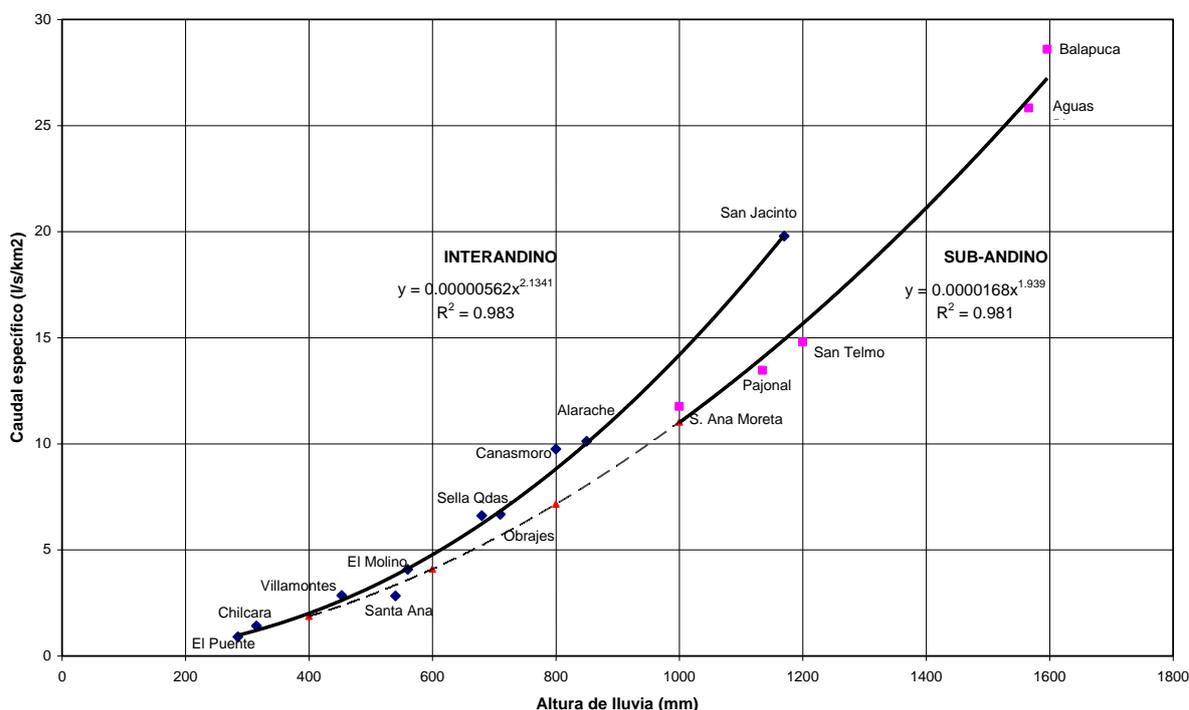


Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

La metodología empleada en este informe para la obtención de caudales medios mensuales en las cuencas de las fuentes superficiales actuales, en esta oportunidad permitió ajustar las curvas de correlación de caudales específicos y la precipitación media anual areal de las cuencas. Pues en el informe “Recursos Hídricos Superficiales y sus Posibilidades de Aprovechamiento en el Departamento de Tarija” (2008), existen dos curvas de correlación, en la que una de ellas coincide en la dependencia funcional de los caudales específicos y precipitaciones medias anuales areales de las cuencas delimitadas en el sitio de ubicación de las estaciones hidrométricas de Canasmoro, Sella Quebradas, Obrajes y San Jacinto, con ecuaciones similares de las curvas de ajuste. En esta oportunidad también se encontró otra curva de correlación, que describe el comportamiento de las cuencas que tienen sus nacientes en la cadena de Sama y de la zona nor-oeste de la cuenca, de sur a norte.

En la siguiente figura, se muestra la curva de correlación encontrada en el informe de referencia, del párrafo precedente.

Figura 7.12. Correlación de caudales específicos medios anuales en relación a la precipitación media anual areal



Fuente: Recursos Hídricos Superficiales y sus Posibilidades de Aprovechamiento en el Departamento de Tarija (2008)

Cerca de las cuencas de provisión de agua para San Lorenzo se tienen cuatro estaciones hidrométricas,, siendo continua en medición la de Canasmoro y Sella Quebradas. Ver Figura 7.3. Las estaciones son:

Tabla 7.7. Estaciones hidrométricas cercanas a las cuencas de uso actual

| Estación        | Departamento | Provincia | Tipo | Latitud <sup>[1]</sup> | Longitud <sup>6</sup> | Altitud | Cuenca       | Área(km <sup>2</sup> ) | Medición |
|-----------------|--------------|-----------|------|------------------------|-----------------------|---------|--------------|------------------------|----------|
| Trancas         | Tarija       | Méndez    | A    | 21°18'26.35"S          | 64°48'58.06"O         |         | Guadalquivir | 131.64                 | Eventual |
| Canasmoro       | Tarija       | Méndez    | A    | 21°21'23.13"S          | 64°44'52.90"O         | 2085    | Guadalquivir | 234.09                 | Continua |
| Lajas           | Tarija       | Cercado   | E    | 21°23'22.85"S          | 64°44'53.10"O         |         | Guadalquivir | 335.7                  | Eventual |
| Sella Quebradas | Tarija       | Méndez    | A    | 21°23'12.03"S          | 64°40'55.02"O         | 2119    | Guadalquivir | 147.26                 | Continua |

Con los valores estimados en la Tabla 7.6 y la figura HSL 13, se procedió a calcular los caudales medios anuales de las cuencas de aporte de las fuentes de agua potable en los sitios en los cuales se tiene obras o en el futuro se dispondrá de ellas, considerando la precipitación media anual areal de cada una de las cuencas y el área respectiva. Con los datos presentados se puede precisar que para la estación de Canasmoro, considerando la precipitación media y la correspondiente a una probabilidad de ocurrencia del 5 % se tendrá

Tabla 7.8. Caudal específico en la cuenca de la estación Canasmoro

| Estacion  | Estado | Coefficiente de Escorrentía Anual | Área (km <sup>2</sup> ) | Caudal medio anual (m <sup>3</sup> /s) | Precipitación (mm) | Caudal específico (l/s/km <sup>2</sup> ) |
|-----------|--------|-----------------------------------|-------------------------|--|--------------------|--|
| Canasmoro | Media  | 0,287                             | 234,09                  | 1,503                                  | 598                | 6,422                                    |
|           | Minima | 0,287                             | 234,09                  | 0,55305512                             | 206                | 2,318                                    |

A continuación se presentan los caudales medios anuales de la fuente superficial para San Lorenzo

Tabla 7.9. Caudal medio anual estimado en las cuencas de Estudio

| Municipio   | Fuente                       | Tipo de Toma   | Área (km <sup>2</sup> ) | Precipitación Media Areal (mm) | Caudal Específico Estimado (l/s/km <sup>2</sup> ) | Caudal Medio Anual Estimado (l/s) |
|-------------|------------------------------|----------------|-------------------------|--------------------------------|---|-----------------------------------|
| San Lorenzo | La Queñua 1                  | Superficial    | 0,59                    | 598                            | 6,422   | 3,79                              |
|             | La Queñua 2                  | Superficial    | 0,59                    | 598                            | 6,422   | 3,79                              |
|             | Pajchani                     | Subsuperficial | 21,14                   | 598                            | 6,422   | 135,76                            |
|             | Vertiente Justo Ávila        | Superficial    | 0,059                   | 598                            | 6,422   | 0,38                              |
|             | <b>Sub-Total San Lorenzo</b> |                |                         |                                |   | <b>6,422</b>                      |

Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

El caudal de la vertiente Avila, es muy pequeño y a criterio del consultor no merece ser tomado en cuenta.

A continuación se presentan los valores de los caudales medios mensuales para la zona de estudio, considerando la distribución de valores en la estación Canasmoro:

Tabla 7.10. Distribución mensual de los caudales medios en la estación Canasmoro

| Estación  | Volumen Relativo de Escurrimiento Medio Mensual (Hm <sup>3</sup> /Hm <sup>3</sup> ) |       |      |      |       |       |       |      |       |       |       |       | Total |
|-----------|---|-------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           | Oct   | Nov   | Dic  | Ene  | Feb   | Mar   | Abr   | May  | Jun   | Jul   | Ago   | Sep   |       |
| Canasmoro | 0,011   | 0,049 | 0,08 | 0,25 | 0,231 | 0,206 | 0,099 | 0,03 | 0,018 | 0,009 | 0,008 | 0,008 | 1     |

Tabla 7.11. Caudal medio mensual de las fuentes superficiales actuales

| Municipio   | Fuente                       | Caudal medio mensual (l/s) |              |               |               |               |               |               |              |              |              |              |              | Caudal Medio Anual (l/s) |
|-------------|------------------------------|----------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------|
|             |                              | Oct                        | Nov          | Dic           | Ene           | Feb           | Mar           | Abr           | May          | Jun          | Jul          | Ago          | Sep          |                          |
| San Lorenzo | La Queñua 1                  | 0,50                       | 2,23         | 3,64          | 11,37         | 10,50         | 9,37          | 4,50          | 1,36         | 0,82         | 0,41         | 0,36         | 0,36         | 3,79                     |
|             | La Queñua 2                  | 0,50                       | 2,23         | 3,64          | 11,37         | 10,50         | 9,37          | 4,50          | 1,36         | 0,82         | 0,41         | 0,36         | 0,36         | 3,79                     |
|             | Pajchani                     | 17,92                      | 79,83        | 130,33        | 407,28        | 376,33        | 335,60        | 161,28        | 48,87        | 29,32        | 14,66        | 13,03        | 13,03        | 135,63                   |
|             | Vertiente Justo Ávila[1]     |                            |              |               |               |               |               |               |              |              |              |              |              | 0,00                     |
|             | <b>Sub-Total San Lorenzo</b> | <b>18,92</b>               | <b>84,28</b> | <b>137,61</b> | <b>430,02</b> | <b>397,34</b> | <b>354,33</b> | <b>170,29</b> | <b>51,60</b> | <b>30,96</b> | <b>15,48</b> | <b>13,76</b> | <b>13,76</b> | <b>143,20</b>            |

Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

## 7.2 Análisis y comparación de resultados

### 7.2.1 Caudal disponible en la fuente actual

La Tabla 7.11 muestra valores para la época seca (junio a octubre) que están por debajo de 1 l/s, que podrían ser despreciados al momento de considerarlos como oferta, y por otra parte las mediciones realizadas en el año 1998 y luego en el 2006, presentan valores puntuales más elevados, sobre el mismo se debe considerar que en el momento del aforo se encontró una corriente del subálveo que fue medida y con seguridad el propio cauce estaba casi seco, lo propio ocurrirá en este caso en el cual, se seguirá teniendo agua en el subálveo la corriente subsuperficial será nula. Por ello se prefiere considerar como valores medios y mínimos, en estos meses, el valor de 4 l/s. Como elemento adicional al análisis se debe considerar que el año 1998 y el 2006, pudieron ser años superiores a la media, pero el registro de las estaciones de la región muestra que en los meses secos existe una probabilidad del 75 % de tener meses con precipitación nula.

De los registros de San Jacinto del período de 1976 -1984, el Inibreh, para la cuenca del río Tolomosa donde se ubica esta estación mencionada, utilizando el modelo matemático Swat (Soil and, Water

Assessment Toll) versión 2000, que es un modelo físico, sintético, que determina causa efecto de las precipitaciones y caudales y opera en tiempo diario y se basa en la estimación de los parámetros del balance hídrico determinó el caudal de salida y la cantidad de agua retenida en la cuenca y calibro el modelo a través de la información disponible, habiendo encontrado que del total de la precipitación, la evapotranspiración alcanza un 62 % el caudal superficial del álveo un 3 %, un 34 % flujo lateral subsuperficial, y un 1% subterráneo, que explica que una buena parte de la precipitación en la cuenca de 400 mm este en el subálveo.

Para los fines del estudio se ha tomado la relación de 11 veces el caudal superficial como acontece en San Jacinto y aplicado al anterior cuadro de esta manera se puede considerar como de aprovechamiento os siguientes caudales:

Tabla 7.12. Caudal medio mensual de las fuentes superficiales aplicación

|             | Oct | Nov  | Dic   | Ene   | Feb   | Mar   | Abr  | May  | Jun   | Jul  | Ago  | Sep  |      |
|-------------|-----|------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|
| superficial |     | 0,50 | 2,23  | 3,64  | 11,37 | 10,50 | 9,37 | 4,50 | 1,36  | 0,82 | 0,41 | 0,36 | 3,79 |
| sub alveo   |     | 5,50 | 24,51 | 40,01 |       |       |      |      | 15,00 | 9,00 | 4,50 | 4,00 | 4,00 |

### 7.2.2 Caudal disponible en las fuentes futuras potenciales

Alternativas solo para el municipio de San Lorenzo, y de agua para uso doméstico, proveniente de otras cuencas próximas no se contemplan, puesto que el rio Calama, Sella, o Huacata están con programas de aprovechamiento en riego o de agua hacia Tarija, no quedando otra posibilidad que explotar los recurso hídricos subterráneo para atender la demanda en un horizonte de años bastante amplio, como fue descrito en la Etapa I del PMM-Valle Central de Tarija (Diagnóstico de la Situación Actual del Servicio).

### 7.3 Escenario probabilístico

Para desarrollar el escenario probabilístico de la oferta hídrica, se requiere adoptar un periodo de diseño para las obras de captación. El periodo de diseño está definido en para los sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario en las normas bolivianas NB688 y NB689:

Con tal periodo de diseño se calculó la probabilidad de no ocurrencia igual a 95%, y los valores probabilísticos de no ocurrencia de las precipitaciones medias anuales probabilísticas areales para cada cuenca de interés. Con las precipitaciones medias anuales probabilísticas areales se determinó el valor del caudal mínimo mensual probabilístico para un periodo de diseño igual a 20 años, empleando el modelo del coeficiente de escorrentía anual. Se presenta a continuación los valores determinados:

Tabla 7.13. Caudal mínimo probabilístico mensual de las fuentes superficiales actuales para un periodo de diseño de 20 años

| Municipio   | Fuente                       | Tipo de Toma   | Área (km <sup>2</sup> ) | Precipitación Media Areal (mm) | Caudal Específico Estimado (l/s/km <sup>2</sup> ) | Caudal Medio Anual Estimado (l/s) |
|-------------|------------------------------|----------------|-------------------------|--------------------------------|---|-----------------------------------|
| San Lorenzo | La Queñua 1                  | Superficial    | 0,59                    | 206,7                          | 2,318   | 1,37                              |
|             | La Queñua 2                  | Superficial    | 0,59                    | 206,7                          | 2,318   | 1,37                              |
|             | Pajchani                     | Subsuperficial | 21,14                   | 206,7                          | 2,318   | 49,00                             |
|             | ertiente Justo Ávi           | Superficial    | 0,059                   | 206,7                          | 2,318   | 0,14                              |
|             | <b>Sub-Total San Lorenzo</b> |                |                         |                                |   | <b>2,318</b>                      |

| Municipio   | Fuente                | Caudal medio mensual (l/s) |       |       |        |        |        |       |       |       |      |      |      | Caudal Medio Anual (l/s) |
|-------------|-----------------------|----------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|------|------|------|--------------------------|
|             |                       | Oct                        | Nov   | Dic   | Ene    | Feb    | Mar    | Abr   | May   | Jun   | Jul  | Ago  | Sep  |                          |
| San Lorenzo | La Queñua 1           | 0,18                       | 0,80  | 1,31  | 4,10   | 3,79   | 3,38   | 1,62  | 0,49  | 0,30  | 0,15 | 0,13 | 0,13 | 1,37                     |
|             | La Queñua 2           | 0,18                       | 0,80  | 1,31  | 4,10   | 3,79   | 3,38   | 1,62  | 0,49  | 0,30  | 0,15 | 0,13 | 0,13 | 1,37                     |
|             | Pajchani              | 6,47                       | 28,81 | 47,04 | 147,01 | 135,83 | 121,13 | 58,21 | 17,64 | 10,58 | 5,29 | 4,70 | 4,70 | 48,95                    |
|             | fiente Justo Ávila[1] |                            |       |       |        |        |        |       |       |       |      |      |      | 0,00                     |
|             | Sub-Total San Lor     | 6,83                       | 30,42 | 49,67 | 155,21 | 143,42 | 127,90 | 61,46 | 18,63 | 11,18 | 5,59 | 4,97 | 4,97 | 51,69                    |

Para los meses del periodo seco aplicando el concepto anterior se tendrán los siguientes caudales de aplicación.

Figura 7.13. Caudal medio mensual de aplicación (mínimo)

|             | Oct  | Nov  | Dic  | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun  | Jul  | Ago  | Sep  |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| superficial | 0,18 | 0,80 | 1,31 | 4,10 | 3,79 | 3,38 | 1,62 | 0,49 | 0,30 | 0,15 | 0,13 | 0,13 |
| sub alveo   | 1,99 | 8,85 |      |      |      |      |      |      | 3,25 | 1,62 | 1,44 | 1,44 |

#### 7.4 Escenario bajo influencia del cambio climático

Para desarrollar el escenario de la oferta hídrica bajo influencia del cambio climático, se requiere adoptar un modelo de cambio climático para el Proyecto

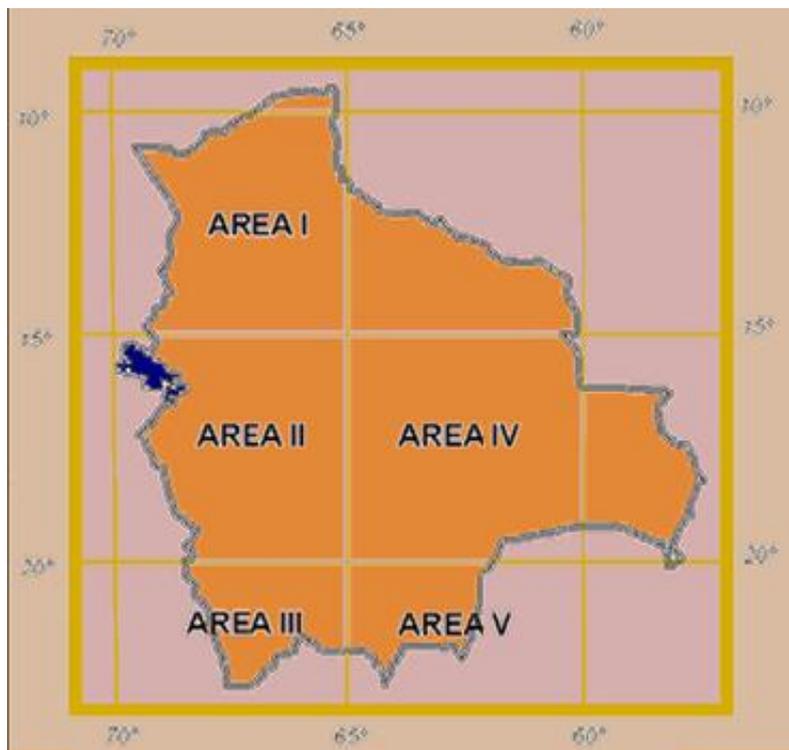
Los modelos de cambio climático que se han empleado para analizar las variaciones de temperatura, precipitación y caudal, difieren en su metodología y datos a ser aplicados. Entre los documentos que detallan la aplicación de modelos de cambio climático en el área de estudio, se tienen:

- Análisis del impacto de posibles cambios climáticos en la hidrología superficial de la cuenca del Río Bermejo, Formulación del Programa Estratégico de Acción para la Cuenca del Río Bermejo, 1999
- Primera Comunicación Nacional ante la Convención de Cambio Climático, Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación, 2000

El primer documento detalla la aplicación del modelo de Wigley y Jones (1985), sin embargo, su aplicación es para caudales anuales, y para ello se debe realizar la estimación de parámetros de cambio de la precipitación y la evapotranspiración potencial.

En el segundo documento, existen conclusiones importantes sobre el cambio en la temperatura y la precipitación, a partir de la aplicación de modelos de cambio climático en cinco zonas del territorio nacional, la que corresponde al área de estudio es la Zona V, como se observa en la siguiente imagen:

Figura 7.14. Áreas climáticas para el uso de los modelos de circulación general



Fuente: Mapa N°3 de la Primera Comunicación Nacional ante la Convención de Cambio Climático (2000)

En el documento de referencia se analizaron varios escenarios climáticos que poseen las siguientes características:

- El SENAMHI combinó los programas MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse gas Induced Climate Change) y el SCENGEN (SCENARIO GENERator). El primero de ellos presenta las estimaciones de las concentraciones de GEI, y la temperatura global entre los años 1990 al 2100; en tanto el segundo combina los resultados del MAGGIC y los MCG.
- El trabajo realizado por el SENAHI contempla tres escenarios globales de cambio climático: IS92a (considerado como escenario de referencia por el Comité de Negociaciones de la CMNUCC, estima un rango medio de emisiones futuras, asumiendo un grado modesto de intervención para reducir emisiones de GEI, se considera como escenario de referencia), IS92c5 (escenario optimista) y IS92e (escenario pesimista), respectivamente.
- El escenario IS92a hace las siguientes consideraciones; la población tendrá un incremento hasta el año 2100 alcanzando a 11.3 mil millones, el crecimiento económico será de 2.9% hasta el año 2025 y de 2,3% hasta el año 2100, el costo de la energía solar bajará a 0,075 Kw/h, el costo de petróleo será 70 \$US /barril. El esfuerzo de reducción de los países desarrollados será para mediados del próximo siglo.
- El escenario IS92c hace las siguientes consideraciones: la población alcanzaría 6.4 mil millones de habitantes para el año 2100. El crecimiento económico será de 2.0% hasta el año 2025 y 1.2% hasta el año 2100. El consumo global de energía es de 8.000 EJ de petróleo convencional y 7.300 EJ de gas natural. El costo de la energía nuclear disminuye anualmente en 0.4%.
- El escenario IS92e considera incremento de población hasta el 2100 de 11,3 billones, crecimiento económico de 3.5% entre el 1990 y el 2025 y posteriormente de 3.0% hasta el 2100 e incremento de la energía fósil del 30%.

- Ambos modelos consideran la existencia de medidas de control y acuerdos internacionales y esfuerzos de reducción de emisiones de los países en desarrollo a partir de mediados de siglo.

Las conclusiones abordadas en el documento a propósito de dos estudios desarrollados:

- Una comparación entre ambos estudios (PNCC, 1997 y SENAMHI, 1998) es difícil de realizar toda vez que los puntos de partida son diferentes, sin embargo en términos generales se aprecia comportamientos similares en los resultados.
- En la Cuenca del Plata, relacionada con el área V, se puede apreciar también aumento de temperaturas, sin embargo los estudios difieren en cuanto a precipitación toda vez que en un caso se presentaría reducción de precipitación y en el otro (SENAMHI) incremento.

Para el presente estudio se adoptó la influencia del cambio climático bajo un escenario pesimista (IS92e), para el cual las variaciones de la precipitación es como se expone en la siguiente tabla:

Tabla 7.14. Variación de la precipitación en relación a la normal (periodo 1961-1990) en los diferentes modelos de circulación general (HADCM2. UKHI. GISSEQ) para el escenario IS92E

|               | 2030        |                | 2050        |                | 2100        |                |
|---------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|
|               | AREA V      |                |             |                |             |                |
| Meses secos   | (-13) a 21% | (-0.6) a 4.2mm | (-19) a 33% | (-0.9) a 7 mm  | (-63) a 68% | (-1.8) a 14 mm |
| Meses húmedos | (-8) a 22%  | (-3) a 30mm    | (-13) a 34% | (-4.4) a 63 mm | (-25) a 69% | (-9) a 127 mm  |

Fuente: Tabla 3.6 de la Primera Comunicación Nacional ante la Convención de Cambio Climático (2000)

Para el análisis de la influencia del cambio climático se adoptaron las condiciones más pesimistas del modelo, considerando el horizonte de análisis del año 2036, para lo cual la precipitación tiene una variación porcentual de -19 % en los meses secos y de -13% en los meses húmedos.

Estableciendo que los meses secos se encuentran comprendidos entre Abril y Septiembre, y los meses húmedos en los restantes del año, se procedió a encontrar los valores medios mensuales de la precipitación bajo la influencia de un escenario de cambio climático pesimista, y consiguientemente afectados por los porcentajes que corresponden a cada periodo (seco y húmedo). Una vez encontrada la precipitación media mensual areal para cada cuenca, se procedió a determinar el caudal medio mensual aplicando el modelo del coeficiente de escorrentía anual.

Tabla 7.15. Caudal medio mensual de las fuentes superficiales actuales en San Lorenzo para un escenario pesimista de cambio climático

| Fuente                               | Tipo de Toma  | Área (km2)    | Precipitación Media | Caudal Específico Estimado | Caudal Medio Anual |                |                |               |               |               |               |               |                          |  |
|--------------------------------------|---|---------------|---------------------|----------------------------|--------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------------------|--|
| La Queñua 1                          | Superficial   | 0,59          | 386                 | 6,422                      | 3,79               |                |                |               |               |               |               |               |                          |  |
| La Queñua 2                          | Superficial   | 0,59          | 386                 | 6,422                      | 3,79               |                |                |               |               |               |               |               |                          |  |
| Pajchani                             | Subsuperficial  | 21,14         | 433                 | 6,422                      | 135,76             |                |                |               |               |               |               |               |                          |  |
| Vertiente Justo Ávila                | Superficial   | 0,059         | 433                 | 6,422                      | 0,38               |                |                |               |               |               |               |               |                          |  |
| <b>Sub-Total San Lorenzo</b>         |   |               |                     | <b>6,422</b>               | <b>143,72</b>      |                |                |               |               |               |               |               |                          |  |
| Estación                             | Volumen Relativo de Escurrimiento Medio Mensual (Hm <sup>3</sup> /Hm <sup>3</sup> ) |               |                     |                            |                    |                |                |               |               |               |               |               | Total                    |  |
|                                      | Oct   | Nov           | Dic                 | Ene                        | Feb                | Mar            | Abr            | May           | Jun           | Jul           | Ago           | Sep           |                          |  |
| Canasmoro                            | 0,011   | 0,049         | 0,08                | 0,25                       | 0,231              | 0,206          | 0,099          | 0,03          | 0,018         | 0,009         | 0,008         | 0,008         | 1                        |  |
|                                      | Oct   | Nov           | Dic                 | Ene                        | Feb                | Mar            | Abr            | May           | Jun           | Jul           | Ago           | Sep           |                          |  |
| Fuente                               | Oct   | Nov           | Dic                 | Ene                        | Feb                | Mar            | Abr            | May           | Jun           | Jul           | Ago           | Sep           | Caudal Medio Anual (l/s) |  |
| La Queñua 1                          | 0,50  | 2,23          | 3,64                | 11,37                      | 10,50              | 9,37           | 4,50           | 1,36          | 0,82          | 0,41          | 0,36          | 0,36          | 3,79                     |  |
| La Queñua 2                          | 0,50  | 2,23          | 3,64                | 11,37                      | 10,50              | 9,37           | 4,50           | 1,36          | 0,82          | 0,41          | 0,36          | 0,36          | 3,79                     |  |
| Pajchani                             | 17,92   | 79,83         | 130,33              | 407,28                     | 376,33             | 335,60         | 161,28         | 48,87         | 29,32         | 14,66         | 13,03         | 13,03         | 135,63                   |  |
| Disminución del 22% de precipitación |   |               |                     |                            |                    |                |                |               |               |               |               |               |                          |  |
| Fuente                               | Caudal medio mensual (l/s)  |               |                     |                            |                    |                |                |               |               |               |               |               | Caudal Medio             |  |
|                                      | Oct   | Nov           | Dic                 | Ene                        | Feb                | Mar            | Abr            | May           | Jun           | Jul           | Ago           | Sep           |                          |  |
| La Queñua 1                          | 0,390   | 1,738         | 2,837               | 8,866                      | 8,192              | 7,306          | 3,511          | 1,064         | 0,638         | 0,319         | 0,284         | 0,284         | 2,952                    |  |
| La Queñua 2                          | 0,390   | 1,738         | 2,837               | 8,866                      | 8,192              | 7,306          | 3,511          | 1,064         | 0,638         | 0,319         | 0,284         | 0,284         | 2,952                    |  |
| Pajchani                             | 13,978  | 62,265        | 101,658             | 317,681                    | 293,537            | 261,769        | 125,802        | 38,122        | 22,873        | 11,437        | 10,166        | 10,166        | 105,788                  |  |
| Vertiente Justo Ávila[1]             |   |               |                     |                            |                    |                |                |               |               |               |               |               | 0,000                    |  |
| <b>Sub-Total San Lorenzo</b>         | <b>14,758</b>   | <b>65,741</b> | <b>107,332</b>      | <b>335,413</b>             | <b>309,922</b>     | <b>276,381</b> | <b>132,824</b> | <b>40,250</b> | <b>24,150</b> | <b>12,075</b> | <b>10,733</b> | <b>10,733</b> | <b>111,693</b>           |  |
| Disminución del 8% de precipitación  |   |               |                     |                            |                    |                |                |               |               |               |               |               |                          |  |
| Fuente                               | Caudal medio mensual (l/s)  |               |                     |                            |                    |                |                |               |               |               |               |               | Caudal Medio             |  |
|                                      | Oct   | Nov           | Dic                 | Ene                        | Feb                | Mar            | Abr            | May           | Jun           | Jul           | Ago           | Sep           |                          |  |
| La Queñua 1                          | 0,460   | 2,050         | 3,346               | 10,458                     | 9,663              | 8,617          | 3,916          | 1,187         | 0,712         | 0,356         | 0,316         | 0,316         | 3,450                    |  |
| La Queñua 2                          | 0,460   | 2,050         | 3,346               | 10,458                     | 9,663              | 8,617          | 3,916          | 1,187         | 0,712         | 0,356         | 0,316         | 0,316         | 3,450                    |  |
| Pajchani                             | 16,487  | 73,441        | 119,904             | 374,701                    | 346,223            | 308,753        | 140,317        | 42,520        | 25,512        | 12,756        | 11,339        | 11,339        | 123,608                  |  |
| Vertiente Justo Ávila[1]             |   |               |                     |                            |                    |                |                |               |               |               |               |               |                          |  |
| <b>Sub-Total San Lorenzo</b>         | <b>17,407</b>   | <b>77,541</b> | <b>126,597</b>      | <b>395,616</b>             | <b>365,549</b>     | <b>325,987</b> | <b>148,149</b> | <b>44,894</b> | <b>26,936</b> | <b>13,468</b> | <b>11,972</b> | <b>11,972</b> | <b>130,507</b>           |  |

## 8. RECURSOS HIDRICOS SUBTERRANEOS

### 8.1 Condiciones hidrogeológicas de la cuenca

La mayor parte del relato que se efectúa a continuación se basa en las investigaciones efectuadas en el año 1979 con el proyecto de "investigación de los recursos de aguas subterráneas en el área de Tarija" NNUU Codetar, y en el estudio hidrogeológico elaborado por el consorcio consultor que están anexas en éste informe del río Gualaquivir.

Las investigaciones hidrogeológicas en la cuenca del valle central de Tarija que forma parte, el área de San Lorenzo, empezaron en el año 1979 con el proyecto mencionado de NNUU – Codetar, en el cual se efectuaron 28 pozos de exploración en diversas partes de la cuenca, alcanzando a cinco en el área del proyecto de los cuales uno solo fue perforado.

Estos pozos atravesaron el acuífero multicapa que se encuentra en el material fluvio lacustre no consolidado, no investigando los materiales consolidados.

Una idea sobre las formaciones geológicas desde el punto de vista de agua subterránea se muestra en la figura HSL – 15 la misma que muestra un corte transversal y en el mismo se aprecia el paquete cuaternario en el valle en su parte central, basamento de rocas del ordovícico y cámbrico en las montañas de sama, que son la recarga natural de acuífero, y Ordovícico en el lado este.

De estas formaciones el cámbrico y la base del ordovícico son de interés hidrogeológico por estar constituidas la mayoría de areniscas cuarcíticas alcanzando un espesor de 600 m. Estas formaciones funcionan como acuíferos de permeabilidad secundaria dado el alto grado de fisuración y que se constituyen en la procedencia de gran parte del flujo base de los ríos.

Este acuífero, que se muestra, tiene predominancia de materiales finos (arcillas y limos) existiendo variaciones faciales de tipo areno gravoso. Estas formas son muy comunes en las cuencas intramontanas del país.

Los acuíferos cuaternarios que rellenan la cuenca del Guadalquivir son depósitos aluviales (terrazas abanicos, y cauces de río) depósitos coluviales y algunos depósitos fluviolacustres que son de interés hidrogeológico por su comportamiento como zonas de recarga y formación acuífera. Y constituyen:

- Una zona de acuífero libre común
- Un acuífero confinado en toda la parte central de la cuenca
- Acuíferos freáticos a los largo de los ríos principales

El acuífero confinado y los acuíferos freáticos, están en conexión hidráulica directa con la zona de acuífero libre común. El acuífero libre común y el confinado conforman el acuífero principal del valle.

Cabe mencionar las pequeñas capas acuíferas lenticulares intercaladas a poca profundidad en los depósitos lacustres que actúan como acuífero semiconfinado.

La ubicación y profundidad de estas variaciones faciales, dependen de la ubicación de las quebradas que aportaron el material para formarlas. Por esta razón la profundidad y el espesor de estos lentes de mayor granulometría son totalmente aleatorios. De acuerdo con la investigación del año 1979.

El acuífero libre común, se extiende en las zonas altas de la parte oeste, norte y sud de las cuencas, hacia el sur y este se transforma en confinada, al estar las formaciones permeables cubiertas por sedimentos lacustres impermeables, la profundidad del acuífero incrementa en su profundidad al aumentar la distancia de las zonas de recarga llegando en la ciudad a 56 m, a 70 m en San Luis 122 a 164 en la tablada y morros blancos, río Camacho, 150 en Concepción y aun mayor 182 en Santa Ana, el espesor según los datos de geofísica en Tarija cancha, encontró 85 m de acuífero saturado y en San Lorenzo a lo largo del Guadalquivir probablemente supere los 250 m., que podría ser una zona apta para un campo de pozos.

Al igual que la profundidad, a medida que se aleja de las zonas de recarga el espesor disminuye y han encontrado que en la mayoría de los pozos se alcanza 20 a 45 m.

En conjunto el material de los acuíferos es grueso, por provenir de las serranías, generalmente constituidos por gravas y cantos rodados de cuarcitas en una matriz de arena mal clasificada de granulometría variable, que dispone de gran dureza sobre la línea de recarga y menor dureza a medida que se aleja hacia el valle. Este es un factor importante para decidir sobre el equipo de perforación.

La profundidad del nivel del agua, depende de las condiciones topográficas. Son profundos en las partes altas de las zonas de recarga que corresponde al acuífero libre común y se estima que el nivel freático supera los 40 m, pero en los Valles del Calama donde la gradiente hidráulica es fuerte igual a la pendiente topográfica los niveles se encuentran cerca de la superficie

En el pozo perforado se tuvieron las condiciones siguientes:

| N°   | Nivel Estático | Transmisibilidad      | Caudal | Abatimiento | capacidad específica | Espesor acuífero | Permeabilidad | observaciones |
|------|----------------|-----------------------|--------|-------------|----------------------|------------------|---------------|---------------|
|      | (m)            | (m <sup>2</sup> /día) | (l/s)  | (m)         | (l/s/m)              | (m)              |               |               |
| T-11 | 12.81          | 54                    | 2.3    | 6.5         | 0.36                 | 77               | 0.7           |               |

Ahora bien de todos los pozos perforado en el valle de Tarija, se obtuvo como porosidad eficaz un promedio de 6,6 m/d, como valor de permeabilidad y la capacidad específica promedio de 1 l/s/m que muestran que el pozo no fue desarrollado adecuadamente o que no se alcanzó la profundidad necesaria, que también resalta al señalar el caudal encontrado o que no se captó el acuífero.

El funcionamiento y régimen del flujo subterráneo se realiza a través de una escorrentía subterránea en el conjunto de formaciones paleozoicas que constituyen la gran parte de la montaña de las cuencas. Esta escorrentía proviene de la infiltración directa de la lluvia y de la infiltración de la escorrentía superficial. La mayor recarga se produce en la cordillera de Sama, donde las formaciones tienen una

buena permeabilidad secundaria, en las partes bajas de la cuenca que están cubiertas por formaciones de limo arcillosas de origen lacustre la recarga es muy reducida o nula.

La dirección del flujo subterráneo de la zona desde Sella diverge hacia la región de San Lorenzo y la mayor parte del flujo subterráneo de la alta cuenca, hasta e Rancho, se concentra en la cuenca del río El monte y fluye al este del cauce del río Guadalquivir y en Tomatitas solo se tiene el flujo de las aguas subterráneas de las cuencas del Erquis y la Vitoria, y aquellas de la parte sur de San Andrés.

La elevación del nivel como consecuencia de la recarga del acuífero comienza generalmente en noviembre con poco desfase después de las primeras lluvias y crecidas importantes y la recesión tiene lugar durante la época seca, al producirse la fuga lateral de la recarga anterior, a partir de abril. Las fluctuaciones medidas en los pozos excavados de Calama San Lorenzo y clasificados como PE-19, PE 45, PE 52, PE 83 y T-11 mostraron variaciones de un metro hasta 5 m, en un control mensual durante 2 años, y el máximo en la parte alta en el pozo PE 83 alcanzo 10 m.

## 8.2 Caudal producido y disponible

Se puede mencionar que la carencia de información, lleva tener que efectuar apreciaciones que podrían resultar incorrectas en la precisión del caudal que se puede obtener del recurso, se establece que existe un acuífero y que el mismo es factible de explotación, que las entidades encargadas de los recursos hídricos efectuaron perforaciones de pozos que permitieron, según reza, en los registros, obtener un caudal mayor a 10 l/s alcanzando los 15 l/s, que es factible por las condiciones hidrogeológicas, y que al momento de explotarlos no se lo pudo confirmar si permanece en el tiempo, o si existen reducciones. La profundidad de perforación supero los 100 m y de todo lo que se conoce se podría llegar a los 150 m.

La opinión de la consultora, es que, fuera de las pruebas que deben ser realizadas es necesario que se efectúe un perfilaje geoelectrico que acompañe al pozo para establecer que se han tomado las previsiones de ubicación correcta de rejillas, longitud de las mismas, y su correlación con los mantos geológicos perforados, en los dos pozos que dan servicio a San Lorenzo. También es bueno señalar la necesidad de una inspección con cámara de video para el control del estado en el cual se encuentra el pozo. Este importante trabajo debe ser realizado al inicio de los estudios de diseño final.

Se investigará sobre los pozos existentes, al igual que efectuar la prueba de bombeo de ratificación de caudales y parámetros hidrogeológicos y se propone tener pozos que en número necesario, abastezcan la demanda, considerando que nuevos pozos de 12 l/s, es factible obtener a una profundidad de 150 m.

## MUNICIPIO DE URIONDO

### 9. CUENCAS HIDROGRAFICAS Y CAUDAL DISPONIBLE

El sistema existente como se señaló en el diagnóstico está basado en la fuente del río Alisos en la comunidad Juntas, donde mediante galería se captan 14 l/s y se conduce por la parte alta del valle, el agua por medio de una tubería hasta un tanque de almacenamiento en Concepción.

El sistema descrito, denominado nuevo, adicionalmente abastece de agua, a las localidades de La Compañía, Saladillo, Chocloca, Ancón Chico y Pampa Villa, faltando el servicio, con este sistema a La Higuera.

De manera complementaria se tiene el sistema antiguo que dispone como fuente de provisión de agua el Río Camacho, y en forma paralela al Sistema nuevo lleva las aguas hasta la ciudad de Concepción, por la parte baja del valle y comprende las comunidades de Saladillo, La Compañía, Valle de Concepción (Uriondo), y Pampa La Villa. En la actualidad, este sistema está conectado al nuevo.

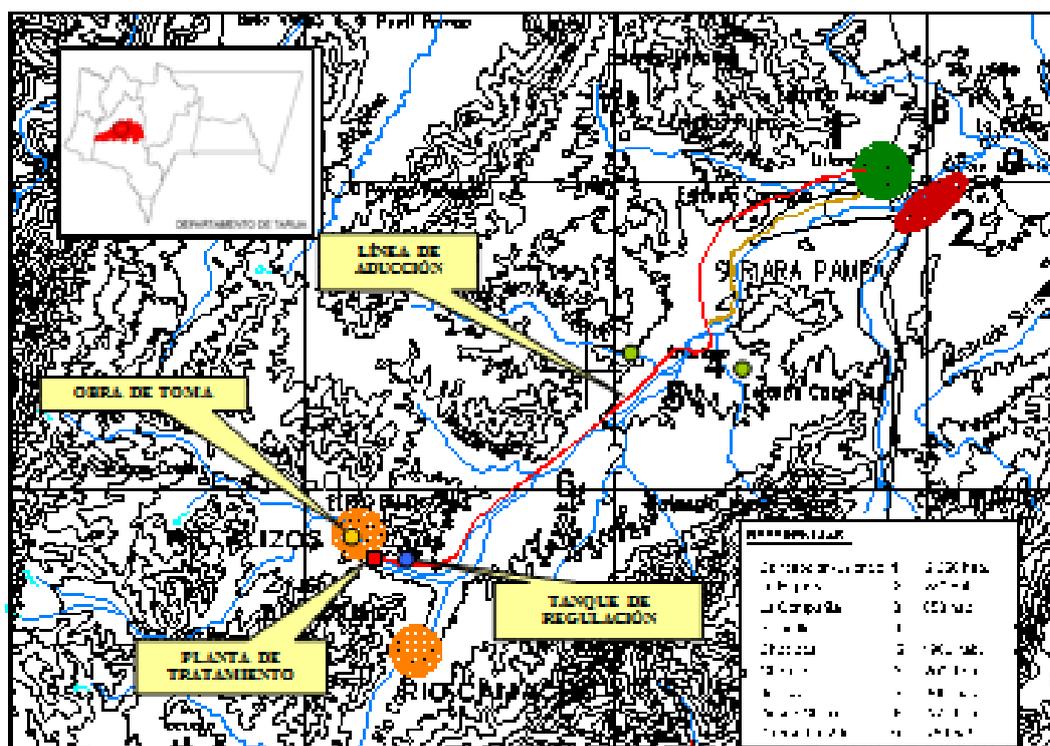
Este sistema capta 10 l/s mediante Galerías filtrantes con varios tramos con Tubería perforada PVC DN= 6", dispone de un Tanque de Almacenamiento 50 m<sup>3</sup> en el sitio de la captación y otro de 120 m<sup>3</sup> en el Valle y para atender a la parte alta de la ciudad tiene un Tanque elevado de 15 m<sup>3</sup>.

Basado en el relato anterior, la disponibilidad de caudal para el suministro de agua a Concepción es de 24 l/s, líneas de aducción y plantas de tratamiento para este caudal.

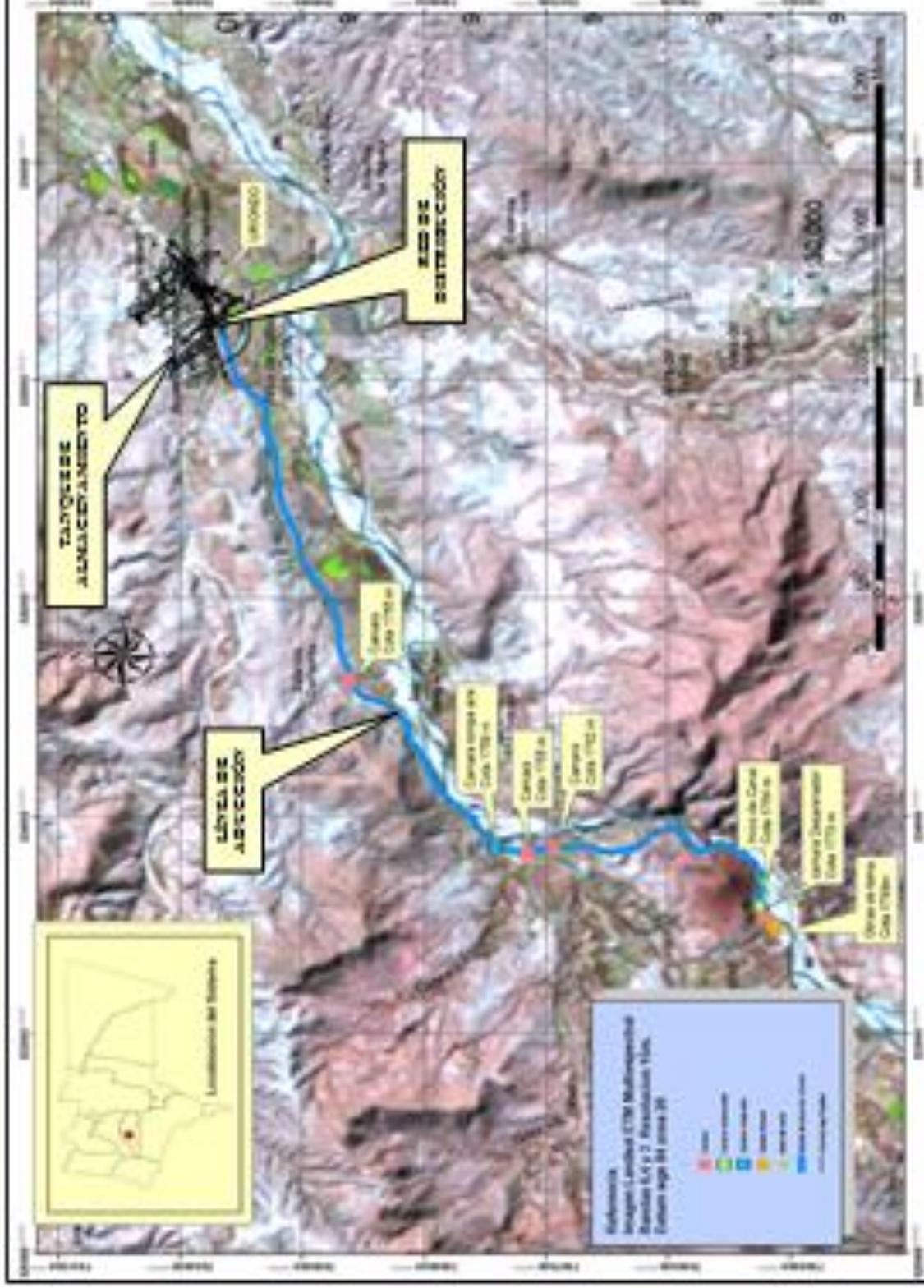
Las obras de tomas consistentes en galerías filtrantes se encuentran en condiciones aceptables de funcionamiento, existe racionamiento de agua en la época de estiaje debido a que el manto de filtro se encuentra colmatado de arena.

Se propone el cambio del manto de filtro a lo largo de la galería filtrante, además, proteger la tubería de salida de la obra de toma con colchonetas y gaviones, de esta forma evitar socavaciones en las mencionadas obras.

Refaccionar la cámara desarenadora existente para facilitar la operación y mantenimiento.



Informe Especial: Plan Maestro Integral de Agua y Saneamiento del Valle Central de Tarija



En la fuente superficial actual para el abastecimiento de agua potable para Uriondo, no se realizan mediciones o se llevan registros del caudal que escurre en la misma o que circula por la obra de captación, y esporádicamente, cuando se efectuó un diseño de obra de captación, se realizan mediciones, solamente del agua captada y no así del agua que escurre por el sitio de la obra de toma de la fuente superficial.

Los valores de medición a través del presente estudio se buscará confirmarlos para ser utilizados en el estudio del Plan Maestro y analizar el efecto que tendrá sobre ellos por el cambio climático.

El estudio, ante la ausencia de información utilizará la metodología de la verosimilitud hidrológica aplicando criterios aereales o de similitud con las cuencas próximas a la cuenca del Alisos que dispone de un área de drenaje de 136.60 km<sup>2</sup>, sobre la base de la información de precipitación y la del balance hidrológico, dado por la expresión

$$P = E - p$$

Donde P es la precipitación anual (en mm)

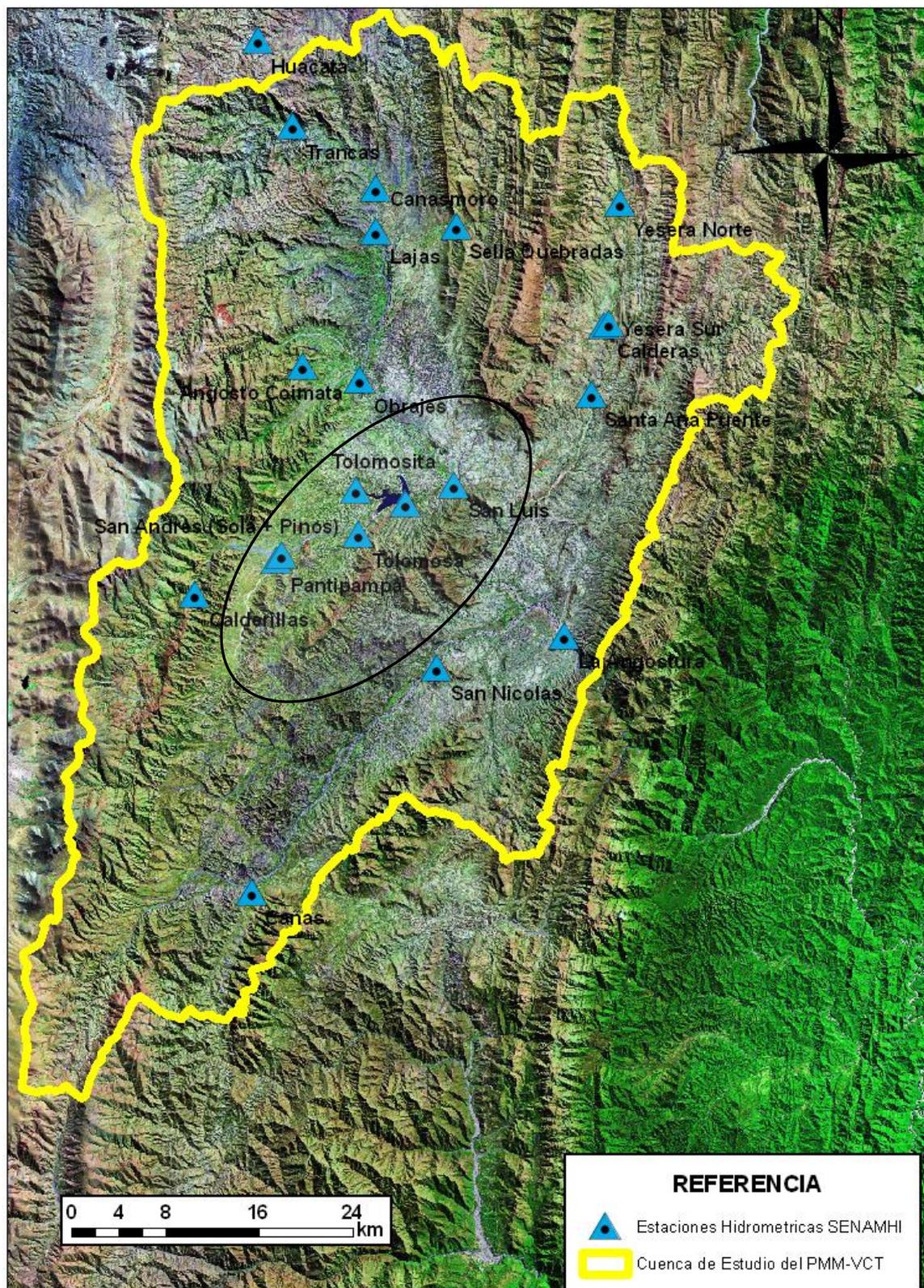
- E es la escorrentía anual (en mm)
- p son las pérdidas debido a la infiltración (i), la Evapotranspiración (Et), el escurrimiento, etc. Cuya información es difícil obtener o no existe. De todas ellas la mayor pérdida está en la evapotranspiración como una función de la temperatura

Cuyos valores en el transcurso de los años yendo de año tras año se complementan, cumpliendo la ecuación anterior, y por ello para una determinada probabilidad de ocurrencia de precipitación, también se cumple la ecuación anterior para esa determinada probabilidad de ocurrencia, para una determinada área en la cual las condiciones de precipitación y aquellas de clima, vegetación, uso del suelo, etc., son similares.

Las estaciones hidrométricas que se tienen en la cuenca de Rio grande de Tarija y del Bermejo como cursos principales del drenaje del valle central de Tarija y del rio Guadalquivir, hasta la Angostura, se muestran en la figura HU-1 y sus registros en el cuadro HU-2 mientras que la precipitación tiene información que aparece en la figura HU-2

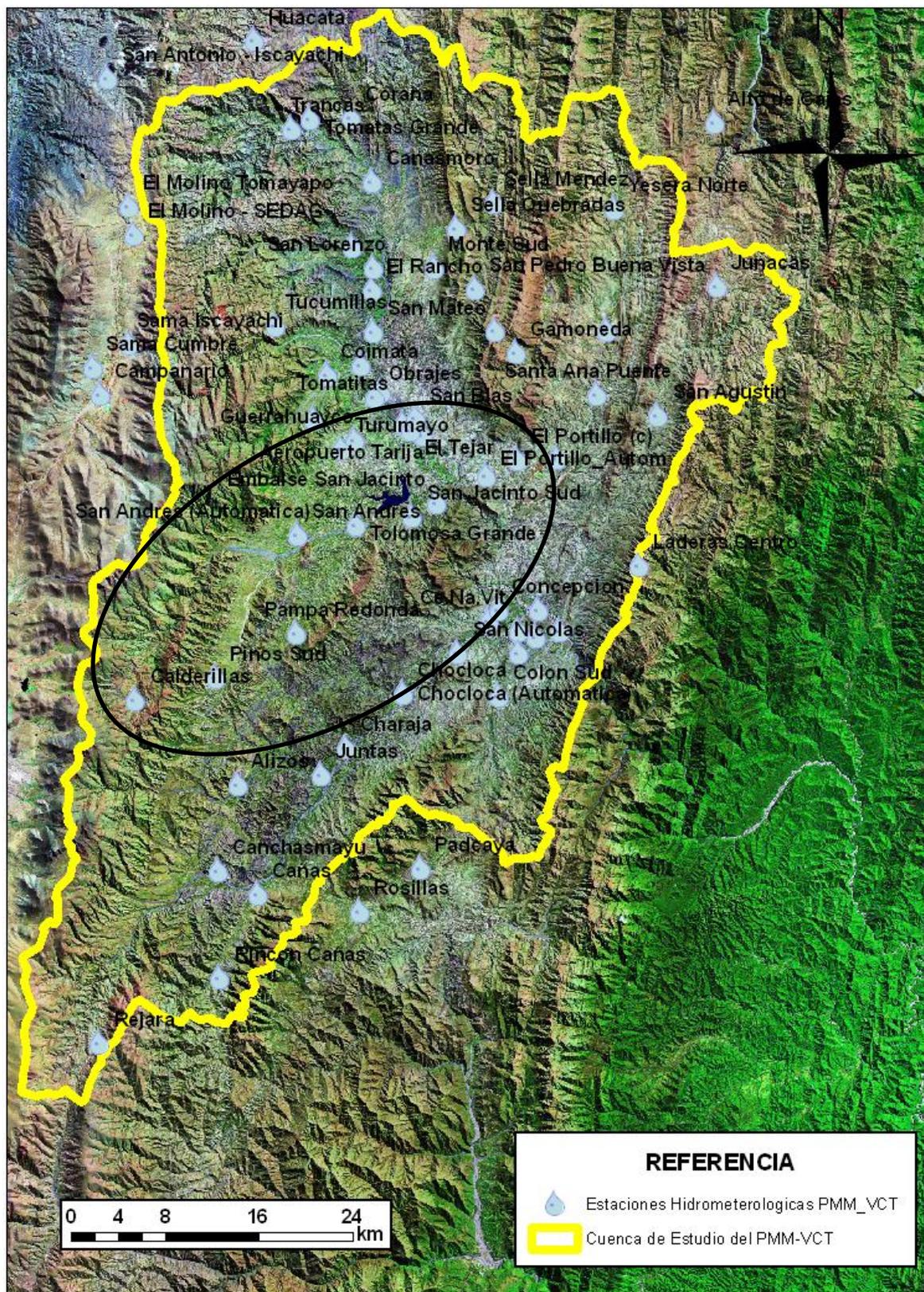
La información son registros del SENAMHI. A continuación se presentan los mapas de las estaciones hidrométricas e hidrometeorológicas que ha operado y mantiene en operación el SENAMHI:

Figura 9.1. Estaciones Hidrométricas del Valle Central de Tarija



Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

Figura 9.2. Estaciones Hidrometeorológicas del Valle Central de Tarija



Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

Si bien existen registros de 20 estaciones hidrométricas en el área de estudio hidrológico en el cual se aplique la verosimilitud, en la propia cuenca se dispone de tres estaciones Angostura, Cañas y San Nicolás en las cuales los datos son de fechas esporádicas.

La información con la cual se cuenta no es continua y está presente en diversos periodos de tiempo. Del total en 14 de ellas se realizan mediciones eventuales como se detalla en el cuadro HU-2, generalmente durante la época de aguas bajas y solamente en algunos años.

Las estaciones hidrométricas que se encuentran en la región de Tarija son:

Tabla 9.1. Estaciones Hidrométricas de la Cuenca del Valle Central de Tarija

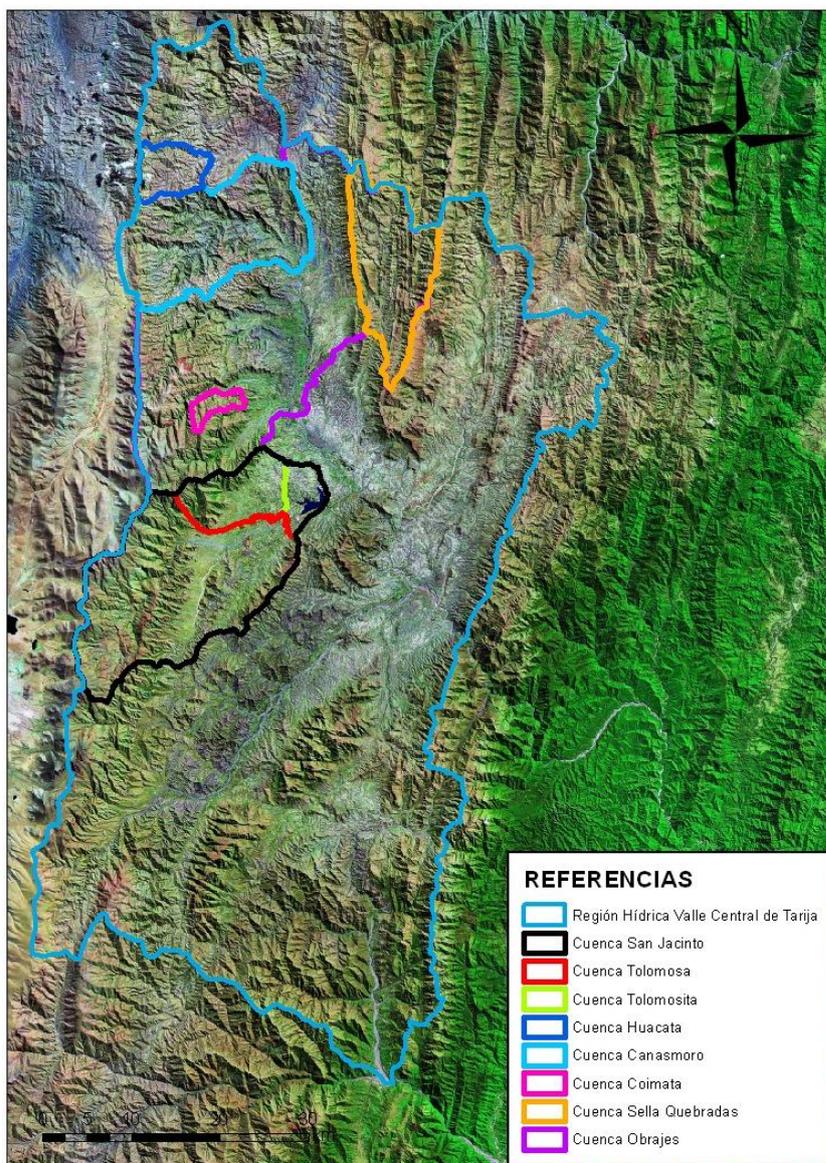
| Estación                  | Departamento | Provincia | Tipo | Latitud <sup>12</sup> | Longitud <sup>6</sup> | Altitud | Cuenca       | Área(k m <sup>2</sup> ) | Medición |
|---------------------------|--------------|-----------|------|-----------------------|-----------------------|---------|--------------|-------------------------|----------|
| Yesera Norte              | Tarija       | Cercado   | A    | 21°22'12.9<br>3"S     | 64°32'51.1<br>5"O     |         | Santa Ana    | 55.11                   | Eventual |
| Yesera Sur                | Tarija       | Cercado   | A    | 21°27'47.8<br>4"S     | 64°33'27.8<br>7"O     | 2092    | Santa Ana    | 155.76                  | Eventual |
| Calderas                  | Tarija       | Cercado   | A    | 21°27'54.8<br>3"S     | 64°33'41.1<br>0"O     | 2085    | Santa Ana    | 41.4                    | Eventual |
| Santa Ana Puente          | Tarija       | Cercado   | A    | 21°31'7.20<br>"S      | 64°34'19.8<br>7"O     |         | Santa Ana    | 252.79                  | Eventual |
| Calderillas               | Tarija       | Cercado   | E    | 21°40'15.7<br>0"S     | 64°54'5.47"<br>O      |         | Tolomosa     | 108.86                  | Eventual |
| San Andrés (Sola)         | Tarija       | Cercado   | A    | 21°40'15.7<br>0"S     | 64°54'5.47"<br>O      |         | Tolomosa     | 168.39                  | Eventual |
| Pantipampa                | Tarija       | Cercado   | A    | 21°38'41.3<br>3"S     | 64°49'58.1<br>6"O     |         | Tolomosa     | 82.98                   | Eventual |
| San Andrés (Sola + Pinos) | Tarija       | Cercado   | A    | 21°38'30.1<br>1"S     | 64°49'45.4<br>2"O     |         | Tolomosa     | 251.37                  | Eventual |
| Tolomosita                | Tarija       | Cercado   | A    | 21°35'30.4<br>2"S     | 64°46'0.92"<br>O      | 1913    | Tolomosa     | 73.96                   | Continua |
| Tolomosa                  | Tarija       | Cercado   | A    | 21°35'30.4<br>2"S     | 64°46'0.92"<br>O      | 1913    | Tolomosa     | 336.02                  | Continua |
| San Jacinto               | Tarija       | Cercado   | A    | 21°36'8.04<br>"S      | 64°43'35.8<br>6"O     |         | Tolomosa     | 438.26                  | Continua |
| Angosto Coimata           | Tarija       | Cercado   | E    | 21°29'41.2<br>1"S     | 64°48'36.2<br>8"O     |         | Guadalquivir | 13.14                   | Continua |
| Lajas                     | Tarija       | Cercado   | E    | 21°23'22.8<br>5"S     | 64°44'53.1<br>0"O     |         | Guadalquivir | 335.7                   | Eventual |
| Sella Quebradas           | Tarija       | Méndez    | A    | 21°23'12.0<br>3"S     | 64°40'55.0<br>2"O     | 2119    | Guadalquivir | 147.26                  | Continua |
| Obrajes                   | Tarija       | Cercado   | A    | 21°30'20.5<br>2"S     | 64°45'45.6<br>2"O     | 1922    | Guadalquivir | 909.28                  | Continua |
| San Luis                  | Tarija       | Cercado   | A    | 21°35'17.6<br>6"S     | 64°41'10.9<br>5"O     |         | Guadalquivir | 1538.68                 | Eventual |
| Trancas                   | Tarija       | Méndez    | A    | 21°18'26.3<br>5"S     | 64°48'58.0<br>6"O     |         | Guadalquivir | 131.64                  | Eventual |
| Canasmoro                 | Tarija       | Méndez    | A    | 21°21'23.1<br>3"S     | 64°44'52.9<br>0"O     | 2085    | Guadalquivir | 234.09                  | Continua |
| San Nicolás               | Tarija       | Avilés    | A    | 21°43'50.8<br>2"S     | 64°42'7.10"<br>O      | 1800    | Camacho      | 751.37                  | Eventual |
| La Angostura              | Tarija       | Cercado   | A    | 21°42'24.2<br>9"S     | 64°35'46.8<br>9"O     |         | Guadalquivir | 3249.03                 | Eventual |
| Huacata                   | Tarija       | Méndez    | A    | 21°14'24.3<br>6"S     | 64°50'37.7<br>3"O     | 2356    | Pilaya       | 41.26                   | Continua |

Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

Las estaciones hidrométricas que poseen un registro continuo, de tal manera que permiten inferir estadísticos son las que se representan en el siguiente mapa:

<sup>12</sup>Coordenadas obtenidas en coordinación con el personal técnico del SENAMHI y el apoyo del software Google Earth, 2012

Figura 9.3. Cuencas de las Estaciones Hidrométricas Del Valle Central de Tarija con registro continuo



Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

Como se puede observar en la anterior figura, las estaciones hidrométricas que poseen un registro continuo se encuentran ubicadas en la zona centro-nor-oeste de la cuenca del Valle Central de Tarija, lo que se traduce en una regionalización de las variables en la zona de interés para fines del aprovechamiento hídrico de la serranía de Sama. En el área de las cuencas del valle de Uriondo no se dispone de alguna estación.

Los valores de precipitación total anual, han sido analizados mediante procesamiento estadístico y los valores anuales de cada estación y los valores característicos, según la distribución normal de probabilidad, se encuentran en la Tabla 9.2y en el A02 apéndice 5.1

Tabla 9.2. Valores característicos de precipitación

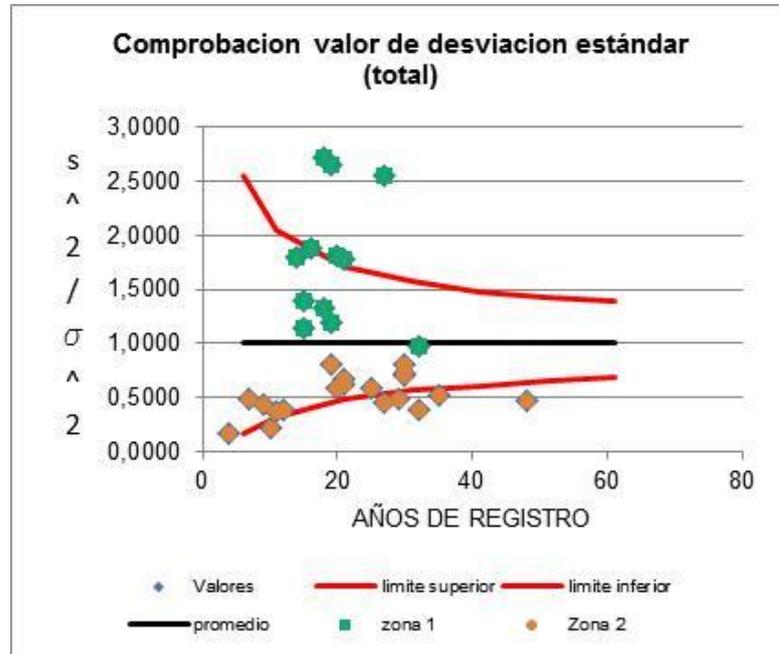
| VALORES CARACTERISTICOS DE PRECIPITACION ANUAL |          |          |        |                 |          |                     |         |                               |                                     |
|--|----------|----------|--------|-----------------|----------|---------------------|---------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Estacion                                       | Latitud  | Longitud | Altura | Numero de datos | Promedio | Desviacion standard | M log x | $\sigma$ (log x) <sup>2</sup> | $\sigma$ (log x) <sup>2</sup> /prom |
| <b>zona 1</b>                                  |          |          |        |                 |          |                     |         |                               |                                     |
| Leon Cancha                                    | -21,1783 | 64,7153  | 2729   | 20              | 522,0    | 188,8220            | 2,6892  | 0,0247                        | 1,8035                              |
| Tomayapo                                       | -21,2683 | 65,0450  | 2734   | 16              | 233,9    | 86,2068             | 2,3394  | 0,0256                        | 1,8730                              |
| El Molino                                      | -21,3886 | 64,9469  | 3387   | 14              | 465,6    | 168,2451            | 2,6397  | 0,0246                        | 1,7997                              |
| Tucumillas                                     | -21,4611 | 64,8311  | 2557   | 19              | 790,2    | 346,7881            | 2,8559  | 0,0363                        | 2,6547                              |
| San Andres                                     | -21,6233 | 64,8150  | 1987   | 32              | 987,6    | 262,6494            | 2,9792  | 0,0133                        | 0,9749                              |
| Junacas  |          |          |        | 21              | 511,6    | 183,3326            | 2,6810  | 0,0242                        | 1,7702                              |
| Gamoneda                                       |          |          |        | 19              | 487,0    | 143,1020            | 2,6688  | 0,0163                        | 1,1901                              |
| La angostura                                   |          |          |        | 15              | 339,3    | 97,8411             | 2,5125  | 0,0157                        | 1,1460                              |
| Colon Sud                                      |          |          |        | 15              | 367,2    | 116,5176            | 2,5430  | 0,0190                        | 1,3880                              |
| Sama   |          |          |        | 18              | 749,4    | 231,6180            | 2,8540  | 0,0180                        | 1,3167                              |
| Cejara   |          |          |        | 18              | 1121,2   | 498,2027            | 3,0068  | 0,0372                        | 2,7212                              |
| Guandacay                                      |          |          |        | 27              | 1057,5   | 455,6327            | 2,9840  | 0,0350                        | 2,5587                              |
| <b>zona 2</b>                                  |          |          |        |                 |          |                     |         |                               |                                     |
| Yesera   | -21,3722 | 64,5508  | 1978   | 21              | 686,0    | 145,5538            | 2,8266  | 0,0085                        | 0,6204                              |
| Trancas  | -21,3081 | 64,8158  | 2198   | 11              | 778,5    | 126,1293            | 2,8856  | 0,0050                        | 0,3618                              |
| Qda. Sellas                                    | -21,3864 | 64,6811  | 2145   | 10              | 616,4    | 77,1455             | 2,7864  | 0,0030                        | 0,2159                              |
| Coimata  | -21,4992 | 64,7889  | 2027   | 20              | 713,7    | 147,6553            | 2,8442  | 0,0081                        | 0,5900                              |
| Padcaya  | -21,5300 | 64,4300  | 2010   | 30              | 610,1    | 137,1938            | 2,7744  | 0,0095                        | 0,6970                              |
| Tarija   | -21,5467 | 64,7108  | 1849   | 48              | 596,2    | 109,0100            | 2,7681  | 0,0063                        | 0,4608                              |
| El Tejar                                       | -21,5431 | 64,7211  | 1851   | 29              | 608,8    | 114,7257            | 2,7768  | 0,0067                        | 0,4895                              |
| Sn Jacinto sud                                 | -21,6303 | 64,7200  | 1820   | 35              | 543,0    | 104,7993            | 2,7267  | 0,0070                        | 0,5135                              |
| Pinos Sud                                      | -21,7347 | 64,8783  | 2118   | 32              | 1150,9   | 192,6704            | 3,0549  | 0,0053                        | 0,3863                              |
| Chococla                                       | -21,7481 | 64,7294  | 1795   | 27              | 637,6    | 115,7480            | 2,7974  | 0,0062                        | 0,4543                              |
| Juntas   | -21,8103 | 64,7975  | 1882   | 25              | 678,1    | 138,8657            | 2,8222  | 0,0079                        | 0,5781                              |
| Cañas  | -21,9022 | 64,8508  | 2078   | 30              | 621,4    | 149,5876            | 2,7808  | 0,0109                        | 0,7987                              |
| Sn Jacinto embalse                             |          |          |        | 4               | 498,0    | 55,2516             | 2,6945  | 0,0023                        | 0,1697                              |
| Concepcion                                     |          |          |        | 9               | 437,3    | 77,1047             | 2,6341  | 0,0059                        | 0,4284                              |
| Sn Ncolas                                      |          |          |        | 12              | 488,0    | 80,5727             | 2,6825  | 0,0051                        | 0,3758                              |
| Calderillas                                    |          |          |        | 30              | 1234,3   | 282,9806            | 3,0800  | 0,0099                        | 0,7244                              |
| Laderas Centro                                 |          |          |        | 19              | 375,9    | 90,2851             | 2,5625  | 0,0109                        | 0,7953                              |
| Canas Moro                                     |          |          |        | 21              | 615,2    | 134,7748            | 2,7786  | 0,0091                        | 0,6614                              |
| Campanario                                     |          |          |        | 7               | 353,8    | 66,1827             | 2,5412  | 0,0066                        | 0,4822                              |
| Promedio                                       |          |          |        |                 | 641,1367 | 165,3289            | 2,7603  | 0,0137                        | 1,0000                              |

Con los valores de la desviación estándar al cuadrado del logaritmo de la precipitación anual y aplicando el test del chicuadro ( $c^2$ , para  $n$  grados de libertad), se puede verificar que existe una zona (denominada 1) que se encuentra en la parte superior de la cuenca y dispone de una variación de probabilidades de ocurrencia grande (valor de desviación estándar elevado), mientras que en el resto del valle, la diferencia o dispersión de los valores es menor (zona 2).

Estas dos zonas se muestran en la figura HU 4, la zona 1 abarca la parte alta de la cuenca del Guadalquivir hasta la serranía del sama, mientras que la zona 2, es la parte baja pasando Padcaya.

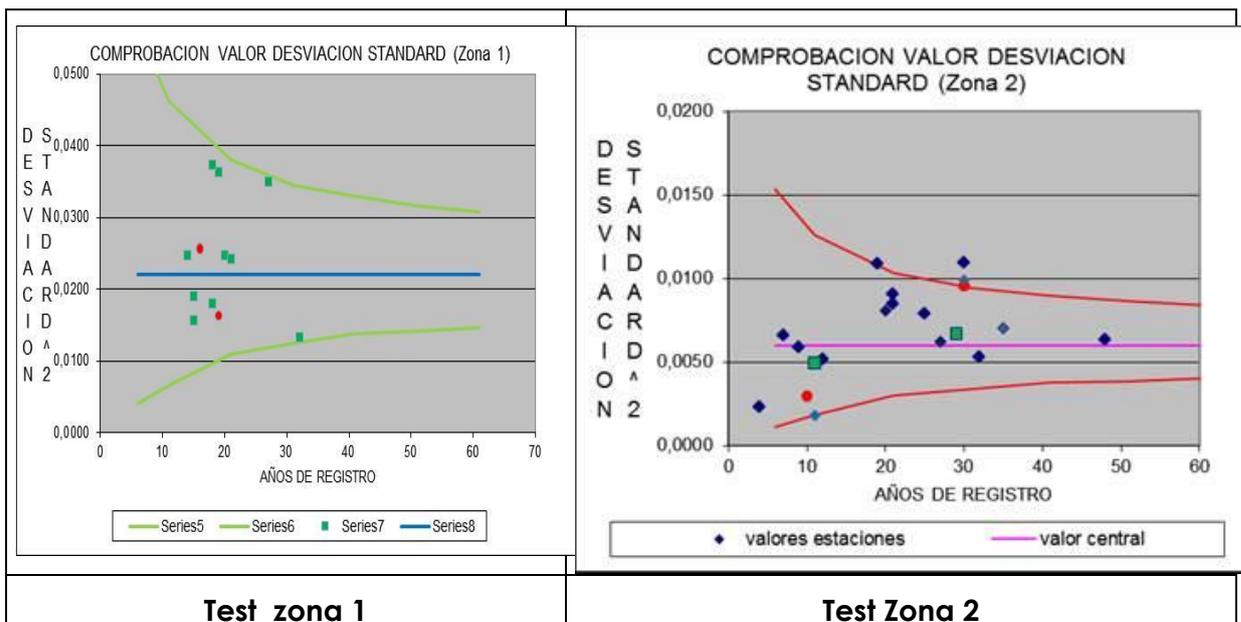
La determinación de las zonas se efectuó con el cálculo de la desviación estándar elevada a dos y el valor del chicuadro sobre un diagrama de representación del par de valores de  $s^2 - n$ , donde  $n$  es el número de años de registro. La relación se presenta en la Figura 9.4

Figura 9.4. Variabilidad de la desviación Standard de Precipitación (total)



El valor "s" corresponde a la desviación estándar de los logaritmos de los valores registrados de precipitación anual en la estación i, mientras que  $\sigma \varepsilon$  corresponde al valor tomado como representativo de la población de los logaritmos de la precipitación anual en toda la región, en este caso el promedio de todos los  $s(\log P)^2$ . En la gráfica se muestra unos valores altos, sobre 0.020 (color verde) y otros con valores menores a 0.008 (color rojo) que se agrupan. Estas series de valores han sido representados en un diagrama similar para cada zona como se muestra en la Figura 9.5. Variabilidad de la desviación Standard de Precipitación (zona 1 y 2)

Figura 9.5. Variabilidad de la desviación Standard de Precipitación (zona 1 y 2)

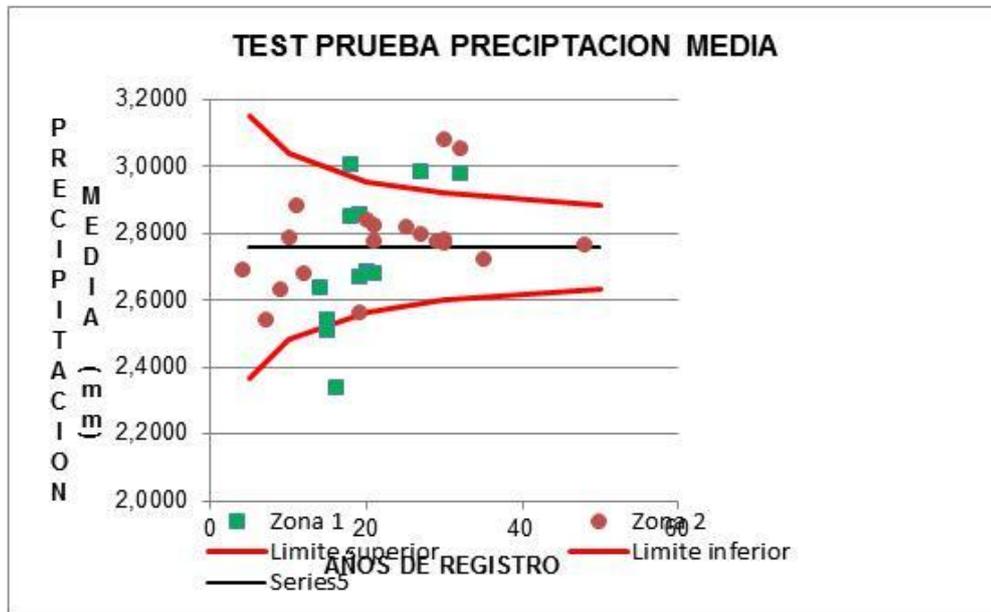


Fuente: Elaboración propia

En el test de ambas zonas, se muestra que los valores de cada estación recaen, en general, en el interno de las franjas de control, establecidas para un probabilidad de no ocurrencia del 5 %. Para la zona 1 el valor central de la desviación es de 0.1483 y en la zona 2, es 0.0806. El valor de desviación estándar representa la inclinación de la recta de probabilidad que en este caso será mayor en la zona 1 y pequeña en la zona 2.

El **valor medio de la precipitación**, tomando todos los valores de los pluviómetros muestra que no se tiene un comportamiento homogéneo y en el cual la variación solo se deba a defecto de muestreo o a un cambio climático, como se aprecia en la Figura 9.6

Figura 9.6. Variabilidad de la Precipitación media (Total)

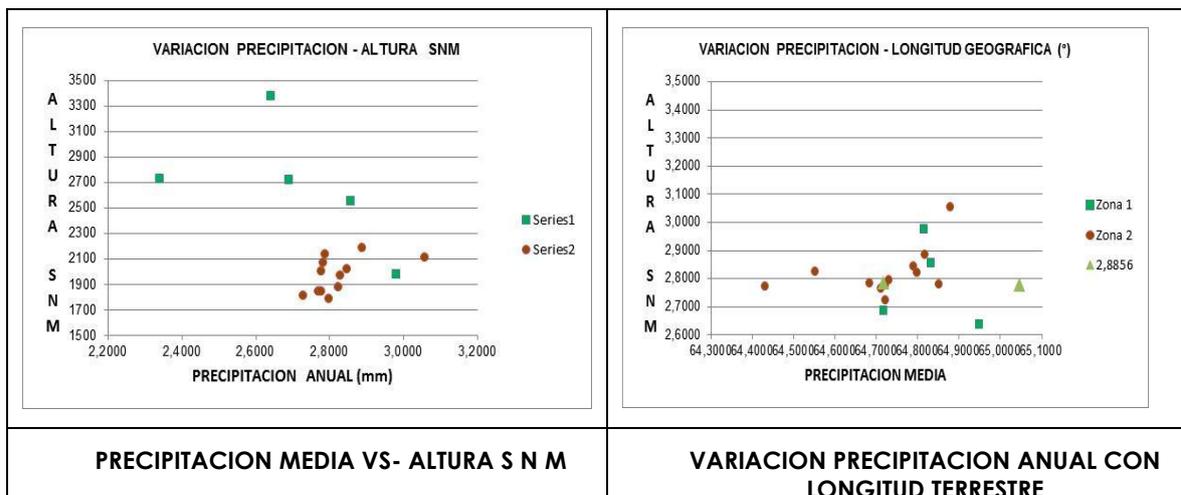


Fuente: Elaboración propia

En general se podría aceptar un único valor representativo del logaritmo de la precipitación para toda la región, porque los distintos valores de la  $M(\log P)$  están mezclados sin tendencia alguna y los que salen de la franja de control para una probabilidad del 95 % y por qué, 7 de las 27 estaciones salen de ella.

Para estar seguros, se ha dispuesto efectuar otra prueba y es la variación de la precipitación con la altura sobre el nivel del mar y en segunda instancia la variación con la longitud terrestre. La representación se muestra en la Figura 9.7

Figura 9.7. Variabilidad de la Precipitación media (Zona 1 y Zona 2)



Fuente: Elaboración propia

De la figura HU-8, se puede establecer que mientras en la zona 2, no tiene efecto la altura sobre el nivel del mar en la primera Zona parece que a medida que se asciende en cota sobre el nivel del mar, la precipitación disminuye. Y mientras que en zona 1 y 2, no tiene influencia la ubicación geográfica. Por ello es importante considerar para cada sitio de obra su localización y de la propia cuenca con lo cual se podrá estimar la precipitación media y de ella deducir los caudales tomando una distribución de ellos en las diferentes estaciones de medida.

En el caso de Uriondo los valores Registrados en la estación, son tomados en cuenta para las apreciaciones a realizar sobre caudal. La figura HU-9 muestra la variación anual y las franjas fiduciaras o límites que muestran que estadísticamente todos los valores pertenecen a una misma población. De las estaciones mostradas en la figura HU 4

Existen diversos modelos hidrológicos que fueron empleados regionalmente, y que permiten realizar la transformación lluvia-caudal, para obtener valores de los caudales medios mensuales, entre los cuales se pueden mencionar:

- Modelo del PRONAR.- El modelo es relativamente sencillo, de pocos parámetros, definido a través de la fórmula  $Vesc_m = (P_m - 15) * 0.75 * C * A$ , en donde A es el área de la cuenca en  $km^2$ , C es el coeficiente de escorrentía anual adimensional,  $P_m$  es la precipitación media mensual en m, y  $Vesc_m$  es el volumen de escorrentía media mensual en  $Hm^3$ . La desventaja del modelo es que produce valores bajos del caudal medio mensual durante el periodo de estiaje.
- Modelo del Coeficiente de Esguerrimiento Anual<sup>13</sup>.- Es el modelo empleado en el estudio "Recursos Hídricos Superficiales y sus Posibilidades de Aprovechamiento en el Departamento de Tarija". El modelo se basa en la calibración de ecuaciones regionales basadas en parámetros hidrológicos de las cuencas de análisis, para su posterior aplicación en las cuencas donde se requiere determinar los valores de los caudales medios mensuales, considerando los coeficientes de distribución mensual regionalizados. Éste modelo es relativamente sencillo y es el más versátil en la determinación de los caudales medios mensuales, por lo que se empleará en esta oportunidad, debido a que proporciona una plataforma para la estimación de caudales medios mensuales considerando el desarrollo de escenarios afectados por el cambio climático.

<sup>13</sup>Recursos Hídricos Superficiales y sus Posibilidades de Aprovechamiento en el Departamento de Tarija, 2008. Alfonso Vacaflores.

El nivel de análisis requerido es mensual, para poder determinar los valores de la época de estiaje y época húmeda, es por ello que se realizó primeramente un análisis del modelo a ser empleado para determinar los caudales medios mensuales.

### **Generación de caudales medios mensuales**

Con los valores de las precipitaciones medias anuales de las estaciones pluviométricas, de la manera obtenida en los párrafos anteriores se puede establecer la variación de la precipitación media mensual.

Con los valores registrados en las estaciones hidrométricas y la evaluación de la precipitación media areal de la cuenca delimitada en el punto de desembocadura coincidente con la ubicación de la estación hidrométrica, se determinaron los parámetros siguientes:

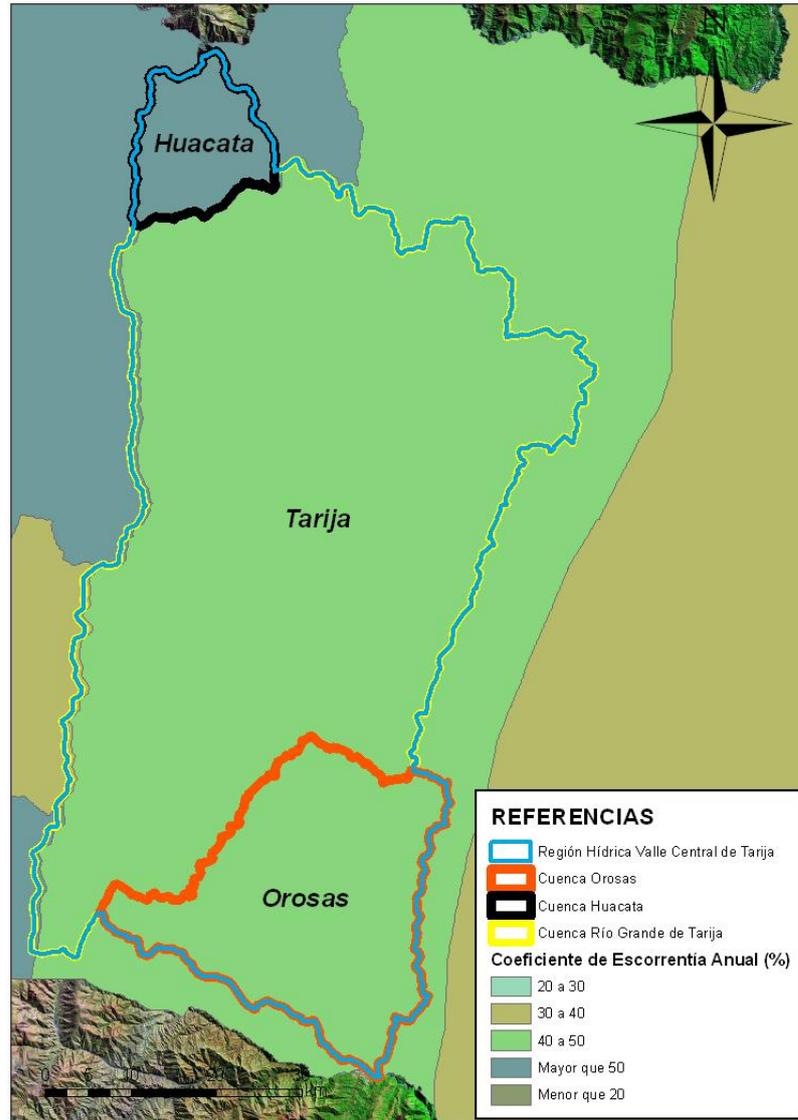
Tabla 9.3. Parámetros hidrológicos de las cuencas delimitadas en el sitio de ubicación de las Estaciones Hidrométricas de Registro Continuo

| Estacion        | Coefficiente de Escorrentía Anual | Área (km <sup>2</sup> ) | Caudal medio anual (m <sup>3</sup> /s) | Precipitación (mm) | Caudal específico (l/s/km <sup>2</sup> ) |
|-----------------|-----------------------------------|-------------------------|--|--------------------|--|
| Tolomosa        | 0.337                             | 336.020                 | 3.672                                  | 1022.7             | 10.927                                   |
| Tolomosita      | 0.415                             | 73.960                  | 0.966                                  | 992.6              | 13.059                                   |
| San Jacinto     | 0.509                             | 438.260                 | 6.703                                  | 948.1              | 15.294                                   |
| Coimata         | 0.350                             | 13.140                  | 0.117                                  | 798.2              | 8.901                                    |
| Canasmoro       | 0.287                             | 234.090                 | 1.503                                  | 706.5              | 6.422                                    |
| Sella Quebradas | 0.187                             | 147.260                 | 0.530                                  | 605.1              | 3.597                                    |
| Obrajes         | 0.254                             | 909.280                 | 5.048                                  | 687.9              | 5.551                                    |
| Huacata         | 0.289                             | 41.260                  | 0.321                                  | 849.4              | 7.782                                    |

Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

Un mapa que corresponde al PRONAR expone rangos de valores aproximados del Coeficiente de Escorrentía Anual (CEA) para zonas de análisis amplias en su extensión, y es así que las cuencas de la región del proyecto, está contenida en una franja que establece valores del CEA comprendidos entre 40 y 50 %. El mapa de referencia se presenta a continuación:

Tabla 9.4. Coeficiente de Escorrentía Anual PRONAR

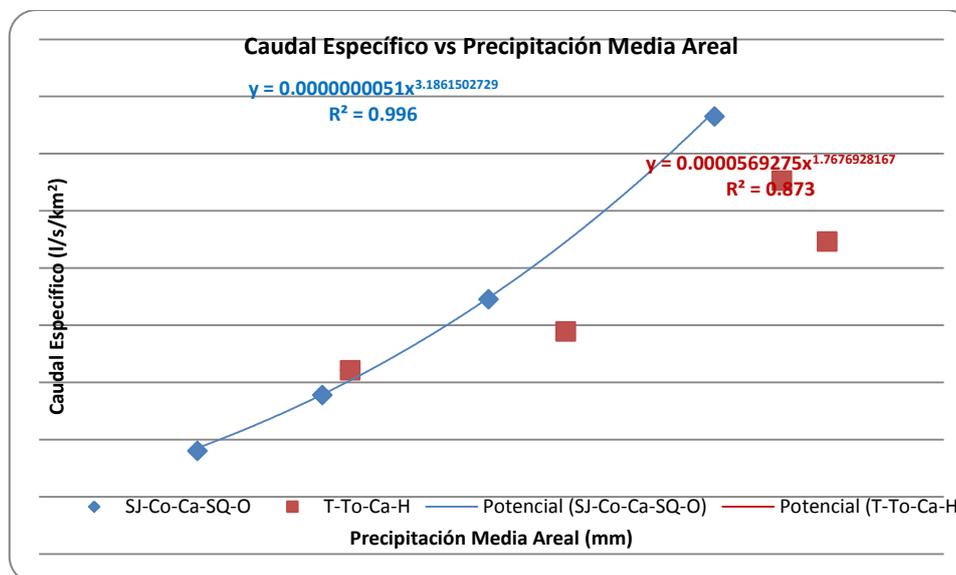


Fuente: Elaboración propia en base a información del PRONAR (2001)

Es evidente que los valores son referenciales y que para los fines del alcance de este estudio, únicamente nos sirve para comparar que el 50 % de los valores estimados y presentados en la anterior tabla, se acercan al valor propuesto por el PRONAR, y es por las condiciones locales de las cuencas que ese valor para algunos casos como ser la cuenca Sella Quebradas se encuentra bastante alejada del rango PRONAR debido principalmente a las escalas de trabajo para su determinación.

Al observar la correlación entre la precipitación media areal y el caudal específico, es evidente la presencia de dos zonas que poseen un comportamiento diferenciado por las condiciones regionales, y se puede:

Figura 9.8. Función de correlación entre Precipitación Media Areal y el Caudal Específico



Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (SJ: San Jacinto, Co: Coimata, Ca: Canasmoro, SQ: Sella Quebradas, O: Obrajés, T: Tolomosa, To: Tolomosita, H: Huacata) (Periodo de registro variable)

Al observar el mapa de las cuencas que corresponden con las estaciones hidrométricas de registro continuo, y considerando la correlación anteriormente descrita, se observa que las zonas estarían comprendidas, la primera en la franja nor-oeste del área de estudio para el caso de la correlación Potencial (T-To-Ca-H) y la segunda en la franja centro-nor-oeste del área de estudio para el caso de la correlación Potencial (SJ-Co-Ca-SQ-O), la primera restringida a cuencas de las propias nacientes y relativamente más pequeña área de aporte, y la segunda para cuencas de un tamaño más significativo y consecuentemente.

Si bien el anterior gráfico nos permite encontrar el caudal específico de una cuenca, conocido el valor de la precipitación media areal, es necesario luego distribuir el caudal medio anual en los diferentes meses del año.

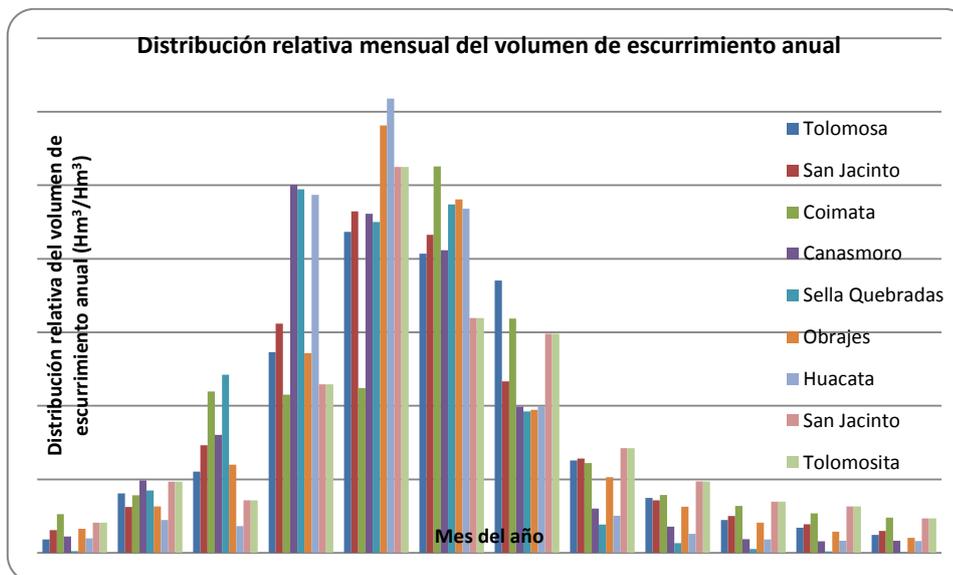
Para ello, se procede a analizar la distribución media mensual del volumen de escurrimiento medio anual, que está directamente relacionado con la distribución media mensual de los caudales que escurren en las estaciones hidrométricas. En el siguiente gráfico se puede observar un comportamiento regional de la distribución de caudales medios mensuales, independiente de la magnitud del caudal que escurre y del área de la cuenca y se lo ha expresado como valor de relación del volumen mensual al volumen total que se midió en la estación, sobre la escorrentía media de la cuenca en la cual existen datos como se muestra en la Tabla 9.5 y en la Figura 9.9.

Tabla 9.5. Coeficiente de distribución media mensual del volumen de escurrimiento medio anual

| Estación        | Volumen Relativo de Escurrimiento Medio Mensual (Hm <sup>3</sup> /Hm <sup>3</sup> ) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | Total |
|-----------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 | Oct   | Nov   | Dic   | Ene   | Feb   | Mar   | Abr   | May   | Jun   | Jul   | Ago   | Sep   |       |
| Tolomosa        | 0.009   | 0.040 | 0.055 | 0.137 | 0.218 | 0.203 | 0.185 | 0.063 | 0.037 | 0.022 | 0.017 | 0.012 | 1.000 |
| Tolomosita      | 0.021   | 0.048 | 0.036 | 0.115 | 0.262 | 0.160 | 0.149 | 0.071 | 0.049 | 0.035 | 0.032 | 0.023 | 1.000 |
| San Jacinto     | 0.015   | 0.031 | 0.073 | 0.156 | 0.232 | 0.216 | 0.117 | 0.064 | 0.036 | 0.025 | 0.019 | 0.015 | 1.000 |
| Coimata         | 0.026   | 0.039 | 0.110 | 0.108 | 0.112 | 0.263 | 0.159 | 0.061 | 0.039 | 0.032 | 0.027 | 0.024 | 1.000 |
| Canasmoro       | 0.011   | 0.049 | 0.080 | 0.250 | 0.231 | 0.206 | 0.099 | 0.030 | 0.018 | 0.009 | 0.008 | 0.008 | 1.000 |
| Sella Quebradas | 0.001   | 0.042 | 0.121 | 0.247 | 0.225 | 0.237 | 0.096 | 0.019 | 0.007 | 0.003 | 0.001 | 0.000 | 1.000 |
| Obrajés         | 0.016   | 0.032 | 0.060 | 0.136 | 0.291 | 0.240 | 0.097 | 0.052 | 0.031 | 0.021 | 0.014 | 0.010 | 1.000 |
| Huacata         | 0.010   | 0.022 | 0.018 | 0.243 | 0.309 | 0.234 | 0.100 | 0.025 | 0.013 | 0.009 | 0.008 | 0.008 | 1.000 |

Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

Figura 9.9. Distribución relativa media mensual del volumen de escurrimiento anual

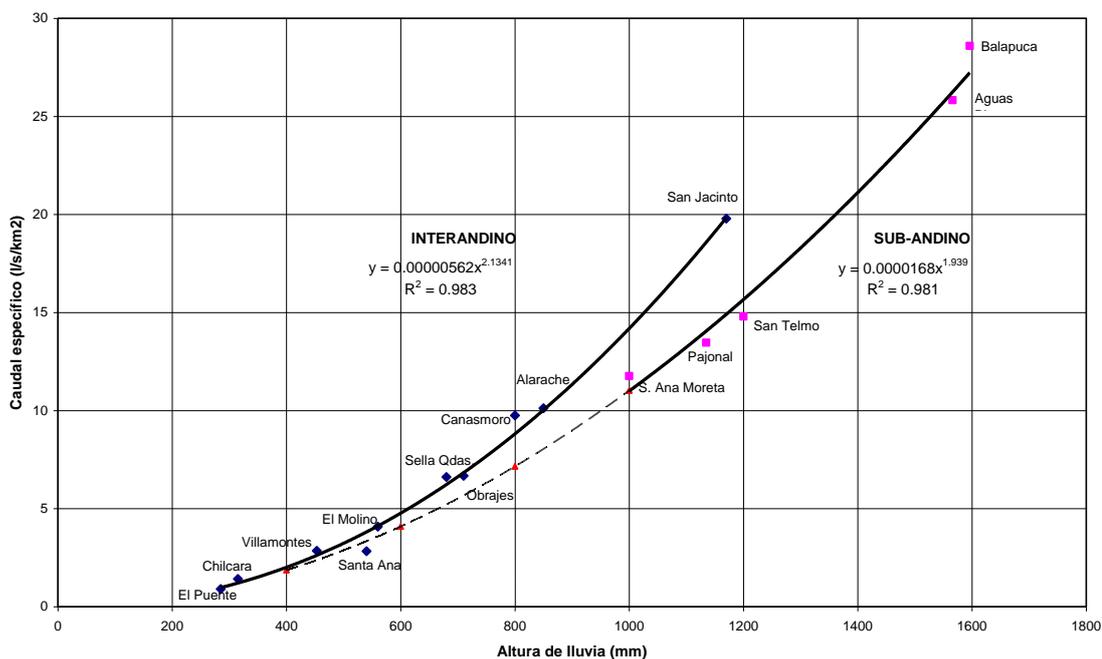


Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

La metodología empleada en este informe para la obtención de caudales medios mensuales en las cuencas de las fuentes superficiales actuales, en esta oportunidad permitió ajustar las curvas de correlación de caudales específicos y la precipitación media anual areal de las cuencas. Pues en el informe "Recursos Hídricos Superficiales y sus Posibilidades de Aprovechamiento en el Departamento de Tarija" (2008), existen dos curvas de correlación, en la que una de ellas coincide en la dependencia funcional de los caudales específicos y precipitaciones medias anuales areales de las cuencas delimitadas en el sitio de ubicación de las estaciones hidrométricas de Canasmoro, Sella Quebradas, Obrajes y San Jacinto, con ecuaciones similares de las curvas de ajuste. En esta oportunidad también se encontró otra curva de correlación, que describe el comportamiento de las cuencas que tienen más de nacimiento y de la zona nor-oeste de la cuenca.

En la siguiente imagen se muestra la curva de correlación encontrada en el informe de referencia, del párrafo precedente.

Figura 9.10. Correlación de caudales específicos medios anuales en relación a la precipitación media anual areal



Fuente: Recursos Hídricos Superficiales y sus Posibilidades de Aprovechamiento en el Departamento de Tarija (2008)

Con los valores estimados se procedió a calcular los caudales medios anuales de las cuencas de aporte de las fuentes de agua potable en los sitios en los cuales se tiene obras o en el futuro se dispondrá de ellas, considerando la precipitación media anual areal de cada una de las cuencas y el área respectiva.

A continuación se presentan los caudales medios anuales de la fuente superficial para Uriondo

Tabla 9.6. Caudal medio anual estimado en las cuencas de Alisos

| Municipio | Fuente                   | Tipo de Toma   | Área (km <sup>2</sup> ) | Precipitación Media Areal (mm) | Ecuación adoptada Q <sub>esp</sub> | Caudal Específico Estimado (l/s/km <sup>2</sup> ) | Caudal Medio Anual Estimado (l/s) |
|-----------|--------------------------|----------------|-------------------------|--------------------------------|------------------------------------|---|-----------------------------------|
| Uriondo   | Alisos                   | Subsuperficial | 136.600                 | 1021.3322                      | Potencial (SJ-Co-Ca-SQ-O)          | 19.7346   | 2695.7473                         |
|           | <b>Sub-Total Uriondo</b> |                |                         | <b>1021.3322</b>               |                                    | <b>19.7346</b>                                    | <b>2695.7473</b>                  |

Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

A continuación se presentan los valores de los caudales medios mensuales para la zona de estudio:

Tabla 9.7. Caudal medio mensual de las fuentes superficiales actuales

| Municipio | Fuente                   | Caudal medio mensual (m <sup>3</sup> /s) |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    | Caudal Medio Anual (m <sup>3</sup> /s) |
|-----------|--------------------------|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|
|           |                          | Oct                                      | Nov                | Dic                | Ene                | Feb                | Mar                | Abr                | May                | Jun                | Jul                | Ago                | Sep                |  |
| Uriondo   | Alisos                   | 0.44<br>54                               | 1.23<br>22         | 2.23<br>74         | 5.62<br>65         | 7.60<br>25         | 7.11<br>34         | 4.05<br>43         | 1.55<br>81         | 0.92<br>92         | 0.63<br>01         | 0.51<br>04         | 0.40<br>94         | 2.695<br>7                             |
|           | <b>Sub-Total Uriondo</b> | <b>0.44<br/>54</b>                       | <b>1.23<br/>22</b> | <b>2.23<br/>74</b> | <b>5.62<br/>65</b> | <b>7.60<br/>25</b> | <b>7.11<br/>34</b> | <b>4.05<br/>43</b> | <b>1.55<br/>81</b> | <b>0.92<br/>92</b> | <b>0.63<br/>01</b> | <b>0.51<br/>04</b> | <b>0.40<br/>94</b> | <b>2.695<br/>7</b>                     |

Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

## 10. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

### 10.1 ESTUDIOS RELACIONADOS CON LAS FUENTES FUTURAS POTENCIALES

Los principales estudios relacionados con las fuentes futuras potenciales de agua son los siguientes:

Tabla 10.1. Estudios relacionados con las fuentes superficiales futuras

| Institución  | Título  | Autor  | Año  |
|--|---|--|------|
| Prefectura del Departamento de Tarija / PNUD   | Recursos Hídricos Superficiales y sus Posibilidades de Aprovechamiento en el Departamento de Tarija | Ing. Alfonso Vacaflores                            | 2008 |
| Ministerio del Agua  | Estudio de Factibilidad para la provisión de servicios de agua potable y alcantarillado sanitario   | FICHTNER / KFW                                     | 2009 |
| Gobierno Municipal de Uriondo  | Plan Municipal de Ordenamiento Territorial (del Municipio de Uriondo)                               | Consultora SIC                                     | 2008 |
| Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del Río Pilcomayo / Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo / Comisión Europea  | Balance Hídrico Superficial de la Cuenca Alta del Río Pilcomayo                                     | IHH-UMSA   | 2006 |
| Proyecto de Zonificación Agroecológica y Establecimiento de una Base de Datos y Red de Sistema de Información Geográfica en Bolivia (ZONISIG) / Cooperación del Gobierno de los Países Bajos / Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación | Zonificación Agroecológica y Socioeconómica - Departamento de Tarija                                | DHV Consultores - ITC (Holanda) / Proyecto ZONISIG | 2001 |
| Programa Nacional de Riego (PRONAR) / Ministerio de Agricultura y Ganadería y Desarrollo Rural   | Inventario Nacional de Riego  | PRONAR   | 2000 |

Fuente: Elaboración propia

### 10.2 CAUDAL DISPONIBLE EN LAS FUENTES FUTURAS POTENCIALES

Alternativas para el municipio de Uriondo no se contemplaron en éste capítulo, puesto que el caudal que escurre en la actual obra de toma de Alisos es suficiente para atender la demanda en un horizonte de años bastante amplio, como fue descrito en la Etapa I del PMM-Valle Central de Tarija (Diagnóstico de la Situación Actual del Servicio).

## 11. ESCENARIO PROBABILÍSTICO

Para desarrollar el escenario probabilístico de la oferta hídrica, se requiere adoptar un periodo de diseño para las obras de captación. El periodo de diseño está definido en para los sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario en las normas bolivianas NB688 y NB689:

Con tal periodo de diseño se calculó la probabilidad de no ocurrencia igual a 95%, y los valores probabilísticos de no ocurrencia de las precipitaciones medias anuales probabilísticas areales para cada cuenca de interés. Con las precipitaciones medias anuales probabilísticas areales se determinó el valor del caudal mínimo mensual probabilístico para un periodo de diseño igual a 20 años, empleando el modelo del coeficiente de escurrimiento anual. Se presenta a continuación los valores encontrados:

Tabla 11.1. Caudal mínimo probabilístico mensual de las fuentes superficiales actuales

PARA UN PERIODO DE DISEÑO DE 20 AÑOS

| Municipio | Fuente                   | Caudal medio mensual (m <sup>3</sup> /s) |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               | Caudal Medio Anual (m <sup>3</sup> /s) |
|-----------|--------------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--|
|           |                          | Oct                                      | Nov           | Dic           | Ene           | Feb           | Mar           | Abr           | May           | Jun           | Jul           | Ago           | Sep           |  |
| Uriondo   | Alisos                   | 0.0900                                   | 0.2491        | 0.4522        | 1.1373        | 1.5367        | 1.4379        | 0.8195        | 0.3149        | 0.1878        | 0.1274        | 0.1032        | 0.0828        | 0.5449                                 |
|           | <b>Sub-Total Uriondo</b> | <b>0.0900</b>                            | <b>0.2491</b> | <b>0.4522</b> | <b>1.1373</b> | <b>1.5367</b> | <b>1.4379</b> | <b>0.8195</b> | <b>0.3149</b> | <b>0.1878</b> | <b>0.1274</b> | <b>0.1032</b> | <b>0.0828</b> | <b>0.5449</b>                          |

Fuente: Elaboración propia

Con los valores probabilísticos del caudal mínimo disponible en las fuentes superficiales se procedió a determinar los valores de la oferta hídrica probabilística:

Tabla 11.2. Oferta mínima probabilística mensual para un periodo de diseño de 20 años

| Municipio | Fuente                   | Caudal Medio Mensual (m <sup>3</sup> /s) |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
|-----------|--------------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|           |                          | Oct                                      | Nov           | Dic           | Ene           | Feb           | Mar           | Abr           | May           | Jun           | Jul           | Ago           | Sep           |               |
| Uriondo   | Alisos                   | 0.0250                                   | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        |
|           | <b>Sub-Total Uriondo</b> | <b>0.0250</b>                            | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> |

Fuente: Elaboración propia

### a) Escenario bajo influencia del cambio climático

Para desarrollar el escenario de la oferta hídrica bajo influencia del cambio climático, se requiere adoptar un modelo de cambio climático para el Proyecto

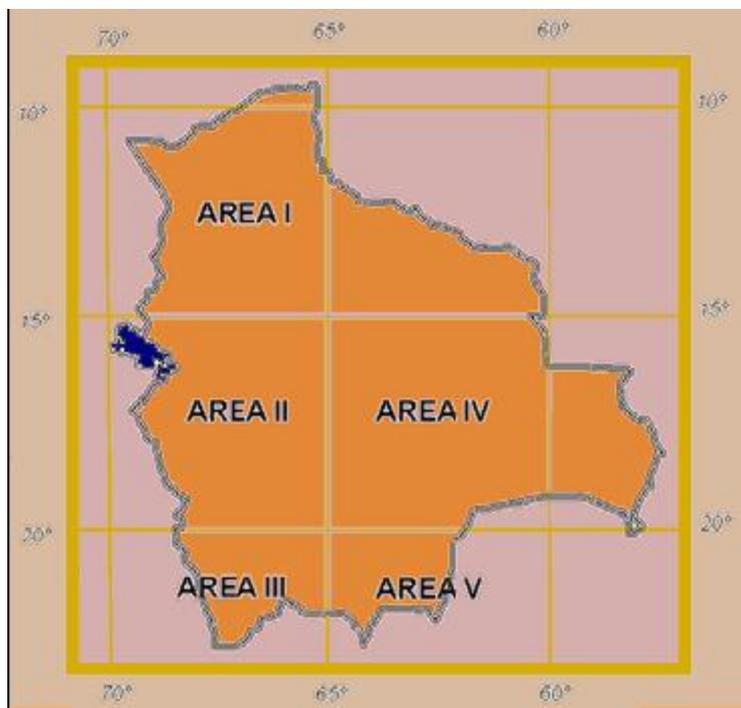
Los modelos de cambio climático que se han empleado para analizar las variaciones de temperatura, precipitación y caudal, difieren en su metodología y datos a ser aplicados. Entre los documentos que detallan la aplicación de modelos de cambio climático en el área de estudio, se tienen:

- Análisis del impacto de posibles cambios climáticos en la hidrología superficial de la cuenca del Río Bermejo, Formulación del Programa Estratégico de Acción para la Cuenca del Río Bermejo, 1999
- Primera Comunicación Nacional ante la Convención de Cambio Climático, Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación, 2000

El primer documento detalla la aplicación del modelo de Wigley y Jones (1985), sin embargo, su aplicación es para caudales anuales, y para ello se debe realizar la estimación de parámetros de cambio de la precipitación y la evapotranspiración potencial.

En el segundo documento, existen conclusiones importantes sobre el cambio en la temperatura y la precipitación, a partir de la aplicación de modelos de cambio climático en cinco zonas del territorio nacional, la que corresponde al área de estudio es la Zona V, como se observa en la siguiente imagen:

Figura 11.1. Áreas climáticas para el uso de los modelos de circulación general



Fuente: Mapa N°3 de la Primera Comunicación Nacional ante la Convención de Cambio Climático (2000)

En el documento de referencia se analizaron varios escenarios climáticos que poseen las siguientes características:

- El SENAMHI combinó los programas MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse gas Induced Climate Change) y el SCENGEN (SCENARIO GENERATOR). El primero de ellos presenta las estimaciones de las concentraciones de GEI, y la temperatura global entre los años 1990 al 2100; en tanto el segundo combina los resultados del MAGICC y los MCG.
- El trabajo realizado por el SENAMHI contempla tres escenarios globales de cambio climático: IS92a (considerado como escenario de referencia por el Comité de Negociaciones de la CMNUCC, estima un rango medio de emisiones futuras, asumiendo un grado modesto de intervención para reducir emisiones de GEI, se considera como escenario de referencia), IS92c5 (escenario optimista) y IS92e (escenario pesimista), respectivamente.
- El escenario IS92a hace las siguientes consideraciones; la población tendrá un incremento hasta el año 2100 alcanzando 11.3 mil millones, el crecimiento económico será de 2.9% hasta el año 2025 y de 2,3% hasta el año 2100, el costo de la energía solar bajará a 0,075 Kw/h, el costo de petróleo será 70 \$US /barril. El esfuerzo de reducción de los países desarrollados será para mediados del próximo siglo.
- El escenario IS92c hace las siguientes consideraciones: la población alcanzaría 6.4 mil millones de habitantes para el año 2100. El crecimiento económico será de 2.0% hasta el año 2025 y 1.2% hasta el año 2100. El consumo global de energía es de 8.000 EJ de petróleo convencional y 7.300 EJ de gas natural. El costo de la energía nuclear disminuye anualmente en 0.4%.

- El escenario IS92e considera incremento de población hasta el 2100 de 11,3 billones, crecimiento económico de 3.5% entre el 1990 y el 2025 y posteriormente de 3.0% hasta el 2100 e incremento de la energía fósil del 30%.
- Ambos modelos consideran la existencia de medidas de control y acuerdos internacionales y esfuerzos de reducción de emisiones de los países en desarrollo a partir de mediados de siglo.

Las conclusiones abordadas en el documento a propósito de dos estudios desarrollados:

- Una comparación entre ambos estudios (PNCC, 1997 y SENAMHI, 1998) es difícil de realizar toda vez que los puntos de partida son diferentes, sin embargo en términos generales se aprecia comportamientos similares en los resultados.
- En la Cuenca del Plata, relacionada con el área V, se puede apreciar también aumento de temperaturas, sin embargo los estudios difieren en cuanto a precipitación toda vez que en un caso se presentaría reducción de precipitación y en el otro (SENAMHI) incremento.

Para el presente estudio se adoptó la influencia del cambio climático bajo un escenario pesimista (IS92e), para el cual las variaciones de la precipitación son como se expone en el siguiente cuadro:

Tabla 11.3. Variación de la precipitación en relación a la normal (periodo 1961-1990) en los diferentes modelos de circulación general (HADCM2. UKHI. GISSEQ) PARA EL ESCENARIO IS92E

|               | 2030        |                | 2050        |                | 2100        |                |
|---------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|
| AREA V        |             |                |             |                |             |                |
| Meses secos   | (-13) a 21% | (-0.6) a 4.2mm | (-19) a 33% | (-0.9) a 7 mm  | (-63) a 68% | (-1.8) a 14 mm |
| Meses húmedos | (-8) a 22%  | (-3) a 30mm    | (-13) a 34% | (-4.4) a 63 mm | (-25) a 69% | (-9) a 127 mm  |

Fuente: Tabla 3.6 de la Primera Comunicación Nacional ante la Convención de Cambio Climático (2000)

Para el análisis de la influencia del cambio climático se adoptaron las condiciones más pesimistas del modelo, considerando el horizonte de análisis del año 2036, para lo cual la precipitación tiene una variación porcentual de -19 % en los meses secos y de -13% en los meses húmedos.

Estableciendo que los meses secos se encuentran comprendidos entre Abril y Septiembre, y los meses húmedos en los restantes del año, se procedió a encontrar los valores medios mensuales de la precipitación bajo la influencia de un escenario de cambio climático pesimista, y consiguientemente afectados por los porcentajes que corresponden a cada periodo (seco y húmedo). Una vez encontrada la precipitación media mensual areal para cada cuenca, se procedió a determinar el caudal medio mensual aplicando el modelo del coeficiente de escorrentía anual.

Tabla 11.4. Caudal medio mensual de las fuentes superficiales actuales para un escenario pesimista de cambio climático

| Municipio | Fuente                   | Caudal Medio Mensual (m <sup>3</sup> /s) |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               | Caudal Medio Anual (m <sup>3</sup> /s) |
|-----------|--------------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--|
|           |                          | Oct                                      | Nov           | Dic           | Ene           | Feb           | Mar           | Abr           | May           | Jun           | Jul           | Ago           | Sep           |  |
| Uriondo   | Alisos                   | 0.2829                                   | 0.7827        | 1.4211        | 3.5738        | 4.8289        | 4.5183        | 2.5752        | 0.9897        | 0.5902        | 0.4003        | 0.3242        | 0.2600        | 1.7123                                 |
|           | <b>Sub-Total Uriondo</b> | <b>0.2829</b>                            | <b>0.7827</b> | <b>1.4211</b> | <b>3.5738</b> | <b>4.8289</b> | <b>4.5183</b> | <b>2.5752</b> | <b>0.9897</b> | <b>0.5902</b> | <b>0.4003</b> | <b>0.3242</b> | <b>0.2600</b> | <b>1.7123</b>                          |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11.5. Caudal medio mensual de las fuentes superficiales actuales para un escenario pesimista de cambio climático

| Municipio | Fuente                   | Caudal medio mensual (m <sup>3</sup> /s) |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               | Caudal Medio Anual (m <sup>3</sup> /s) |               |
|-----------|--------------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--|---------------|
|           |                          | Oct                                      | Nov           | Dic           | Ene           | Feb           | Mar           | Abr           | May           | Jun           | Jul           | Ago           | Sep           |  |               |
| Uriondo   | Alisos                   | 0.0250                                   | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250                                 | 0.0393        |
|           | <b>Sub-Total Uriondo</b> | <b>0.0250</b>                            | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b>                          | <b>0.0393</b> |

Fuente: Elaboración propia

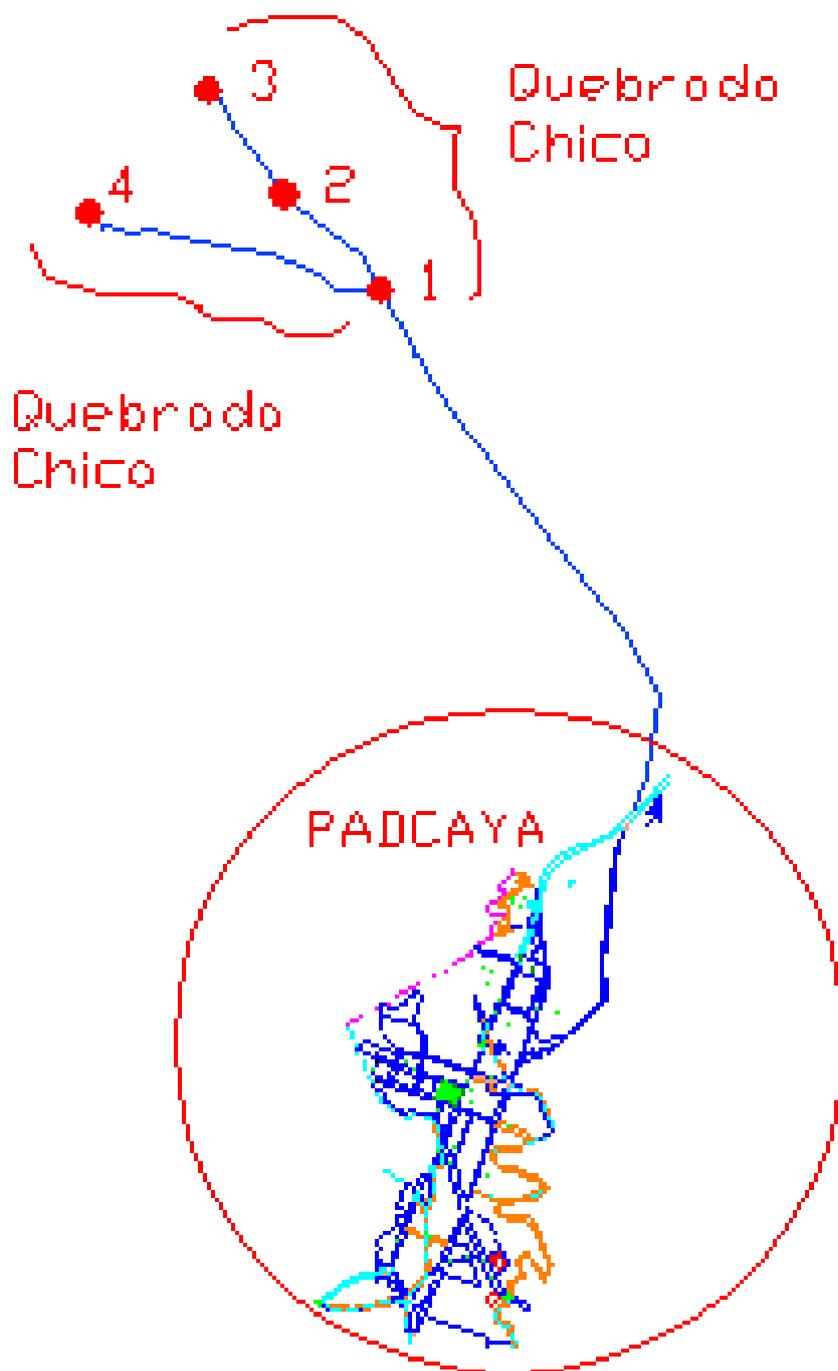
## MUNICIPIO DE PADCAYA

### 12. CUENCAS HIDROGRAFICAS Y CAUDAL DISPONIBLE

La fuente actual de agua superficial, se encuentra en la cuenca hidrográfica de la quebrada de Huacanqui, en la cual existen 5 galerías filtrantes, como obras de toma, unida a una línea de aducción.

Las 4 obras de toma son galerías filtrantes que se encuentran a pocos centímetros de profundidad del lecho de los ríos (denominada a partir de ahora numeralmente como se especifica en la Figura 12.1).

Figura 12.1. Obras de toma



La quinta y última obra de toma está ubicada en la parte alta de la quebrada Huacanqui, al lado de la tercera galería filtrante, fue construida a través de la prefectura y puesto en funcionamiento en Agosto 2008 y es la que actualmente presta servicio

En la fuente superficial actual de Padcaya, para el abastecimiento de agua potable, no se realizan mediciones o se llevan registros del caudal que escurre en la misma o que circula por la obra de captación, y esporádicamente, cuando se efectuó un diseño de obra de captación, se realizan mediciones, solamente del agua captada y no así del agua que escurre por el sitio de la obra de toma de la fuente superficial.

De los últimos estudios se dispone de las siguientes mediciones

Tabla 12.1. AFOROS-PADCAYA

| AFORADO POR:         | SITIO DE AFORO  | Q (l/s) FECHA                         |
|----------------------|---|---------------------------------------|
| UNASBAVI PROY. JIC.  | Sitio de aforo tanque                                 | 6l/s 23-10-2004                       |
| UNASBAVI PROY. JIC.  | 5m agua arriba Obra de toma existente (1)             | 3l/s 23-10-2004                       |
| Ing. Mauren Castillo | 1.5 Km. aguas arriba Obra de tomas existentes (3)     | 2l/s 05-11-2004                       |
| FICHTNER - SID       | Ingreso al tanque de almacenamiento<br>Obra de toma 5 | 6.11 l/s - 4/2006<br>2 l/s 24/10/2008 |

Fuente: Elaboración propio

Estos valores de medición a través del presente estudio se buscará confirmarlos para ser utilizados en el estudio del Plan Maestro y analizar el efecto que tendrá sobre ellos por el cambio climático.

El estudio, ante la ausencia de información utilizará la metodología de la verosimilitud hidrológica aplicando criterios aéreos o de similitud con las cuencas próximas a la cuenca del Huacanqui, sobre la base de la información de precipitación y la del balance hidrológico, dado por la expresión

$$P = E - p$$

Donde P es la precipitación anual (en mm)

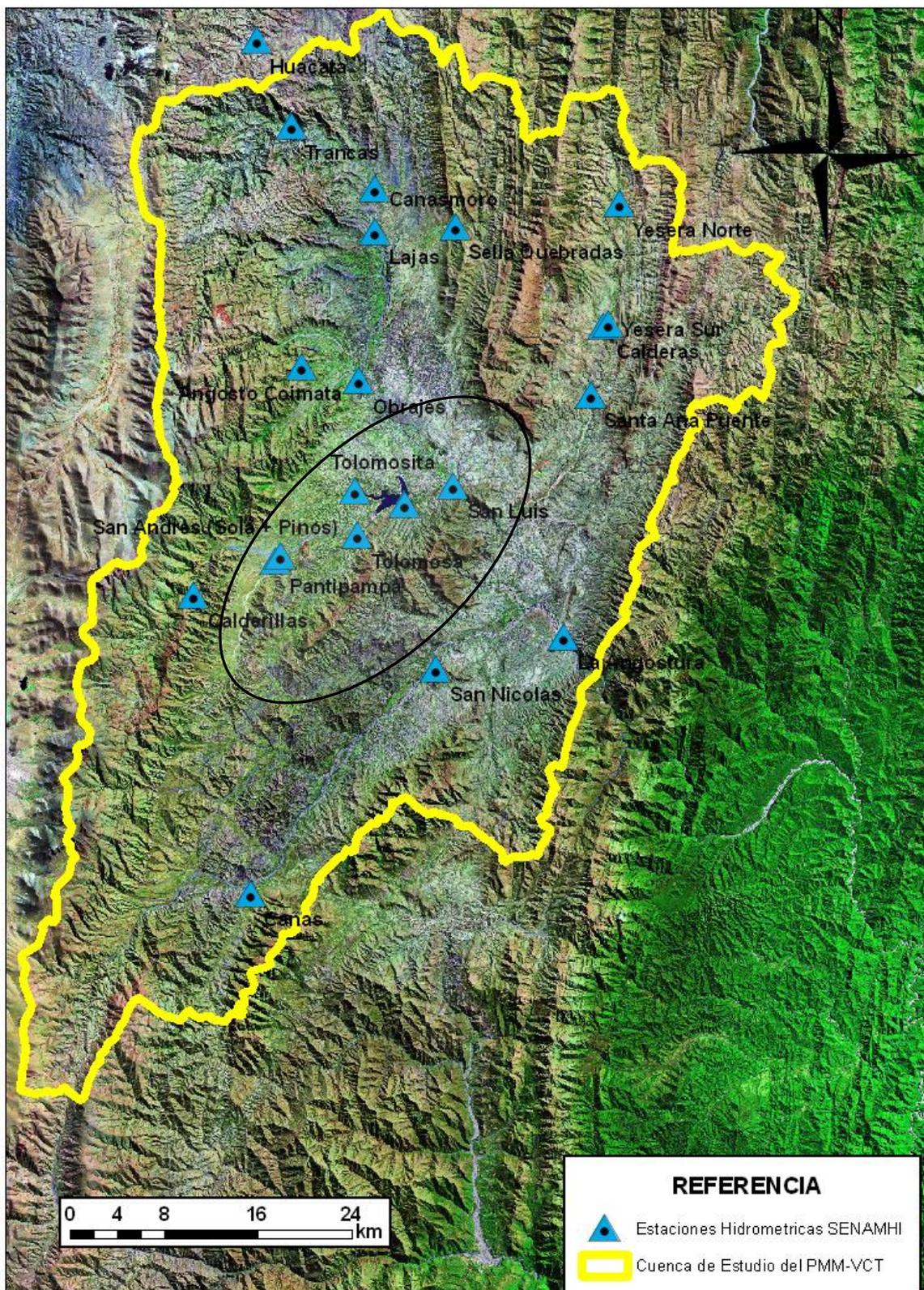
- E es la escorrentía anual (en mm)
- p son las pérdidas debido a la infiltración (i), la Evapotranspiración (Et), el escurrimiento, etc. Cuya información es difícil obtener o no existe. De todas ellas la mayor pérdida está en la evapotranspiración como una función de la temperatura

Cuyos valores en el transcurso de los años yendo de año tras año se complementan, cumpliendo la ecuación anterior, y por ello para una determinada probabilidad de ocurrencia de precipitación, también se cumple la ecuación anterior para esa determinada probabilidad de ocurrencia, para una determinada área en la cual las condiciones de precipitación y aquellas de clima, vegetación, uso del suelo, etc., son similares.

Las estaciones hidrométricas que se tienen en la cuenca de Rio grande de Tarija y del Bermejo como cursos principales del drenaje del valle central de Tarija y del rio Guadalquivir, hasta la Angostura, se muestran en la figura HP-1 y su registro..... mientras que la precipitación tiene información que aparece en la figura HP-2

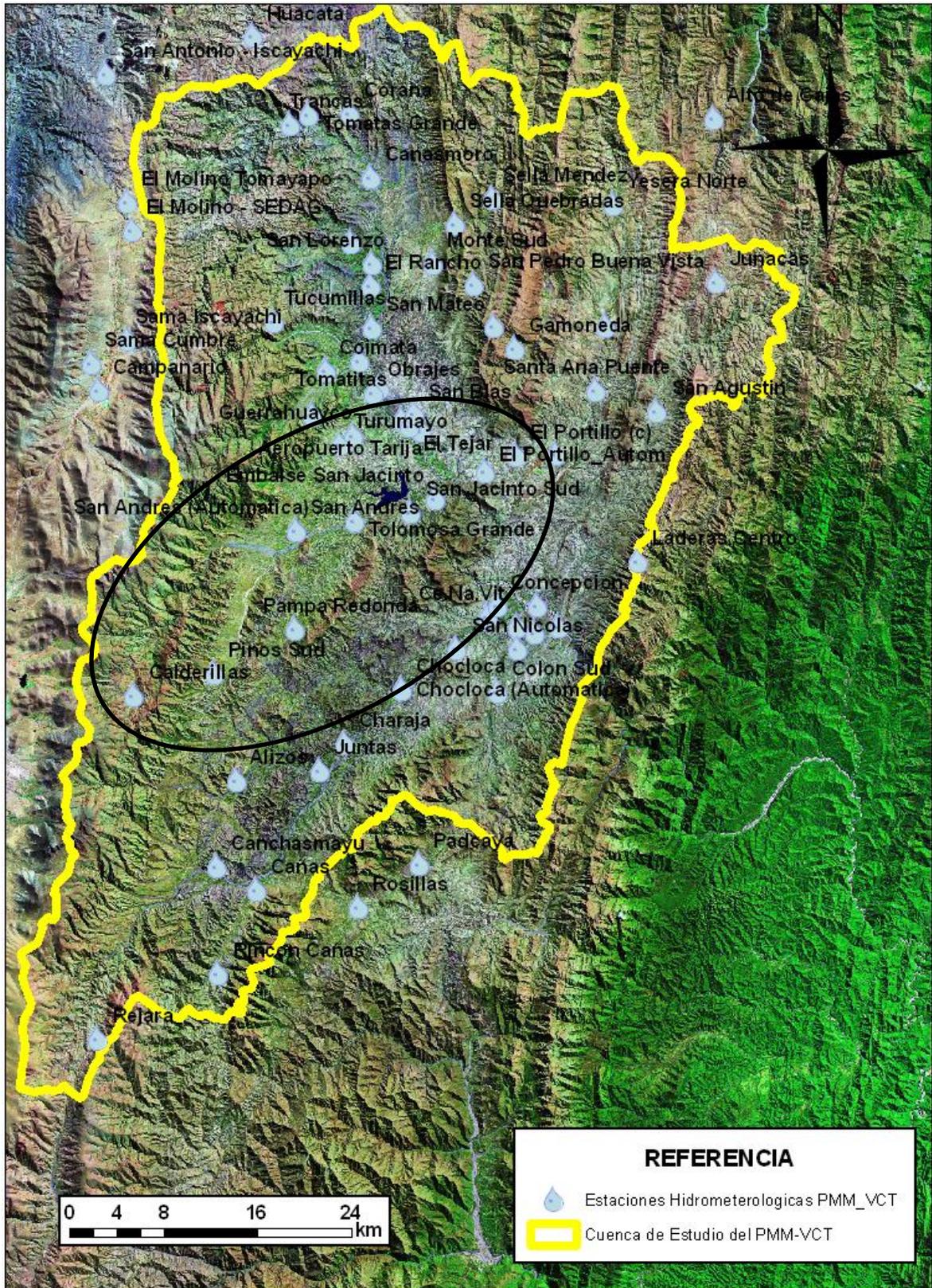
La información son registros del SENAMHI. A continuación se presentan los mapas de las estaciones hidrométricas e hidrometeoro lógicas que ha operado y mantiene en operación el SENAMHI:

Figura 12.2. Estaciones Hidrométricas del Valle Central de Tarija



Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

Figura 12.3. Estaciones Hidrometeorológicas del Valle Central de Tarija



Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

Si bien existen registros de 20 estaciones hidrométricas en el área de estudio hidrológico en el cual se aplique la verosimilitud, en la propia cuenca no existe información alguna.

La información con la cual se cuenta no es continua y está presente en diversos periodos de tiempo, y en 14 de ellas se realizan mediciones eventuales como se detalla en la Tabla 12.2. Estaciones Hidrométricas de la Cuenca del Valle Central de Tarija, generalmente durante la época de aguas bajas y solamente en algunos meses.

Las estaciones hidrométricas que se encuentran en el Valle Central de Tarija son:

Tabla 12.2. Estaciones Hidrométricas de la Cuenca del Valle Central de Tarija

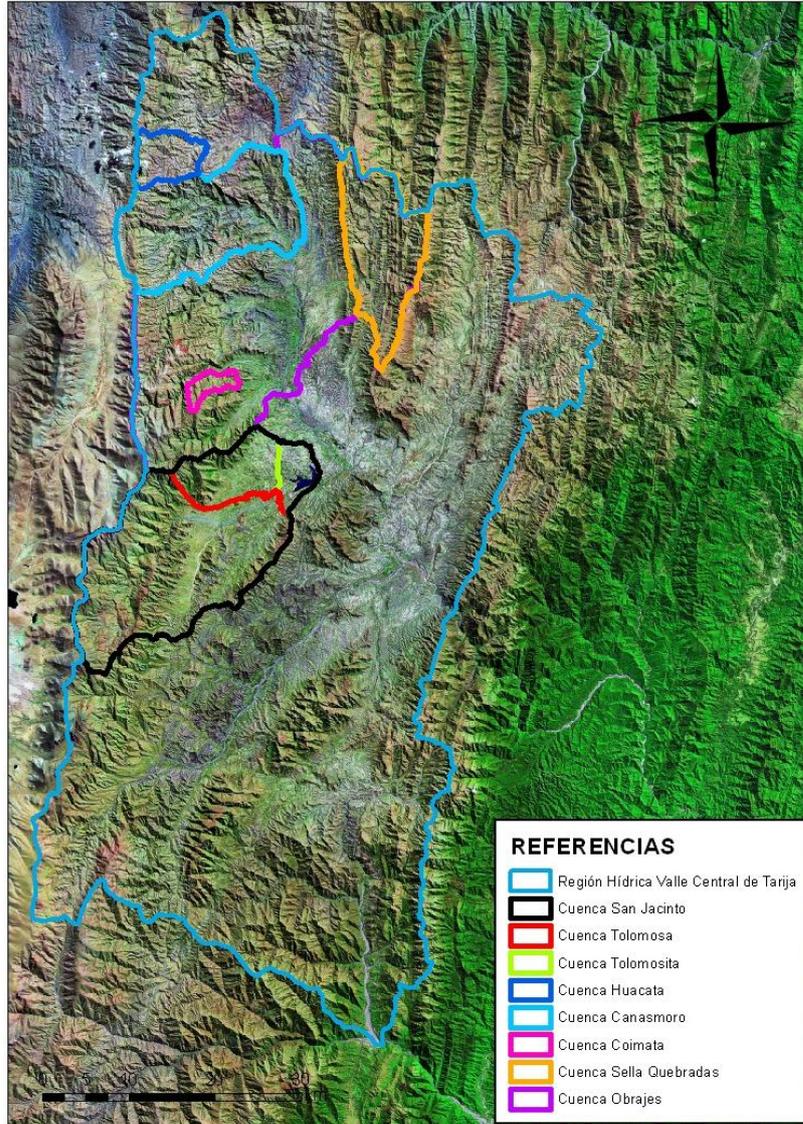
| Estación                  | Departamento | Provincia | Tipo | Latitud <sup>14</sup> | Longitud <sup>6</sup> | Altitud | Cuenca       | Área(km <sup>2</sup> ) | Medición |
|---------------------------|--------------|-----------|------|-----------------------|-----------------------|---------|--------------|------------------------|----------|
| Yesera Norte              | Tarija       | Cercado   | A    | 21°22'12.93"S         | 64°32'51.15"O         |         | Santa Ana    | 55.11                  | Eventual |
| Yesera Sur                | Tarija       | Cercado   | A    | 21°27'47.84"S         | 64°33'27.87"O         | 2092    | Santa Ana    | 155.76                 | Eventual |
| Calderas                  | Tarija       | Cercado   | A    | 21°27'54.83"S         | 64°33'41.10"O         | 2085    | Santa Ana    | 41.4                   | Eventual |
| Santa Ana Puente          | Tarija       | Cercado   | A    | 21°31'7.20"S          | 64°34'19.87"O         |         | Santa Ana    | 252.79                 | Eventual |
| Calderillas               | Tarija       | Cercado   | E    | 21°40'15.70"S         | 64°54'5.47"O          |         | Tolomosa     | 108.86                 | Eventual |
| San Andrés (Sola)         | Tarija       | Cercado   | A    | 21°40'15.70"S         | 64°54'5.47"O          |         | Tolomosa     | 168.39                 | Eventual |
| Pantipampa                | Tarija       | Cercado   | A    | 21°38'41.33"S         | 64°49'58.16"O         |         | Tolomosa     | 82.98                  | Eventual |
| San Andrés (Sola + Pinos) | Tarija       | Cercado   | A    | 21°38'30.11"S         | 64°49'45.42"O         |         | Tolomosa     | 251.37                 | Eventual |
| Tolomosita                | Tarija       | Cercado   | A    | 21°35'30.42"S         | 64°46'0.92"O          | 1913    | Tolomosa     | 73.96                  | Continua |
| Tolomosa                  | Tarija       | Cercado   | A    | 21°35'30.42"S         | 64°46'0.92"O          | 1913    | Tolomosa     | 336.02                 | Continua |
| San Jacinto               | Tarija       | Cercado   | A    | 21°36'8.04"S          | 64°43'35.86"O         |         | Tolomosa     | 438.26                 | Continua |
| Angosto Coimata           | Tarija       | Cercado   | E    | 21°29'41.21"S         | 64°48'36.28"O         |         | Guadalquivir | 13.14                  | Continua |
| Lajas                     | Tarija       | Cercado   | E    | 21°23'22.85"S         | 64°44'53.10"O         |         | Guadalquivir | 335.7                  | Eventual |
| Sella Quebradas           | Tarija       | Méendez   | A    | 21°23'12.03"S         | 64°40'55.02"O         | 2119    | Guadalquivir | 147.26                 | Continua |
| Obrajes                   | Tarija       | Cercado   | A    | 21°30'20.52"S         | 64°45'45.62"O         | 1922    | Guadalquivir | 909.28                 | Continua |
| San Luis                  | Tarija       | Cercado   | A    | 21°35'17.66"S         | 64°41'10.95"O         |         | Guadalquivir | 1538.68                | Eventual |
| Trancas                   | Tarija       | Méendez   | A    | 21°18'26.35"S         | 64°48'58.06"O         |         | Guadalquivir | 131.64                 | Eventual |
| Canasmoro                 | Tarija       | Méendez   | A    | 21°21'23.13"S         | 64°44'52.90"O         | 2085    | Guadalquivir | 234.09                 | Continua |
| San Nicolás               | Tarija       | Avilés    | A    | 21°43'50.82"S         | 64°42'7.10"O          | 1800    | Camacho      | 751.37                 | Eventual |
| La Angostura              | Tarija       | Cercado   | A    | 21°42'24.29"S         | 64°35'46.89"O         |         | Guadalquivir | 3249.03                | Eventual |
| Huacata                   | Tarija       | Méendez   | A    | 21°14'24.36"S         | 64°50'37.73"O         | 2356    | Pilaya       | 41.26                  | Continua |

Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

<sup>14</sup>Coordenadas obtenidas en coordinación con el personal técnico del SENAMHI y el apoyo del software Google Earth, 2012

Las estaciones hidrométricas que poseen un registro continuo, de tal manera que permiten inferir estadísticos son las que se representan en el siguiente mapa:

Figura 12.4. Cuencas de las Estaciones Hidrométricas Del Valle Central de Tarija con registro continuo



Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

Como se puede observar en la anterior figura, las estaciones hidrométricas que poseen un registro continuo se encuentran ubicadas en la zona centro-nor-oeste de la cuenca del Valle Central de Tarija, lo que se traduce en una regionalización de las variables en la zona de interés para fines del aprovechamiento hídrico de la serranía de Sama.

Los valores de precipitación total anual, han sido analizados mediante procesamiento estadístico y los valores anuales de cada estación y los valores característicos, según la distribución normal de probabilidad, se encuentran en la Tabla 9.2y en el A02 apéndice 5.1

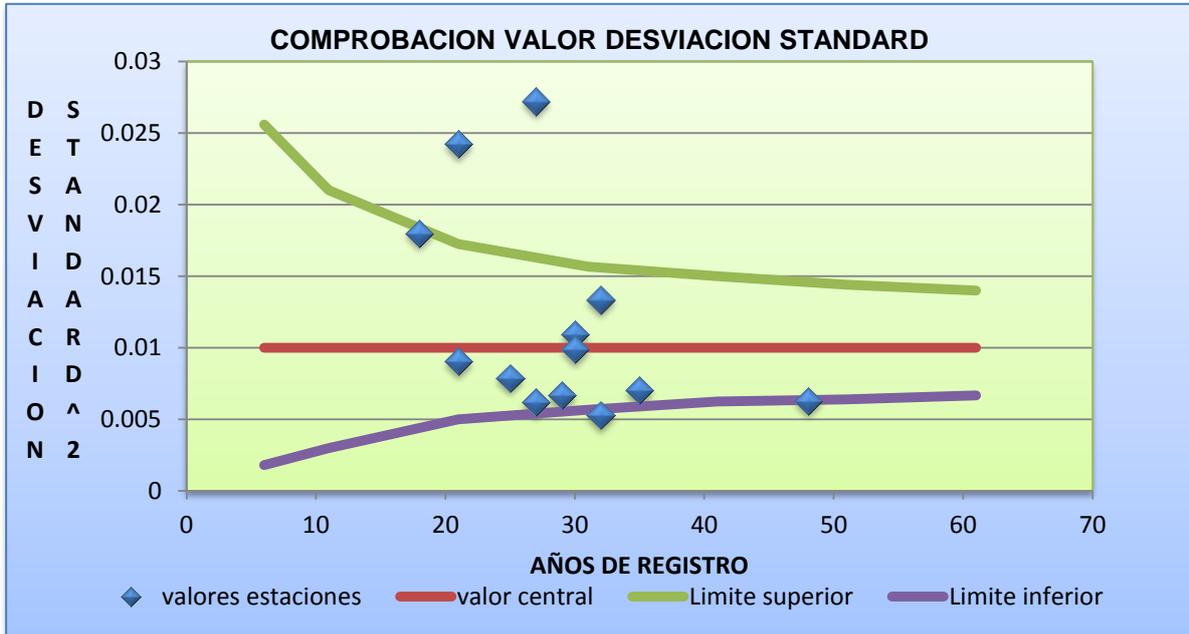
Tabla 12.3. Valores característicos de precipitación

| Estación           | Años registro | Latitud  | Longitud | Altura | Promedio | Desviación standard | (Desv. Stand log x ) <sup>2</sup> | M log x |
|--------------------|---------------|----------|----------|--------|----------|---------------------|-----------------------------------|---------|
| León Cancha        | 20            | -21,1783 | 64,7153  | 2729   | 522,0    | 188,82              | 0,0247                            | 2,6892  |
| Tomayapo           | 16            | -21,2683 | 65,0450  | 2734   | 233,9    | 86,21               | 0,0256                            | 2,3394  |
| Yesera             | 21            | -21,3722 | 64,5508  | 1978   | 686,0    | 145,55              | 0,0085                            | 2,8266  |
| Trancas            | 11            | -21,3081 | 64,8158  | 2198   | 778,5    | 126,13              | 0,0050                            | 2,8856  |
| Qd. Sellas         | 10            | -21,3864 | 64,6811  | 2145   | 616,4    | 77,15               | 0,0030                            | 2,7864  |
| El Molino          | 14            | -21,3886 | 64,9469  | 3387   | 465,6    | 168,25              | 0,0246                            | 2,6397  |
| Tucumillas         | 19            | -21,4611 | 64,8311  | 2557   | 790,2    | 346,79              | 0,0363                            | 2,8559  |
| Coimata            | 20            | -21,4992 | 64,7889  | 2027   | 713,7    | 147,66              | 0,0081                            | 2,8442  |
| Padcaya            | 30            | -21,5300 | 64,4300  | 2010   | 610,1    | 137,19              | 0,0095                            | 2,7744  |
| Tarija             | 48            | -21,5467 | 64,7108  | 1849   | 596,2    | 109,01              | 0,0063                            | 2,7681  |
| El Tejar           | 29            | -21,5431 | 64,7211  | 1851   | 608,8    | 114,73              | 0,0067                            | 2,7768  |
| Sn Jacinto sud     | 35            | -21,6303 | 64,7200  | 1820   | 543,0    | 104,80              | 0,0070                            | 2,7267  |
| San Andrés         | 32            | -21,6233 | 64,8150  | 1987   | 987,6    | 262,65              | 0,0133                            | 2,9792  |
| Pinos Sud          | 32            | -21,7347 | 64,8783  | 2118   | 1150,9   | 192,67              | 0,0053                            | 3,0549  |
| Chococla           | 27            | -21,7481 | 64,7294  | 1795   | 637,6    | 115,75              | 0,0062                            | 2,7974  |
| Juntas             | 25            | -21,8103 | 64,7975  | 1882   | 678,1    | 138,87              | 0,0079                            | 2,8222  |
| Cañas              | 30            | -21,9022 | 64,8508  | 2078   | 621,4    | 149,59              | 0,0109                            | 2,7808  |
| Sn Jacinto embalse | 4             |          |          |        | 498,0    | 55,25               | 0,0023                            | 2,6945  |
| Junacas            | 21            |          |          |        | 511,6    | 183,33              | 0,0242                            | 2,6810  |
| Gamoneda           | 19            |          |          |        | 487,0    | 143,10              | 0,0163                            | 2,6688  |
| Concepción         | 9             |          |          |        | 437,3    | 77,10               | 0,0059                            | 2,6341  |
| Sn Nicolás         | 12            |          |          |        | 488,0    | 80,57               | 0,0051                            | 2,6825  |
| La angostura       | 15            |          |          |        | 339,3    | 97,84               | 0,0157                            | 2,5125  |
| Colon Sud          | 15            |          |          |        | 367,2    | 116,52              | 0,0190                            | 2,5430  |
| Calderillas        | 30            |          |          |        | 1234,3   | 282,98              | 0,0099                            | 3,0800  |
| Laderas Centro     | 19            |          |          |        | 375,9    | 90,29               | 0,0109                            | 2,5625  |
| Cañas Moro         | 21            |          |          |        | 615,2    | 134,77              | 0,0091                            | 2,7786  |
| Campanario         | 7             |          |          |        | 353,8    | 66,18               | 0,0066                            | 2,5412  |
| Sama               | 18            |          |          |        | 749,4    | 231,62              | 0,0180                            | 2,8540  |
| Cejara             | 18            |          |          |        | 1121,2   | 498,20              | 0,0372                            | 3,0068  |
| Guandacay          | 27            |          |          |        | 1095,6   | 416,21              | 0,0272                            | 3,0083  |

Fuente: Elaboración propio

Con estos valores y aplicando el test del chicuadro se puede verificar que todo el valle central de Tarija y lo propio la zona del río Bermejo, disponen de una variabilidad constante en toda ella e igual a  $S(\log x) = 0.10$ . Como muestra la Figura 12.5.

Figura 12.5. Variabilidad de la desviación Standard de Precipitación (total)

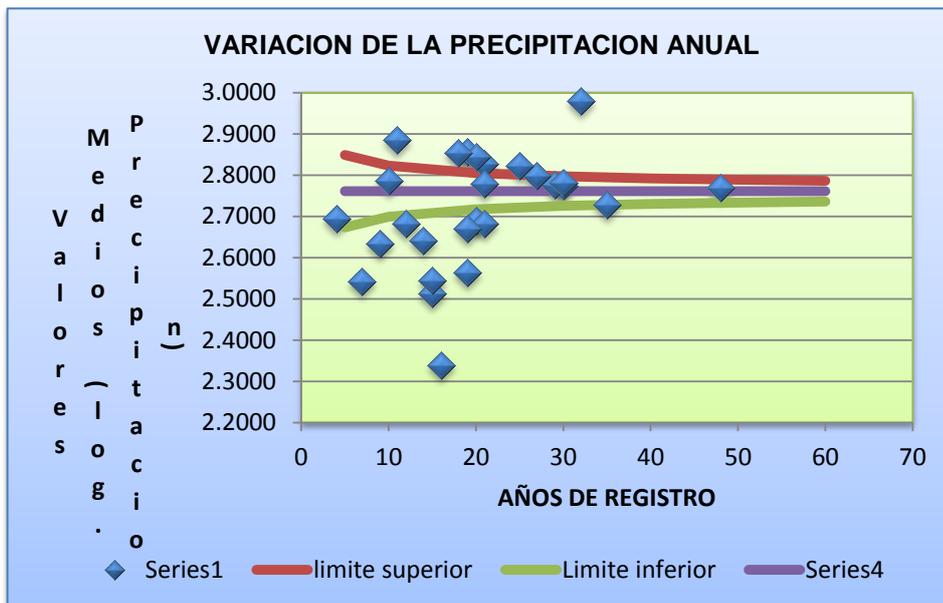


Fuente: Elaboración propio

Se tienen dos estaciones cuyos valores no recaen dentro la franja fiduciaria, ellos son, San Andrés y Junacas, pero la ubicación de ellas y las condiciones ambientales de cada sitio, muestran que pertenecen a un régimen de precipitación similar.

El valor medio de la precipitación, tomando todos los valores de los pluviómetros muestra que no tienen un comportamiento homogéneo y en el cual la variación solo se debe a defecto de muestreo o a un cambio climático, como se aprecia en la Figura, por ello se ha dispuesto efectuar otra prueba y es la variación de la precipitación con la altura sobre el nivel del mar y en segunda instancia la variación con la longitud terrestre.

Figura 12.6. Variabilidad de la desviación Standard de Precipitación



Se tienen dos estaciones cuyos valores no recaen dentro la franja fiduciaria, ellos son, San Andrés y Junacas, pero la ubicación de ellas y las condiciones ambientales de cada sitio, muestran que pertenecen a un régimen de precipitación similar.

El valor medio de la precipitación, tomando todos los valores de los pluviómetros muestra que no tienen un comportamiento homogéneo y en el cual la variación solo se debe a defecto de muestreo o a un cambio climático, como se aprecia en la Figura 12.12 por ello se ha dispuesto efectuar otra prueba y es la variación de la precipitación con la altura sobre el nivel del mar y en segunda instancia la variación con la longitud terrestre.

Figura 12.7. Variabilidad de la Precipitación media anual

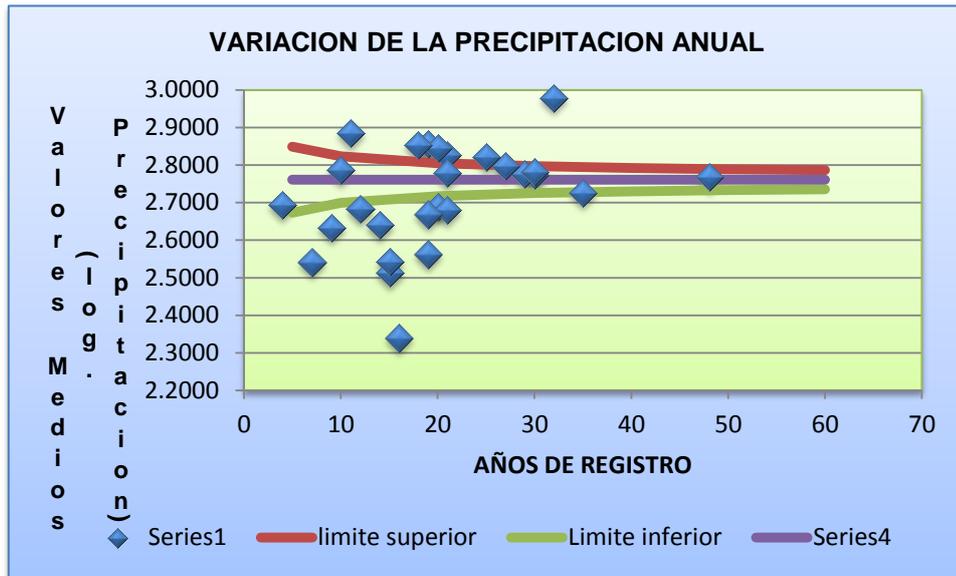
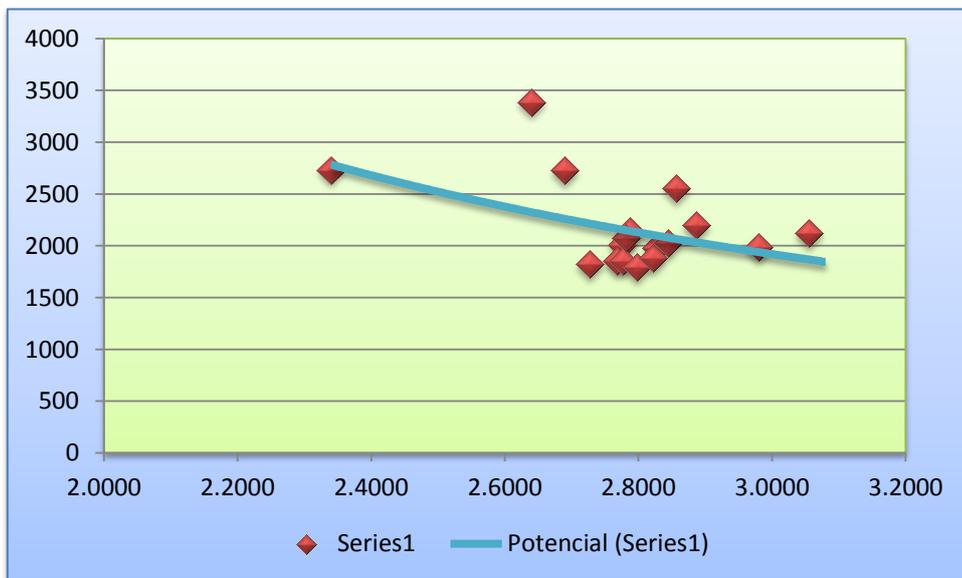
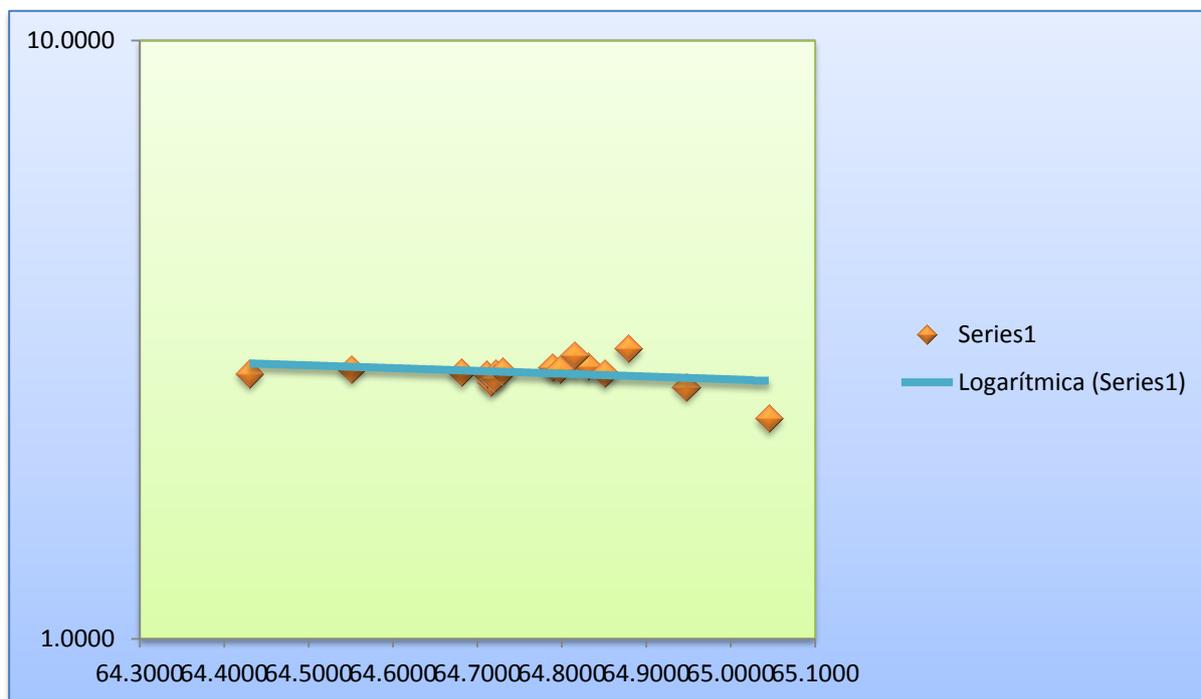


Figura 12.8. PRECIPITACION MEDIA VS- ALTURA S N M



Fuente: Elaboración propio

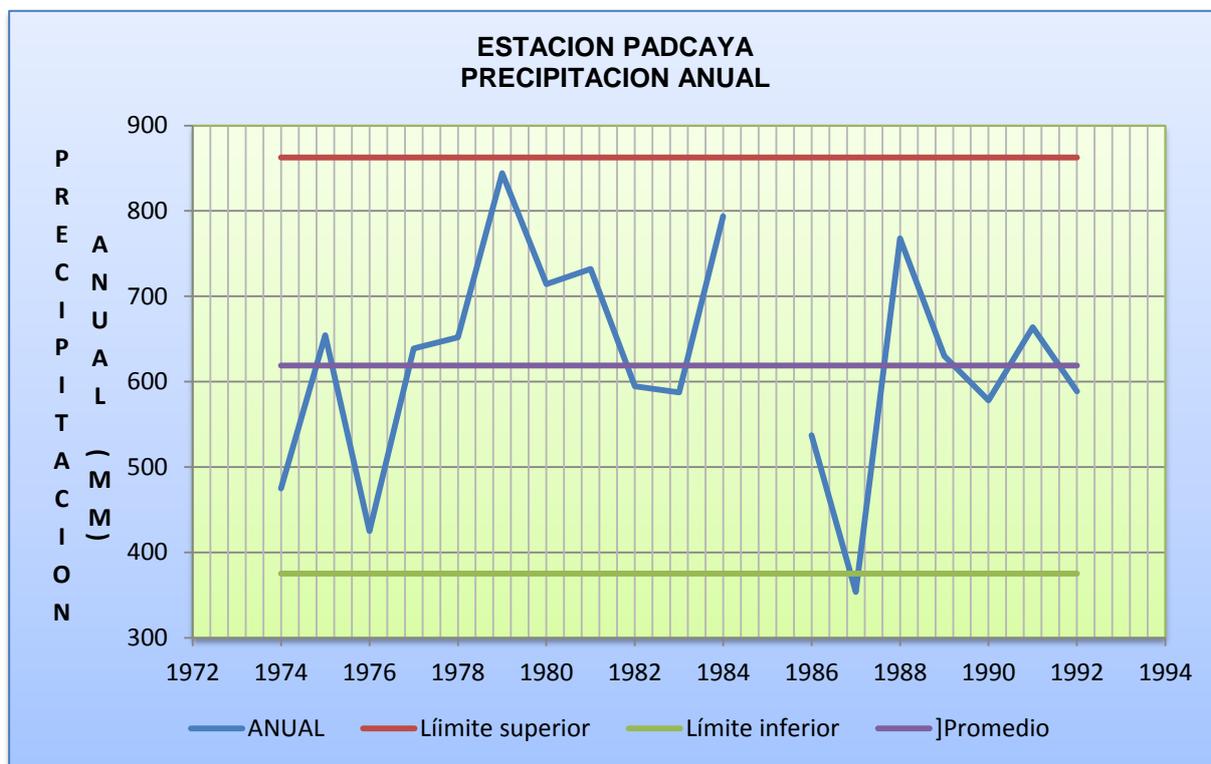
Tabla 12.4. VARIACION PRECIPITACION ANUAL CON LONGITUD TERRESTRE



. Ambas pruebas muestran que la precipitación TOTAL ANUAL varía con la altura sobre el nivel del mar y con la latitud, a medida que se asciende disminuye el valor de precipitación y a medida que se desplaza la estación hacia el oeste disminuye su valor. Por ello es importante considerar para cada sitio de obra su localización y de la propia cuenca.

En el caso de Padcaya los valores Registrados en la estación, son tomados en cuenta para las apreciaciones a realizar sobre caudal. La figura HP-9 muestra la variación anual y las franjas fiduciarias o límites que muestran que estadísticamente todos los valores pertenecen a una misma población.

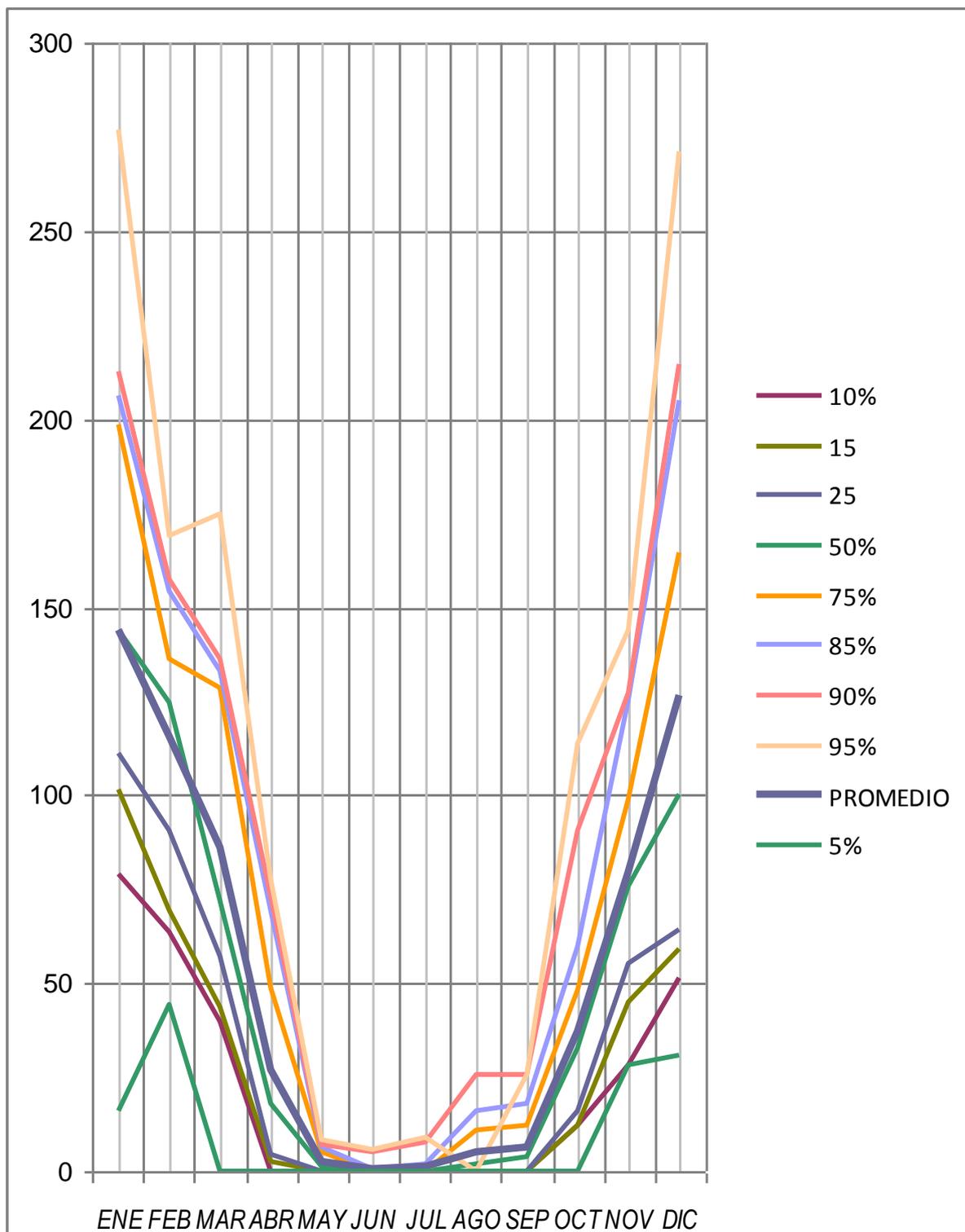
Figura 12.9. Precipitación Anual Estación Padcaya



Fuente: Elaboración propio

En la variación mensual de la precipitación, se ha procedido a determinar los valores mes a mes de todo el registro y asignar porcentuales que representan la probabilidad de ocurrencia y se ha graficado como se muestra en la Figura 12.10

Figura 12.10. PRECIPITACION MENSUAL ESTACION PADCAYA



Fuente: Elaboración propio

Existen diversos modelos hidrológicos que fueron empleados regionalmente, y que permiten realizar la transformación lluvia-caudal, para obtener valores de los caudales medios mensuales, entre los cuales se pueden mencionar:

- Modelo del PRONAR.- El modelo es relativamente sencillo, de pocos parámetros, definido a través de la fórmula  $V_{esc_m} = (P_m - 15) * 0.75 * C * A$ , en donde A es el área de la cuenca en  $km^2$ , C es el coeficiente de escorrentía anual dimensional,  $P_m$  es la precipitación media mensual en mm, y  $V_{esc_m}$  es el volumen de escorrentía media mensual en  $Hm^3$ . La desventaja del modelo es que produce valores bajos del caudal medio mensual durante el periodo de estiaje.
- Modelo del Coeficiente de Esguerrimiento Anual<sup>15</sup>.- Es el modelo empleado en el estudio "Recursos Hídricos Superficiales y sus Posibilidades de Aprovechamiento en el Departamento de Tarija". El modelo se basa en la calibración de ecuaciones regionales basadas en parámetros hidrológicos de las cuencas de análisis, para su posterior aplicación en las cuencas donde se requiere determinar los valores de los caudales medios mensuales, considerando los coeficientes de distribución mensual regionalizados. Éste modelo es relativamente sencillo y es el más versátil en la determinación de los caudales medios mensuales, por lo que se empleará en esta oportunidad, debido a que proporciona una plataforma para la estimación de caudales medios mensuales considerando el desarrollo de escenarios afectados por el cambio climático.

El nivel de análisis requerido es mensual, para poder determinar los valores de la época de estiaje y época húmeda, es por ello que se realizó primeramente un análisis del modelo a ser empleado para determinar los caudales medios mensuales.

#### Generación de caudales medios mensuales

Con los valores de las precipitaciones medias anuales de las estaciones pluviométricas, de la manera obtenida en los párrafos anteriores se puede establecer la variación de la precipitación media mensual.

Con los valores registrados en las estaciones hidrométricas y la evaluación de la precipitación media areal de la cuenca delimitada en el punto de desembocadura coincidente con la ubicación de la estación hidrométrica, se determinaron los parámetros siguientes:

Tabla 12.5. Parámetros hidrológicos de las cuencas delimitadas en el sitio de ubicación de las Estaciones Hidrométricas de Registro Continuo

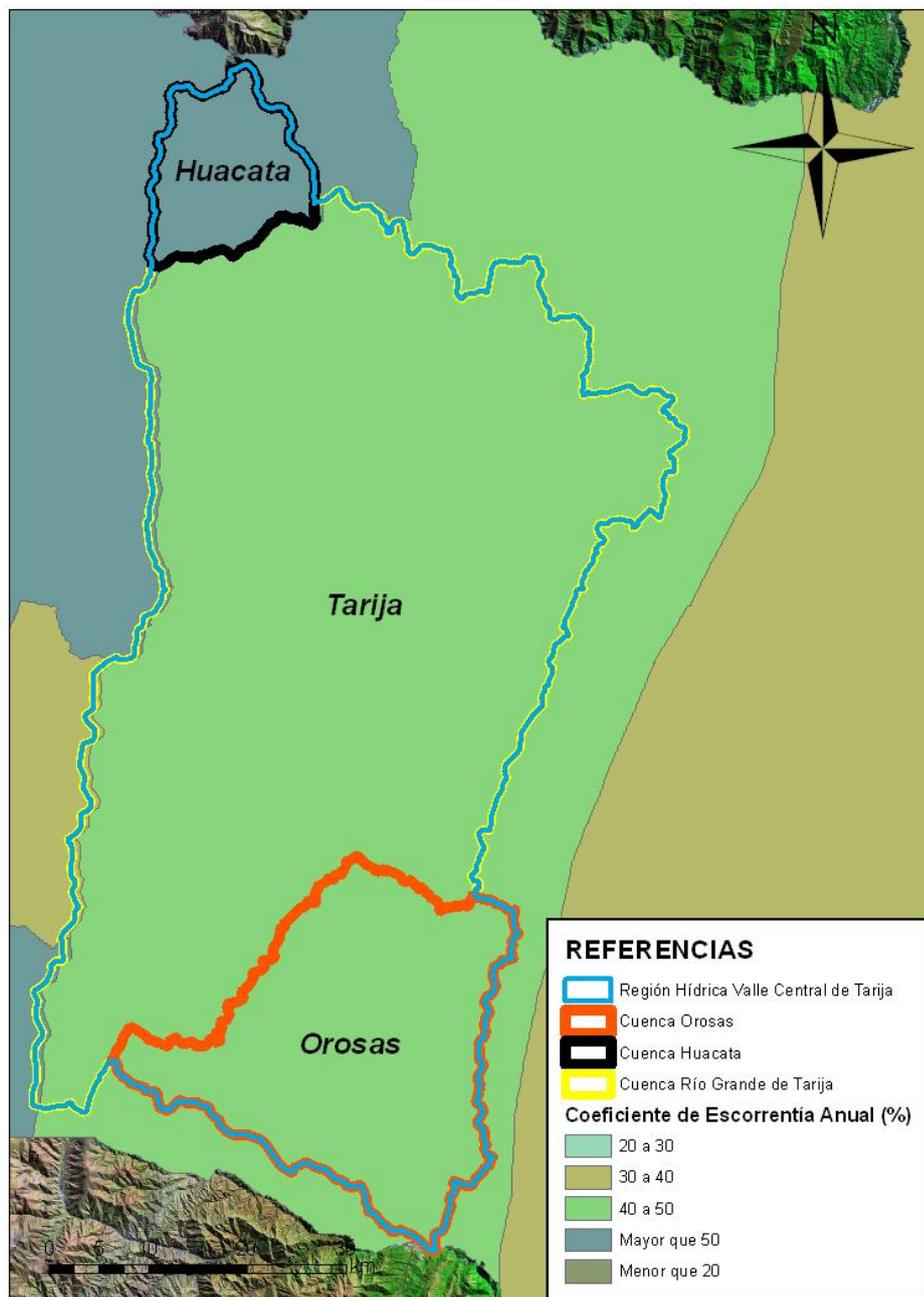
| Estación        | Coeficiente de Escorrentía Anual | Área ( $km^2$ ) | Caudal medio anual ( $m^3/s$ ) | Precipitación (mm) | Caudal específico ( $l/s/km^2$ ) |
|-----------------|----------------------------------|-----------------|--------------------------------|--------------------|----------------------------------|
| Tolomosa        | 0.337                            | 336.020         | 3.672                          | 1022.7             | 10.927                           |
| Tolomosita      | 0.415                            | 73.960          | 0.966                          | 992.6              | 13.059                           |
| San Jacinto     | 0.509                            | 438.260         | 6.703                          | 948.1              | 15.294                           |
| Coimata         | 0.350                            | 13.140          | 0.117                          | 798.2              | 8.901                            |
| Canasmoro       | 0.287                            | 234.090         | 1.503                          | 706.5              | 6.422                            |
| Sella Quebradas | 0.187                            | 147.260         | 0.530                          | 605.1              | 3.597                            |
| Obrajes         | 0.254                            | 909.280         | 5.048                          | 687.9              | 5.551                            |
| Huacata         | 0.289                            | 41.260          | 0.321                          | 849.4              | 7.782                            |

Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

Un mapa que corresponde al PRONAR expone rangos de valores aproximados del Coeficiente de Escorrentía Anual (CEA) para zonas de análisis amplias en su extensión, y es así que las cuencas de la región del proyecto, está contenida en una franja que establece valores del CEA comprendidos entre 40 y 50 %. El mapa de referencia se presenta a continuación:

<sup>15</sup>Recursos Hídricos Superficiales y sus Posibilidades de Aprovechamiento en el Departamento de Tarija, 2008. Alfonso Vacaflores.

Figura 12.11. Coeficiente de Escorrentía Anual PRONAR

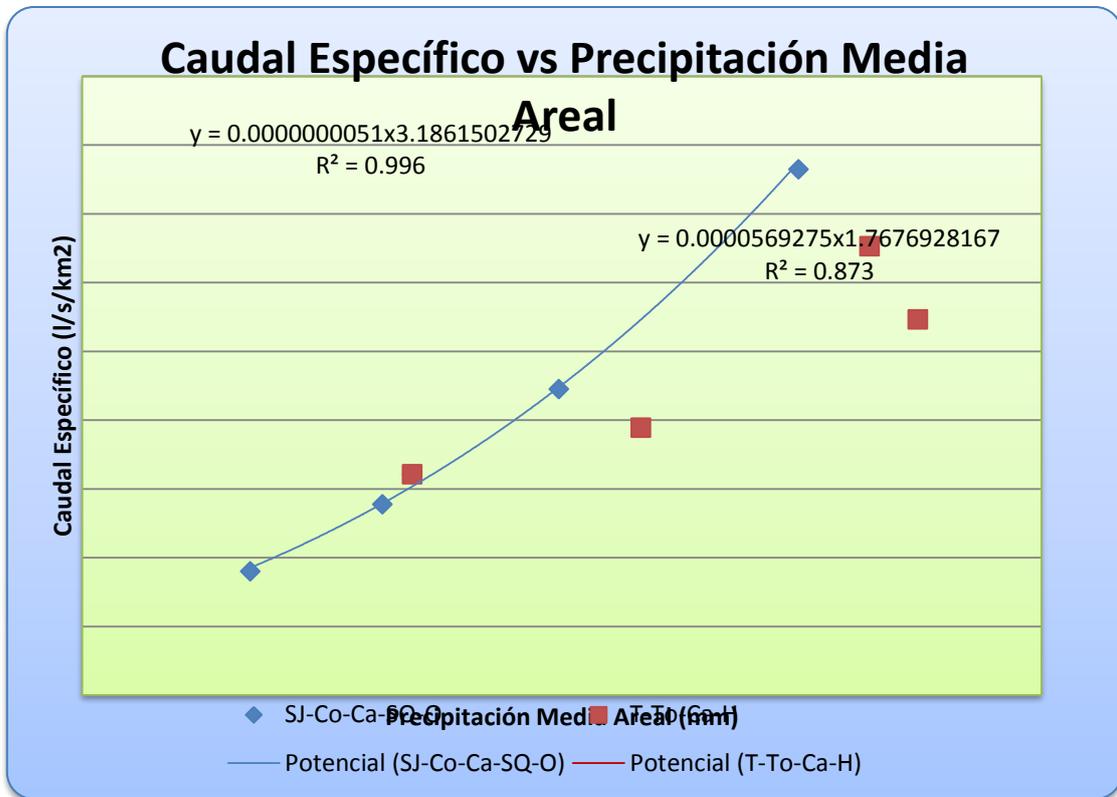


Fuente: Elaboración propia en base a información del PRONAR (2001)

Es evidente que los valores son referenciales y que para los fines del alcance de este estudio, únicamente nos sirve para comparar que el 50 % de los valores estimados y presentados en la anterior tabla, se acercan al valor propuesto por el PRONAR, y es por las condiciones locales de las cuencas que ese valor para algunos casos como ser la cuenca Sella Quebradas se encuentra bastante alejada del rango PRONAR debido principalmente a las escalas de trabajo para su determinación.

Al observar la correlación entre la precipitación media areal y el caudal específico, es evidente la presencia de dos zonas que poseen un comportamiento diferenciado por las condiciones regionales, y se puede:

Figura 12.12. Función de correlación entre Precipitación Media Areal y el Caudal Específico



Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (SJ: San Jacinto, Co: Coimata, Ca: Canasmoro, SQ: Sella Quebradas, O: Obrajes, T: Tolomosa, To: Tolomosita, H: Huacata) (Periodo de registro variable)

Al observar el mapa de las cuencas que corresponden con las estaciones hidrométricas de registro continuo, y considerando la correlación anteriormente descrita, se observa que las zonas estarían comprendidas, la primera en la franja nor-oeste del área de estudio para el caso de la correlación Potencial (T-To-Ca-H) y la segunda en la franja centro-nor-oeste del área de estudio para el caso de la correlación Potencial (SJ-Co-Ca-SQ-O), la primera restringida a cuencas de las propias nacientes y relativamente más pequeña área de aporte, y la segunda para cuencas de un tamaño más significativo y consecuentemente.

Si bien el anterior gráfico nos permite encontrar el caudal específico de una cuenca, conocido el valor de la precipitación media areal, es necesario luego distribuir el caudal medio anual en los diferentes meses del año.

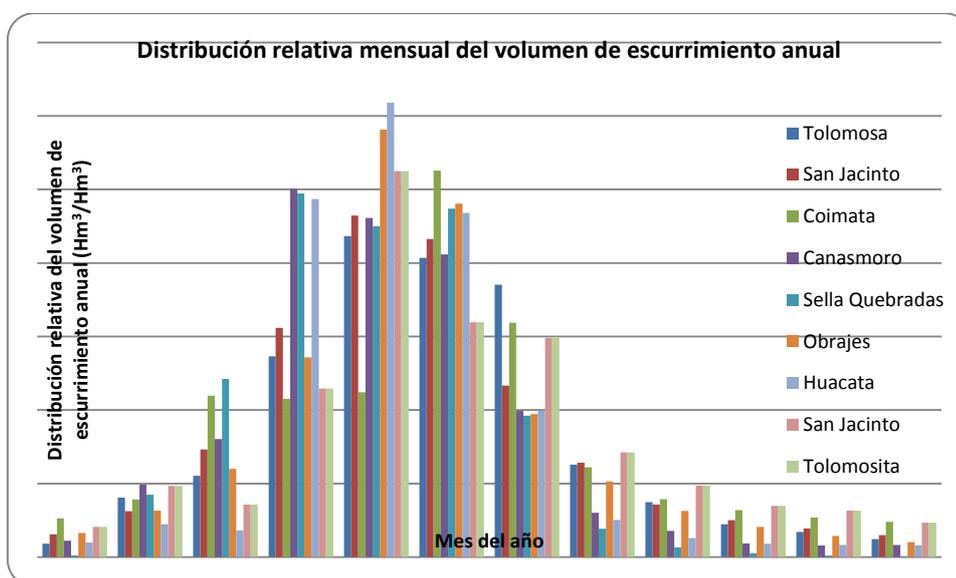
Para ello, se procede a analizar la distribución media mensual del volumen de escurrimiento medio anual, que está directamente relacionado con la distribución media mensual de los caudales que escurren en las estaciones hidrométricas. En el siguiente gráfico se puede observar un comportamiento regional de la distribución de caudales medios mensuales, independiente de la magnitud del caudal que escurre y del área de la cuenca y se lo ha expresado como valor de relación del volumen mensual al volumen total que se midió en la estación, sobre la escurrentía media de la cuenca en la cual existen datos como se muestra en la Tabla 9.5 y en la Figura 9.9.

Tabla 12.6. Coeficiente de distribución media mensual del volumen de escurrimiento medio anual

| Estación        | Volumen Relativo de Esgurrimiento Medio Mensual (Hm <sup>3</sup> /Hm <sup>3</sup> ) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | Total |
|-----------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 | Oct   | Nov   | Dic   | Ene   | Feb   | Mar   | Abr   | May   | Jun   | Jul   | Ago   | Sep   |       |
| Tolomosa        | 0.009   | 0.040 | 0.055 | 0.137 | 0.218 | 0.203 | 0.185 | 0.063 | 0.037 | 0.022 | 0.017 | 0.012 | 1.000 |
| Tolomosita      | 0.021   | 0.048 | 0.036 | 0.115 | 0.262 | 0.160 | 0.149 | 0.071 | 0.049 | 0.035 | 0.032 | 0.023 | 1.000 |
| San Jacinto     | 0.015   | 0.031 | 0.073 | 0.156 | 0.232 | 0.216 | 0.117 | 0.064 | 0.036 | 0.025 | 0.019 | 0.015 | 1.000 |
| Coimata         | 0.026   | 0.039 | 0.110 | 0.108 | 0.112 | 0.263 | 0.159 | 0.061 | 0.039 | 0.032 | 0.027 | 0.024 | 1.000 |
| Canasmoro       | 0.011   | 0.049 | 0.080 | 0.250 | 0.231 | 0.206 | 0.099 | 0.030 | 0.018 | 0.009 | 0.008 | 0.008 | 1.000 |
| Sella Quebradas | 0.001   | 0.042 | 0.121 | 0.247 | 0.225 | 0.237 | 0.096 | 0.019 | 0.007 | 0.003 | 0.001 | 0.000 | 1.000 |
| Obrajes         | 0.016   | 0.032 | 0.060 | 0.136 | 0.291 | 0.240 | 0.097 | 0.052 | 0.031 | 0.021 | 0.014 | 0.010 | 1.000 |
| Huacata         | 0.010   | 0.022 | 0.018 | 0.243 | 0.309 | 0.234 | 0.100 | 0.025 | 0.013 | 0.009 | 0.008 | 0.008 | 1.000 |

Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

Figura 12.13. Distribución relativa media mensual del volumen de escurrimiento anual

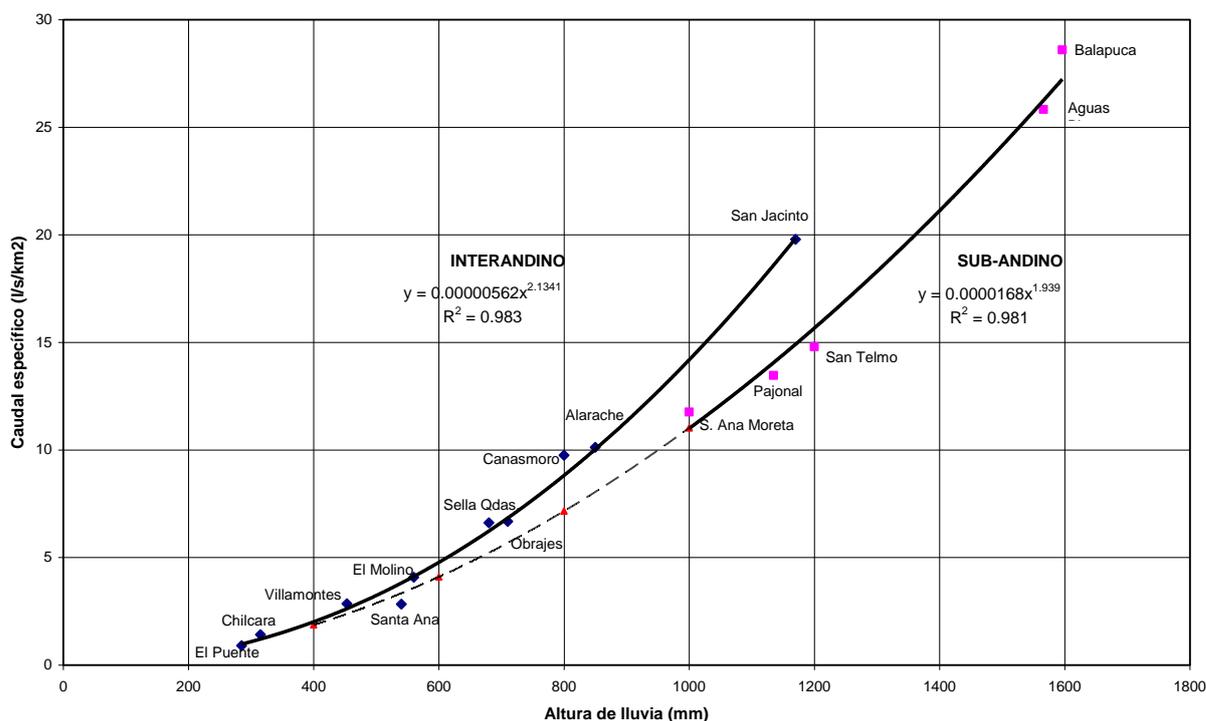


Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

La metodología empleada en este informe para la obtención de caudales medios mensuales en las cuencas de las fuentes superficiales actuales, en esta oportunidad permitió ajustar las curvas de correlación de caudales específicos y la precipitación media anual areal de las cuencas. Pues en el informe “Recursos Hídricos Superficiales y sus Posibilidades de Aprovechamiento en el Departamento de Tarija” (2008), existen dos curvas de correlación, en la que una de ellas coincide en la dependencia funcional de los caudales específicos y precipitaciones medias anuales areales de las cuencas delimitadas en el sitio de ubicación de las estaciones hidrométricas de Canasmoro, Sella Quebradas, Obrajes y San Jacinto, con ecuaciones similares de las curvas de ajuste. En esta oportunidad también se encontró otra curva de correlación, que describe el comportamiento de las cuencas que tienen más de nacimiento y de la zona nor-oeste de la cuenca.

En la siguiente imagen se muestra la curva de correlación encontrada en el informe de referencia, del párrafo precedente.

Figura 12.14. Correlación de caudales específicos medios anuales en relación a la precipitación media anual areal



Fuente: Recursos Hídricos Superficiales y sus Posibilidades de Aprovechamiento en el Departamento de Tarija (2008)

Con los valores estimados se procedió a calcular los caudales medios anuales de las cuencas de aporte de las fuentes de agua potable en los sitios en los cuales se tiene obras o en el futuro se dispondrá de ellas, considerando la precipitación media anual areal de cada una de las cuencas y el área respectiva.

A continuación se presentan los caudales medios anuales de la fuente superficial para Padcaya

Tabla 12.7. Caudal medio anual estimado en las cuencas de Huacanqui

| Municipio | Fuente                   | Tipo de Toma   | Área (km <sup>2</sup> ) | Precipitación Media Areal (mm) | Ecuación adoptada Q <sub>esp</sub> | Caudal Específico Estimado (l/s/km <sup>2</sup> ) | Caudal Medio Anual Estimado (l/s) |
|-----------|--------------------------|----------------|-------------------------|--------------------------------|------------------------------------|---|-----------------------------------|
| Padcaya   | Huacanqui 1              | Subsuperficial | 7.44                    | 618.2                          | Correlación Área Presa Huacanqui   | 5.1   | 40                                |
|           | Huacanqui 2              | Subsuperficial | 7.79                    |                                |                                    |   |                                   |
|           | <b>Sub-Total Padcaya</b> |                |                         |                                | <b>618.2</b>                       |   | <b>5.1</b>                        |

Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

A continuación se presentan los valores de los caudales medios mensuales para la zona de estudio:

Tabla 12.8. Caudal medio mensual de las fuentes superficiales actuales

| Municipio | Fuente                   | Caudal medio mensual (m <sup>3</sup> /s) |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             | Caudal Medio Anual (m <sup>3</sup> /s) |
|-----------|--------------------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
|           |                          | Oct                                      | Nov         | Dic         | Ene         | Feb         | Mar         | Abr         | May         | Jun         | Jul         | Ago         | Sep         |  |
| Padcaya   | Huacacqui 1              | 0.01                                     | 0.02        | 0.10        | 0.14        | 0.11        | 0.09        | 0.02        | 0.01        | 0.00        | 0.00        | 0.00        | 0.00        | 0.045                                  |
|           | Huacacqui 2              | 30                                       | 60          | 56          | 45          | 01          | 22          | 87          | 19          | 49          | 20          | 08          | 03          | 0                                      |
|           | <b>Sub-Total Padcaya</b> | <b>0.01</b>                              | <b>0.02</b> | <b>0.10</b> | <b>0.14</b> | <b>0.11</b> | <b>0.09</b> | <b>0.02</b> | <b>0.01</b> | <b>0.00</b> | <b>0.00</b> | <b>0.00</b> | <b>0.00</b> | <b>0.045</b>                           |
|           |                          | <b>30</b>                                | <b>60</b>   | <b>56</b>   | <b>45</b>   | <b>01</b>   | <b>22</b>   | <b>87</b>   | <b>19</b>   | <b>49</b>   | <b>20</b>   | <b>08</b>   | <b>03</b>   | <b>0</b>                               |

Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI (Periodo de registro variable)

### 13. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

#### 13.1 ESTUDIOS RELACIONADOS CON LAS FUENTES FUTURAS POTENCIALES

Los principales estudios relacionados con las fuentes futuras potenciales de agua son los siguientes:

Tabla 13.1. Estudios relacionados con las fuentes superficiales futuras

| Institución                                  | Título  | Autor                   | Año  |
|--|---|-------------------------|------|
| Prefectura del Departamento de Tarija / PNUD | Recursos Hídricos Superficiales y sus Posibilidades de Aprovechamiento en el Departamento de Tarija | Ing. Alfonso Vacaflores | 2008 |
| Lauren                                       |   |                         |      |
| Gtz  |   |                         |      |

Fuente: Elaboración propia

#### 13.2 CAUDAL DISPONIBLE EN LAS FUENTES FUTURAS POTENCIALES

Alternativas para el municipio de Uriondo no se contemplaron en éste capítulo, puesto que el caudal que escurre en la actual obra de toma de Alisos es suficiente para atender la demanda en un horizonte de años bastante amplio, como fue descrito en la Etapa I del PMM-Valle Central de Tarija (Diagnóstico de la Situación Actual del Servicio).

| Fuente                   | Caudal medio mensual (m <sup>3</sup> /s) |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             | Caudal Medio Anual (l/s/km <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
|                          | Oct                                      | Nov         | Dic         | Ene         | Feb         | Mar         | Abr         | May         | Jun         | Jul         | Ago         | Sep         |   |
| <b>Sub-Total Padcaya</b> | <b>0.29</b>                              | <b>0.58</b> | <b>2.34</b> | <b>3.21</b> | <b>2.44</b> | <b>2.04</b> | <b>0.64</b> | <b>0.26</b> | <b>0.11</b> | <b>0.05</b> | <b>0.02</b> | <b>0.01</b> | <b>100</b>                                |

Fuente: Elaboración propia

### 14. ESCENARIO PROBABILÍSTICO

Para desarrollar el escenario probabilístico de la oferta hídrica, se requiere adoptar un periodo de diseño para las obras de captación. El periodo de diseño está definido en para los sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario en las normas bolivianas NB688 y NB689:

Con tal periodo de diseño se calculó la probabilidad de no ocurrencia igual a 95%, y los valores probabilísticos de no ocurrencia de las precipitaciones medias anuales probabilísticas areales para cada cuenca de interés. Con las precipitaciones medias anuales probabilísticas areales se determinó el valor

del caudal mínimo mensual probabilístico para un periodo de diseño igual a 20 años, empleando el modelo del coeficiente de escorrentía anual. Se presenta a continuación los valores encontrados:

Tabla 14.1. Caudal mínimo probabilístico mensual de las fuentes superficiales actuales

PARA UN PERIODO DE DISEÑO DE 20 AÑOS

| Municipio | Fuente            | Caudal medio mensual (m <sup>3</sup> /s) |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | Caudal Medio Anual (m <sup>3</sup> /s) |
|-----------|-------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
|           |                   | Oct                                      | Nov    | Dic    | Ene    | Feb    | Mar    | Abr    | May    | Jun    | Jul    | Ago    | Sep    |  |
| Padcaya   | Huacanqui 1       | 0.0070                                   | 0.0140 | 0.0569 | 0.0779 | 0.0594 | 0.0497 | 0.0155 | 0.0064 | 0.0026 | 0.0011 | 0.0004 | 0.0002 | 0.0243                                 |
|           | Huacanqui 2       |  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |
|           | Sub-Total Padcaya | 0.0070                                   | 0.0140 | 0.0569 | 0.0779 | 0.0594 | 0.0497 | 0.0155 | 0.0064 | 0.0026 | 0.0011 | 0      | 0      | 0.0243                                 |

Fuente: Elaboración propio

Con los valores probabilísticos del caudal mínimo disponible en las fuentes superficiales se procedió a determinar los valores de la oferta hídrica probabilística:

Tabla 14.2. Oferta mínima probabilística mensual para un periodo de diseño de 20 años

| Municipio | Fuente            | Caudal Medio Mensual (m <sup>3</sup> /s) |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------|-------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|           |                   | Oct                                      | Nov    | Dic    | Ene    | Feb    | Mar    | Abr    | May    | Jun    | Jul    | Ago    | Sep    |        |
| Padcaya   | Huacanqui 1       | 0.0070                                   | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0064 | 0.0026 | 0.0011 | 0.0004 | 0.0002 |
|           | Huacanqui 2       |  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|           | Sub-Total Padcaya | 0.0070                                   | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0064 | 0.0026 | 0.0011 | 0.0004 | 0.0002 |

Fuente: Elaboración propio

## 15. ESCENARIO BAJO INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Para desarrollar el escenario de la oferta hídrica bajo influencia del cambio climático, se requiere adoptar un modelo de cambio climático para el Proyecto

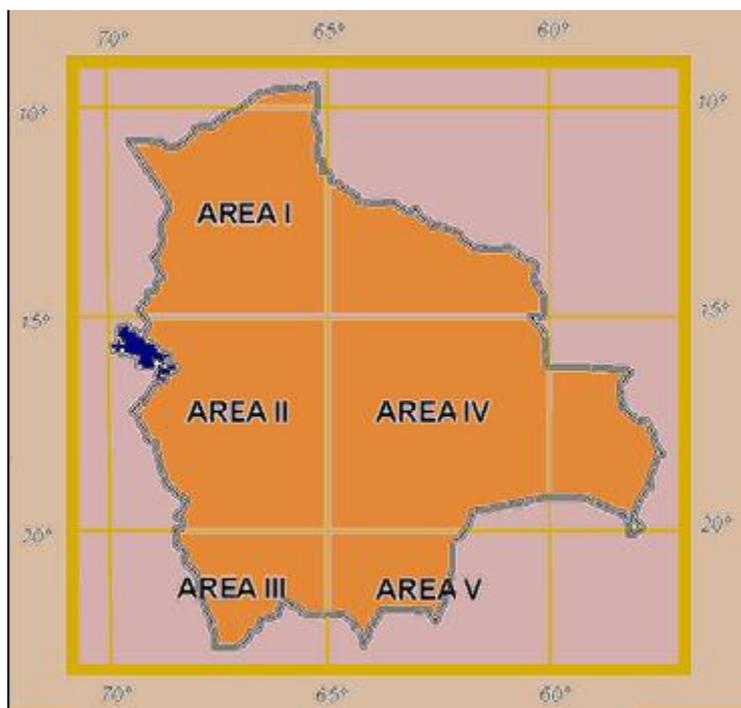
Los modelos de cambio climático que se han empleado para analizar las variaciones de temperatura, precipitación y caudal, difieren en su metodología y datos a ser aplicados. Entre los documentos que detallan la aplicación de modelos de cambio climático en el área de estudio, se tienen:

- Análisis del impacto de posibles cambios climáticos en la hidrología superficial de la cuenca del Río Bermejo, Formulación del Programa Estratégico de Acción para la Cuenca del Río Bermejo, 1999
- Primera Comunicación Nacional ante la Convención de Cambio Climático, Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación, 2000

El primer documento detalla la aplicación del modelo de Wigley y Jones (1985), sin embargo, su aplicación es para caudales anuales, y para ello se debe realizar la estimación de parámetros de cambio de la precipitación y la evapotranspiración potencial.

En el segundo documento, existen conclusiones importantes sobre el cambio en la temperatura y la precipitación, a partir de la aplicación de modelos de cambio climático en cinco zonas del territorio nacional, la que corresponde al área de estudio es la Zona V, como se observa en la siguiente imagen:

Figura 15.1. Áreas climáticas para el uso de los modelos de circulación general



Fuente: Mapa N°3 de la Primera Comunicación Nacional ante la Convención de Cambio Climático (2000)

En el documento de referencia se analizaron varios escenarios climáticos que poseen las siguientes características:

- El SENAMHI combinó los programas MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse gas Induced Climate Change) y el SCENGEN (SCENarioGENerator). El primero de ellos presenta las estimaciones de las concentraciones de GEI, y la temperatura global entre los años 1990 al 2100; en tanto el segundo combina los resultados del MAGGIC y los MCG.
- El trabajo realizado por el SENAEMI contempla tres escenarios globales de cambio climático: IS92a (considerado como escenario de referencia por el Comité de Negociaciones de la CMNUCC, estima un rango medio de emisiones futuras, asumiendo un grado modesto de intervención para reducir emisiones de GEI, se considera como escenario de referencia), IS92c5 (escenario optimista) y IS92e (escenario pesimista), respectivamente.
- El escenario IS92a hace las siguientes consideraciones; la población tendrá un incremento hasta el año 2100 alcanzando 11.3 mil millones, el crecimiento económico será de 2.9% hasta el año 2025 y de 2,3% hasta el año 2100, el costo de la energía solar bajará a 0,075 Kw/h, el costo de petróleo será 70 \$US /barril. El esfuerzo de reducción de los países desarrollados será para mediados del próximo siglo.
- El escenario IS92c hace las siguientes consideraciones: la población alcanzaría 6.4 mil millones de habitantes para el año 2100. El crecimiento económico será de 2.0% hasta el año 2025 y 1.2% hasta el año 2100. El consumo global de energía es de 8.000 EJ de petróleo convencional y 7.300 EJ de gas natural. El costo de la energía nuclear disminuye anualmente en 0.4%.
- El escenario IS92e considera incremento de población hasta el 2100 de 11,3 billones, crecimiento económico de 3.5% entre el 1990 y el 2025 y posteriormente de 3.0% hasta el 2100 e incremento de la energía fósil del 30%.

- Ambos modelos consideran la existencia de medidas de control y acuerdos internacionales y esfuerzos de reducción de emisiones de los países en desarrollo a partir de mediados de siglo.

Las conclusiones abordadas en el documento a propósito de dos estudios desarrollados:

- Una comparación entre ambos estudios (PNCC, 1997 y SENAMHI, 1998) es difícil de realizar toda vez que los puntos de partida son diferentes, sin embargo en términos generales se aprecia comportamientos similares en los resultados.
- En la Cuenca del Plata, relacionada con el área V, se puede apreciar también aumento de temperaturas, sin embargo los estudios difieren en cuanto a precipitación toda vez que en un caso se presentaría reducción de precipitación y en el otro (SENAMHI) incremento.

Para el presente estudio se adoptó la influencia del cambio climático bajo un escenario pesimista (IS92e), para el cual las variaciones de la precipitación son como se expone en el siguiente cuadro:

Tabla 15.1. Variación de la precipitación en relación a la normal (periodo 1961-1990) en los diferentes modelos de circulación general (HADCM2. UKHI. GISSEQ) PARA EL ESCENARIO IS92E

|               | 2030        |                | 2050        |                | 2100        |                |
|---------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|
| AREA V        |             |                |             |                |             |                |
| Meses secos   | (-13) a 21% | (-0.6) a 4.2mm | (-19) a 33% | (-0.9) a 7 mm  | (-63) a 68% | (-1.8) a 14 mm |
| Meses húmedos | (-8) a 22%  | (-3) a 30mm    | (-13) a 34% | (-4.4) a 63 mm | (-25) a 69% | (-9) a 127 mm  |

Fuente: Tabla 3.6 de la Primera Comunicación Nacional ante la Convención de Cambio Climático (2000)

Para el análisis de la influencia del cambio climático se adoptaron las condiciones más pesimistas del modelo, considerando el horizonte de análisis del año 2036, para lo cual la precipitación tiene una variación porcentual de -19 % en los meses secos y de -13% en los meses húmedos.

Estableciendo que los meses secos se encuentran comprendidos entre Abril y Septiembre, y los meses húmedos en los restantes del año, se procedió a encontrar los valores medios mensuales de la precipitación bajo la influencia de un escenario de cambio climático pesimista, y consiguientemente afectados por los porcentajes que corresponden a cada periodo (seco y húmedo). Una vez encontrada la precipitación media mensual areal para cada cuenca, se procedió a determinar el caudal medio mensual aplicando el modelo del coeficiente de escorrentía anual.

Tabla 15.2. Caudal medio mensual de las fuentes superficiales actuales para un escenario pesimista de cambio climático

| Municipio | Fuente                   | Caudal Medio Mensual (m <sup>3</sup> /s) |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               | Caudal Medio Anual (m <sup>3</sup> /s) |
|-----------|--------------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--|
|           |                          | Oct                                      | Nov           | Dic           | Ene           | Feb           | Mar           | Abr           | May           | Jun           | Jul           | Ago           | Sep           |  |
| Uriondo   | Alisos                   | 0.2829                                   | 0.7827        | 1.4211        | 3.5738        | 4.8289        | 4.5183        | 2.5752        | 0.9897        | 0.5902        | 0.4003        | 0.3242        | 0.2600        | 1.7123                                 |
|           | <b>Sub-Total Uriondo</b> | <b>0.2829</b>                            | <b>0.7827</b> | <b>1.4211</b> | <b>3.5738</b> | <b>4.8289</b> | <b>4.5183</b> | <b>2.5752</b> | <b>0.9897</b> | <b>0.5902</b> | <b>0.4003</b> | <b>0.3242</b> | <b>0.2600</b> | <b>1.7123</b>                          |

Fuente: Elaboración propio

Tabla 15.3. Caudal medio mensual de las fuentes superficiales actuales para un escenario pesimista de cambio climático

| Municipio | Fuente                   | Caudal medio mensual (m <sup>3</sup> /s) |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               | Caudal Medio Anual (m <sup>3</sup> /s) |               |
|-----------|--------------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--|---------------|
|           |                          | Oct                                      | Nov           | Dic           | Ene           | Feb           | Mar           | Abr           | May           | Jun           | Jul           | Ago           | Sep           |  |               |
| Uriondo   | Alisos                   | 0.0250                                   | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250        | 0.0250                                 | 0.0393        |
|           | <b>Sub-Total Uriondo</b> | <b>0.0250</b>                            | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b> | <b>0.0250</b>                          | <b>0.0393</b> |

Fuente: Elaboración propio