
***Gestion des ressources hydriques des villes de La Paz et
d'El Alto (Bolivie) : modélisation, apports glaciaires et
analyse des variables***



Thèse de doctorat présentée par

Carlos A.A. OLMOS G.A.

*en vue de l'obtention du grade
académique de Docteur en Sciences*

Février 2011

Sous la direction du Prof. Frank Pattyn

***Gestion des ressources hydriques des villes de La Paz et
d'El Alto (Bolivie) : modélisation, apports glaciaires et
analyse des variables***

Thèse de doctorat présentée par

Carlos A.A. OLMOS G.A.

*en vue de l'obtention du grade
académique de Docteur en Sciences*

Février 2011

Sous la direction du Prof. Frank Pattyn

Remerciements...Agradecimientos:

Merci, Muchas gracias

Deseo agradecer a la gente de mi laboratorio en la ULB, al equipo IRD- IHH- IAI, a EPSAS, a SENAMHI quienes confiaron e hicieron posible esta tesis.

Frank, muchas gracias por guiarme, confiar en mi, ayudarme en todo sentido, luego de esta etapa, será un gusto llamarte mi amigo. Por estar, por apoyarme, encontrar e inventar soluciones y dar vuelta de cabeza las cosas, para ayudarme, como profe y en lo humano.

Jean Louis, gracias por tu confianza desde esa primera llamada que hice desde La Paz. Ártica sigue tocando en Bolivia, no olvidaré jamás ese regalo y tu simpatía.

Edson, tu me guiaste e hiciste posible Montpellier y Bruselas, gracias de veras.

Patrick, gracias por la confianza y el estar allí con tu apoyo.

Claire y Francis: Un gracias muy aparte, por sostenerme y ayudarme por lo ánimos, por esta compañía incondicional, no solo en la línea final sino siempre y con todo, gracias. Querida Claire gracias por preocuparte, por cada detalle, tanto de mi tesis como míos, muy parecido a una mamá belga.

Fred, Thierry, gracias por sacar e inventar tiempo, gracias por los consejos y la amistad y estar siempre listos y prestos a todo.

Marie, Saida, Charlotte y Dennys 1 y 2, Jiayun, DD: Que buen laboratorio, gracias amigos, uds. hacen el labo muchachos. Gracias por su ayuda, y por impedirme maltratar aún más a la legua francesa.

Henry, Annette y Mau: Son mi base y mi fuerza, gracias por su amistad. Uds. representan los dos lados del charco y mi vida en ambos lados. Gracias amigos.

Silvia y Ricardo: que locura el encontrarlos aquí y ser parte de este mi mundo, la amistad con uds. es más fuerte es increíble pensar que son ya dos aventuras que tuvimos juntos, gracias por eso y por su amistad.

Lucia y Valentina: Son más grandes que las distancias, son increíbles amigas. Dos veces en Bruselas y organizar la quedada con todos; fue increíble verlas gracias de veras eso me llenó de energías. Tiempo y distancia no son nada con una gran amistad.

Inma, Juanito, Bea, Macarena: Se trajeron la magia de Montpy a Bruselas... que grande decirme su amigo, gracias. **Nora**... siempre presente desde Bilbo... gracias.

Reto, Ayat, Cyprien: Que grandes son!!! Especies en vía de extinción, únicos y raros...grandes amigos, combinaciones que se ríen del estereotipo y lo combinan siendo ciudadanos del mundo...gracias por la simpatía y el cariño. Al igual que uds. yo también soy uno más de esos extranjeros, con sabor a cerveza belga y con mañas de todos lados.

Clau, Fabri, Mau, Dani: Gracias por ser mi fuerza y ser mis amigos. Gracias por esos vasos vacíos al amanecer y el aliento. Las despedidas y los encuentros, por ser mi hogar donde quiera que este.

Ivette, Tomás, gracias por su confianza, su ayuda y su amistad sincera y creer en mi.

Negrita: Entraste recién a mi vida, pero me apoyaste mucho... gracias por tu amor, tu paciencia, el hecho de ser y estar... por ser quien me espera en la página subsiguiente de este sueño.

A toda la gente que estuvo detrás mío, perdón por la omisión si no están arriba mencionados y que talvez olvidé al escribir esto...ustedes, saben que aprecié muchísimo su ayuda.

Queridos amigos en las páginas siguientes encontraran algo sobre uds. y muchas gracias.

Remerciements...Agradecimientos:

Bruselas, un día cualquiera entre el 2010 y el 2011

Queridos Ignacio y Sergio:

Antes que todo comentarles que todo va bien, ¿Sergio recuerdas que buscaba mi piedra en Bruselas?, bueno la encontré y se que ahora está allí y allí se queda, en el 50 de la calle Roosevelt. No volví, a verla luego de haberla encontrado, ya que fue ese el momento cuando la necesitaba, recuerdas?, allí se queda para que otro la descubra. Y no se si quiero volver a verla, creo que rompería un poco la mística de ese asunto, ¿no lo crees?

Deseaba contarles un sueño y como todo sueño es extraño, sé que sin embargo sé que lo entenderán muy bien:

Recuerdo una sensación: el sentir haber tocado una de mis mejores canciones, talvez no la mejor y en el camino de vuelta (antes de volver a casa), sentía que sin que muchos lo sepan fue una de las mejores notas que pude sacarle a algún instrumento. En el camino me encontré un ser blanco y extraño y lo seguí. Si, creo que ya lo saben, era el conejo de Alicia que me decía que debía buscar algo. No recuerdo bien que.

Al seguirlo, estoy feliz de haber conocido a alguien llamado **Frank** quien me guió en esta búsqueda, sin embargo conocí primero a su socio **JLT** que me dijo que era bienvenido en mi búsqueda (luego tuve el gusto de llamarlos amigos). Ahora que recuerdo, esta lejos ese día que **Edson** me dijo que esto pasaría, si yo lo intentaba y si yo la buscaba... que podía pasar por el espejo; también **Patrick** me dijo eso.

Era diciembre, en invierno de esta parte del mundo, hacía frío y en el camino en un lugar más frío aún, nunca pensé que **Claire** (una gran amiga), junto con **Francis** su compañero, iban a estar allí, sobre todo para apoyarme en una larga línea final hacia lo que debía ser mi objetivo. (Ahora que estoy despierto ya no recuerdo ese objetivo, curioso no?). Junto a ellos estaban **Fred** que me regaló un reloj valioso, **Thierry** que siempre reía como el gato del sueño de alguna otra noche; igual estaban **Marie, Saida, Charlotte, JT, DD, DC** y **Dennys**, "**los béglicos**"...curiosos y simpáticos seres del lugar:

Seguí caminando y encontré a **Ivette** a **Tomás**, junto a la fuente de agua (cerca del inicio de un camino que lleva hacia el país de los buenos recuerdos y mis raíces en los yungas), allí descubrí que el agua es mi elemento y que a partir de ella sale una dualidad que apenas empiezo a conocer. Pero creo que esa es otra historia. Todos ellos me ayudaron a buscar este objetivo y me dieron pistas. (Cada vez que lo pienso se vuelve más vago aún, ya comenzaba a olvidar lo que buscaba).

Contarles, que llegué a una ciudad extraña, un niño es su símbolo y echando aguas por la calle... gracioso no? Allí conocí a **Henry, Annette la belle..ge!**, **Mauricio** ... y además me encontré a otros personajes que juntos a la oruga y al gato risueño estaban en el sueño de la noche anterior en un lugar cerca al mediterráneo: **Silvia y Ricardo** ellos fueron la razón para quedarme y sentirme bien en este lugar.

El sueño se torno extraño y bonito a la vez ya que baile con **Lucía y Valentina** bajo la nieve, es cierto, lo juro, los personajes del sueño de la noche anterior venían donde yo ahora vivía (**Juanito, Macarena, Bea e Inma**) a **Nora** la escuchaba, pero no vino. Escuchaba algo así: La gente nos mira y dice, estos si que son felices no?... jajaja ahora que lo recuerdo es gracioso.

Es extraño lo sé, pero es un sueño no? y todo puede pasar...

Todo cambió, el conejo ya no estaba, sin embargo yo ya me había vuelto un personaje más de la ciudad. Había ratos que no me sentía muy bien pero, los vasos vacíos se llenaban, cuando en la madrugada de un día largo, recibía un llamado, ya sabía que eran ellos...**Clau y Fabri**. Eran vísperas de navidad y mi casa se llenó cuando llegó **Daniel** acompañado de *caracoles y fideos*.

Al establecerme comencé a preguntarme que hacía allí, ya había olvidado mi búsqueda, solo vivía en el lugar y comencé a pensar en muchas cosas te las comenté según vienen a mi cabeza ahora, por favor no se alarmen si no tiene sentido, creo que es esa confusión del segundo después de despertarse.

...y cuando ya había decidido ser solo una gaviota, Juan cansado y adolorido se dio cuenta que volaba en el oscuro cielo y pensó: las gaviotas no vuelan en la noche...

Desde mi casa entre Obrajes y Heger y con Lola mi bicicleta me encontré un Oso de peluche en la calle, descubrí algo nuevo, nuevo en mí y allí supe que nada es azar, yo ya lo sabía, soy quien guía mi camino, ya que todo son Ilusiones con color esperanza, todo se trata de vasos vacíos y llenos para brindar mi entrada de nuevo a una casa, aún con muchos espíritus, por haberme encontrado a mi mismo y a Isabel, bailando sobre las mesas con el cuervo. Entré y salí de Macondo, alguien también llegó un día en invierno en un lugar de mi chaco y se fue con las aguas del río Magdalena, la reencontré en Copacabana, sin embargo fue para decirle adiós, que es el tiempo quien dirá que fue todo esto..

Descubrí luego que tenía *mas de cocinero y de poeta callejero* que de ingeniero en las venas, y *bailé bajo la nieve*, toqué la historia en *Mons, en las Ardenas, en Waterloo, en París y en Londres*, allí encontré a **Paco** y recordé que *Europa que fue realidad, que no había sido un sueño de verano entre trenes, con mochila, cruzando el Adriático en barco*, sin embargo también encontré *marfil* en el *cementerio de los elefantes* en un *atajo* que descubrí entre *las cumbres de los glaciares de aquí y de allá*. Junto con *Joaquin y un elefante rosado* tomé un *mate* en la *Grand Place*, diciéndome varias veces, *no sos vos soy yo, que mi moneda estaba echada al aire y daba vueltas* y lo mejor de todo, es que, esta fiesta acababa de empezar, esta poesía venía de comenzar y que la suerte no estaba echada aún.

¿Que les puedo decir? desperté creyendo que la anarquía es posible y creo que todo es posible y que espero que el día en que no lo crea, vuelva esta hoja a mis manos, esta misma, que les envío ahora. Solo una certeza tengo, que esta hoja fue escrita en la mitad de mi vida. Solo tengo esa certeza, ¿cómo? no lo sé, solo la tengo, hoy termina la primera mitad de mi vida.

Nicolás decía que sería bueno guardar los olores en algo, tengo tantos aromas dentro de mi, que me hacen pensar que este sueño fue realidad. También él decía, que cuando tienes algo más de lo que puedes cargar en la espalda ya comienzas a echar raíces... creo que es mi tiempo para de eso. Sé que ahora, al volver, sucederá algo que le pasó al alquimista, que en casa me espera mi tesoro y creo que ya estoy preparado para encontrarlo. Ahora me pregunto si el objetivo y el algo del conejo no era esto??? No lo sé, cuando les de un abrazo en persona te lo comentaré.

Como en todo sueño hay algunos personajes borrosos que fueron importantes y ahora al despertar no los recuerdo, es una pena, se que eran también importantes. Disculpa, ya dejo de escribir ya que me debo ir a tomar una ducha en **Héger**, a lavar mi ropa en **Solbosch** y a comprar mis víveres cerca del cementerio de **Ixelles**, esta noche cocinaré algo y tomaré una cerveza para festejar mi sueño. Reciban un abrazo. Ah! esperen hay algo más...

Ahora que estoy despierto pienso **que Dios siempre estuvo allí**, haciendo llamar a los amigos cuando precisaba de ellos, haciendo que se retrasen vuelos o que la compu no marche cuando iba a hacer alguna tontería o cuando sopló ese viento entre el laboratorio y mi casa, para recordarme mi camino y algún otoño de 2004 con las hojas secas en Montpellier, o cuando recibí la paz en el ultimo banco en Flagey, La duda no es si yo creo en Él, la duda es como Él sigue creyendo en mi después de todo. Tengo grandes sospechas que fue Él, quien mando al conejo...

Carlos Olmos

PD. Ah! me olvidaba...solo algo más... Bélgica, de donde les escribo es increíble, amo las cervezas de aquí, el chocolate e incluso confieso haber caminado alguna vez, una hora, solo para comer unas frites. Adoro sentarme en la Grand Place y bajarme dos paradas antes en el bus solo para poder cruzarla caminado, me encantan los estanques de **Flagey**. Se volvió algo parecido al camino entre Triolet, la Comedie y la place de l'Europe en Montpellier. En ambos lugares he dejado algo de mi que todavía sigue haciendo esos caminos y lo seguirá haciendo por mucho tiempo más.

GRACIAS A LOS PERSONAJES FANTASTICOS DE ESTE SUEÑO

DEDICATORIA

A mi hijo, mi cachorro, mi principio y fin, mi mundo. Para recordarte siempre, que todos los sueños son posibles, el único requisito es atreverse a hacerlos realidad y decirte que tanto el camino como el fin son importantes. Esto es lo que aprendí haciendo esta tesis y deseo transmitírtelo.

Gracias por existir: "Mi hijo, tu libro y nuestro árbol"

A mi madre, una gran mujer que me enseñó a volar como Juan Salvador Gaviota, alguien a quien admiro mucho y a quien quiero parecerme. Gracias por tu fortaleza, tus sacrificios, tu amor, cariño y la mucha paciencia.

Esta, es tu tesis y tu doctorado, para mi quedan, el valioso camino recorrido, tus enseñanzas y tu cariño, además de la maravillosa gente que conocí a lo largo de esta etapa y en esta increíble experiencia que se llama vida.

Résumé

L'entité formée par les villes de La Paz et El Alto est l'agglomération urbaine la plus importante de la Bolivie. Comme dans toutes les grandes villes, la gestion des ressources en eau représente un défi de taille à relever. Les décisions stratégiques concernant la gestion de l'eau revêtent une importance capitale du fait de l'importance de ces deux villes sur le plan national. De telles décisions doivent être prises en tenant compte d'interactions complexes entre facteurs environnementaux, légaux et sociétaux. Citons notamment, les conditions particulières du milieu telles que la géographie, la dynamique des ressources en eau, l'infrastructure existante et à prévoir, les lois sur la propriété des ressources et surtout l'état des connaissances actuelles et de la recherche sur l'ensemble des variables et des enjeux de la gestion de l'eau.

Dans cette thèse, nous présentons une analyse des variables et des enjeux de la gestion de l'eau comme un outil utile pour déterminer les bases de l'application de la GIRE (Gestion Intégrée des Ressources en Eau). Cette analyse nous permet à la fois de diminuer les incertitudes qui existent sur chacune de ces variables mais aussi d'établir les relations de dépendance entre elles et de conclure à l'importance relative de chacune de ces variables dans le bilan de l'offre et de la demande en eau. Cette analyse représente également un outil de diagnostic des systèmes en eau existants pouvant être utilisé pour la planification future de la gestion de l'eau.

En suivant cette démarche, les décisions à prendre sur la gestion de l'eau tant dans le cadre de la planification stratégique que dans l'utilisation quotidienne de l'eau se baseront sur des connaissances approfondies, permettant de diminuer les risques d'erreur.

Nous présentons comme résultats de cette recherche, plusieurs conclusions concernant les variables tels que les précipitations, la dynamique de l'apport du bassin versant, le rôle des glaciers dans cet apport, la démographie, la consommation en eau, les pertes dans les systèmes ainsi que l'analyse réalisée sur les contraintes qui pèsent sur les futures sources en eau des villes de La Paz et d'El Alto.

La prise en compte de l'ensemble de ces aspects dans le cadre du bilan de l'offre et de la demande en eau nous apporte comme résultats : les temps, l'influence relative de chaque variable, l'analyse de la gestion de l'eau et une proposition sur sa mise en oeuvre. Par l'application des modèles utilisés et des nouvelles méthodes suggérées dans ce travail, nous proposons de nouveaux outils pour la gestion quotidienne de l'eau.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	1
1.1	De l'eau.....	1
1.2	Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE)	2
1.3	L'application de la GIRE dans cette thèse	5
1.4	La Bolivie, La Paz et El Alto, contexte de la recherche.....	7
1.4.1	Situation géographique.....	7
1.4.2	La gestion de l'eau à La Paz et El Alto.....	10
1.4.2.1	Situation actuelle	10
1.4.2.2	Sources potentielles	13
1.4.3	Vulnérabilité géographique et menaces potentielles.....	17
1.4.4	Sensibilité sociale par rapport aux ressources naturelles	17
1.4.5	Situation actuelle de la planification	18
1.5	L'analyse des variables, processus et aspects particuliers de la gestion, une voie pour chercher les bases de la GIRE.....	20
1.6	Objectifs de la thèse, hypothèses et méthodologie de travail	20
1.6.1	Objectifs.....	20
1.6.2	Méthodologie	21
2	GIRE, GESTION DE L'EAU POTABLE ET SES VARIABLES	23
2.1	Antécédents de la GIRE.....	23
2.2	La GIRE en Bolivie	24
2.3	La GIRE, privatisation versus une gestion équitable de l'eau en Bolivie	25
2.4	Concepts guides pour l'application de la GIRE.....	26
2.5	Analyse des variables en jeu : formulation du modèle descriptif	28
3	PRECIPITATIONS	36
3.1	Introduction.....	36
3.2	Base de données.....	39
3.3	Bassins Sources.....	41
3.4	Analyse des précipitations.....	42
3.4.1	Questions pour la gestion des ressources en eau	44
3.4.2	Variation de la quantité des précipitations annuelles	45
3.4.3	Concentration et retardement des précipitations.....	48
3.4.3.1	Recherche d'une méthodologie pour déterminer la concentration des précipitations, leur retard et leur effet pour la gestion de l'eau	48
3.4.3.2	Prévision des précipitations annuelles.....	59
3.5	Conclusions.....	64
4	BILAN HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT.....	67
4.1	Introduction.....	67
4.2	Questions- clés pour l'analyse.....	69
4.3	Rapport précipitation et écoulement.....	69
4.3.1	« Architecture » des bassins versants.....	69
4.3.2	Régime des débits	70
4.3.3	Rapport écoulement - précipitation.....	72
4.4	Application du bilan Hydrologique	74
4.4.1	Méthode et algorithmes du bilan Hydrologique	74
4.4.2	Simulations	88
4.5	Analyse et discussion des résultats	92
4.6	Conclusions	95

5	GLACIERS	98
5.1	Introduction	98
5.2	Recherches menées et disponibilité des données	99
5.3	Modélisation des glaciers	100
5.3.1	Formulation physique du modèle.....	100
5.3.2	Formulation computationnelle du modèle.....	105
5.3.3	Formulation des bases du modèle	106
5.3.4	Calibration du modèle. Reconstruction du retrait du glacier de Chacaltaya	110
5.3.5	Application du modèle et estimation du stock glaciaire	117
5.4	Conclusions	134
6	CAPACITÉ TECHNIQUE DE MOBILISATION DE L'EAU	135
6.1	Barrages	135
6.2	Usines de traitement des eaux.....	140
6.3	Réseaux.....	141
6.4	Pertes totales.....	144
6.5	Conclusions	144
7	ESTIMATION DE LA POPULATION ET BESOIN EN EAU.....	146
7.1	La demande en eau.....	146
7.2	Estimation de la population	147
7.3	Couverture des réseaux	149
7.4	Estimation de la consommation journalière en eau par habitant (CJE)	150
7.5	Estimation des demandes	153
7.6	Conclusions	158
8	BILAN DE L'OFFRE ET DE LA DEMANDE EN EAU – BASES DE LA GIRE.....	161
8.1	Bilan de l'offre et de la demande en eau.....	161
8.2	Bases de la GIRE	171
8.2.1	Évaluation des ressources hydriques : Création et suggestions d'instruments de gestion	171
8.2.2	Planification de la GIRE.....	175
8.2.3	Gestion de la demande.....	176
8.2.4	Autres concepts pour l'application de la GIRE	177
8.3	Conclusions	178
9	CONCLUSIONS.....	180
10	BIBLIOGRAPHIE.....	190

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Définition de la gestion de l'eau comme une voie pour le développement et le bien-être.....	4
Figure 1.2 : Vulnérabilité entre les ressources en eau douce et leur gestion (Fig. 3.2 Rapport IPCC, 2007)	6
Figure 1.3 : Localisation de la zone d'étude.....	7
Figure 1.4 : Villes de La Paz et El Alto et systèmes de distribution d'eau potable	9
Figure 1.5 : Organisation politico-sociale de la Bolivie.....	14
Figure 1.6 : Des conflits liés à l'environnement et aux ressources naturelles jusqu'en 2005	18
Figure 1.7 : Méthodologie de recherche.....	22
 Figure 2.1 : La participation du public dans la gouvernance de l'eau	26
Figure 2.2 : Première approximation pour la construction du modèle descriptif.....	28
Figure 2.3 : Deuxième approximation pour la construction du modèle descriptif	29
Figure 2.4 : Troisième approximation pour la construction du modèle descriptif.....	30
Figure 2.5 : Le cycle de l'eau.....	30
Figure 2.6 : Processus hydrologiques dans le bassin versant	31
Figure 2.7 : Capacité de mobilisation de l'eau et ses composants	31
Figure 2.8 : Demande et ses composants.....	32
Figure 2.9 : Quatrième approximation pour la construction du modèle descriptif.....	34
Figure 2.10 : Modèle descriptif.....	35
 Figure 3.1 : Représentation de la zone d'influence de la ZCIT.....	36
Figure 3.2 : Localisation des glaciers analysés dans l'étude de Ramírez (2003) et du paléo lac Tauca	37
Figure 3.3 : Analyse de la variation des précipitations [mm/jour] (Vimaux, 2005)	38
Figure 3.4 : Diagramme ombrothermique de La Paz	39
Figure 3.5 : Bassins Versants sources et leurs voisins	41
Figure 3.6 : Altitude et Précipitations par station.....	43
Figure 3.7 : Régime mensuel des précipitations	43
Figure 3.8 : Apport en eau du bassin versant et précipitations par période au total annuel (Ouest).....	44
Figure 3.9 : Prévission des Impacts potentiels du Changement climatique dans le monde sur l'eau (à la fin du XXIème siècle).....	45
Figure 3.10 : Résultats d'analyses de tendances de l'étude de Jaffrain (2007)	46
Figure 3.11 : Application de l'indice de concentration des précipitations.....	49
Figure 3.12 : Courbe de décharge moyenne de San Calixto et d'El Alto (AH Septembre-Août).....	50
Figure 3.13 : Comparaison des courbes de décharges moyennes de nos stations (AH Septembre-Août)	51
Figure 3.14 : Variabilité de la courbe de décharge entre stations (AH: Septembre-Août).....	51
Figure 3.15 : Variabilité de la courbe de décharge entre stations (AH: juillet - juin)	52
Figure 3.16 : Retard de la précipitation par rapport à la période de référence 1961-90. Station San Calixto Si[%]= [5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50]	55
Figure 3.17 : Concentration des précipitations par rapport à la période de référence 1961-90. Station San Calixto Si[%]= [5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50]	56
Figure 3.18 : Tendance de la concentration des précipitations.....	57
Figure 3.19 : Niveaux de fonctionnement du barrage Hampaturi 1999 - 2007.....	58
Figure 3.20 : Analyse de l'influence de la concentration de la précipitation sur le fonctionnement du Barrage Hampaturi, Années 2005 et 2006	58
Figure 3.21 : Exemple de Variation interannuelle des précipitations (S. San Calixto).....	59
Figure 3.22 : Jours possibles d'occurrence, J_i , $J_{i\max}$, $J_{i\min}$ pour S_i (AH : septembre-août)	61
Figure 3.23 : Jours possibles d'occurrence, J_i , $J_{i\max}$, $J_{i\min}$ pour S_i (AH : Juillet-juin).....	61
Figure 3.24 : Essai de prédiction des précipitations (2003-2007) AH: Juillet-Juin.....	63
Figure 3.25 : Evaluation de l'erreur de la prédiction de la P totale	63

Figure 4.1 : « Architecture » des bassins versants	69
Figure 4.2 : Régime d'écoulement.....	70
Figure 4.3 : Régime mensuel de précipitation.....	71
Figure 4.4 : Rapport P, E et Cesc	73
Figure 4.5 : Rapport E_B , E_{TW} et Précipitation.....	81
Figure 4.6 : Comparaison : E_B , Précipitation (P) et $P+(fo)$	84
Figure 4.7 : Comparaison : Valeur fo du forçage pour Hampaturi et les volumes d'eaux envoyés d'Ajuankhota	85
Figure 4.8 : Evolution des valeurs G_N et G_o calculées pour Tuní, comparées au bilan de masse du glacier Zongo (mensuelle 2000-2008).....	86
Figure 4.9 : Evolution des valeurs G_N et G_o calculées pour Tuní, comparées au bilan de masse du glacier Zongo (moyenne mobile chaque 4 mois, 2000-2008)	86
Figure 4.10 : Valeurs cumulées de G_N et G_o calculées pour Tuní, comparées au bilan de masse du glacier Zongo (moyenne mobile chaque 4 mois, 2000-2008)	87
Figure 4.11 : Evolution des valeurs G_N et G_o calculées pour Tuní, comparées aux bilans de masse des glaciers Chacaltaya, Zongo et Charquini (Annuelle, 2000-2008)	87
Figures 4.12 : Simulations des scénarios de changement de la a) précipitation (P) et de la température (T) b) effets combinés de changement de P et T	89
Figures 4.13 : Simulations des changements de la température	90
Figure 4.14 : Variation pourcentuelle de l'écoulement par rapport aux scénarios simulés.....	91
Figure 4.15 : Comparaison des scénarios E3(P*99) et E9 (T+2.5°C).....	92
Figure 5.1 : Axes de référence	101
Figure 5.2 : Contraintes intérieures d'un glacier.....	102
Figure 5.3 : Formulations du schéma de différences finies.....	105
Figure 5.4 : Niveaux de références du modèle	106
Figure 5.5 : Modèle Numérique de Terrain Chacaltaya	106
Figure 5.6 : Topographie de Chacaltaya et surfaces glaciaires entre le PAG et 1998	107
Figure 5.7 : Bilan de masse du glacier de Chacaltaya (1991-2004)	109
Figure 5.8 : Bilan de Masse du Glacier de Zongo (1991-2006)	109
Figure 5.9 : Exemple d'estimation de β (Zongo sans valeurs $Z > 5500m$)	109
Figure 5.10 : Résultats Etape I (Exemple d'application pour un $\beta = 0.004983$).....	112
Figure 5.11: Estimation de Surfaces à partir de la variation d'ELA et pour différentes valeurs de β	113
Figure 5.12 : Premiers résultats Etape II. (A)	114
Figure 5.13: Premières résultats, Etape II-1998. (B).....	114
Figure 5.14 : Exemples des résultats obtenus avec l'introduction du glissement basal dans le modèle.....	115
Figure 5.15 : Traitement différencié par zones de la vallée de Chacaltaya en fonction de son exposition	116
Figure 5.16 : Modélisation de l'étape II de Calibration : Reproduction de la géométrie du glacier de Chacaltaya pour 1998.....	116
Figure 5.17 : Valeurs d'ELA moyennes de Chacaltaya (1700-1998).....	117
Figure 5.18 : Modélisation du recul final de Chacaltaya I	118
Figure 5.19 : Comparaison des formes du glacier	119
Figure 5.20 : Modélisation du recul final de Chacaltaya II	119
Figure 5.21 : Exemples des résultats de l'application de la méthode de Farinotti	122
Figure 5.22 : Exemples des résultats de l'application de la méthode de Farinotti	124
Figure 5.23 : Comparaison des épaisseurs estimées pour la méthode Farinotti et des épaisseurs mesurés sur terrains avec radar (Glacier de Charquini Sud)	126
Figure 5.24 : Comparaison des épaisseurs estimées pour la méthode Farinotti et des épaisseurs mesurés sur terrains avec radar (Glacier de Condoriri, Pic Tarija)	127
Figure 5.25 : Comparaison des épaisseurs estimées pour la méthode Farinotti et des épaisseurs mesurés sur terrains avec radar (Glacier de Tuní)	127
Figure 5.26 : Rapport volume – surface de Chacaltaya (1700-2009)	128
Figure 5.27 : Estimation du stock glaciaire (par glacier)	129

Figure 5.28 : Estimation du stock glaciaire (par bassin, système et total pour les villes de La Paz et El Alto).....	130
Figure 5.29 : Détermination des possibles valeurs d'ELA pour une modélisation régionale	133
Figure 5.30 : Estimation de la diminution de l'apport glaciaire en eau pour l'année 2026.....	133
Figure 6.1 : Probabilité associée à la précipitation (Ex. Station Alto Achachicala)	137
Figure 6.2 : Barrages de Tuni, Milluni, Hampaturi et Incachaca, Tres (pr %), Tbes	138
Figure 6.3 : Pertes entre les barrages et les usines.....	139
Figure 6.4 : Pertes d'eau des usines de traitement.....	141
Figure 6.5 : Pertes d'eau dans le réseau	142
Figure 7.1 : Estimation de la population entre 2001 et 2026.....	149
Figure 7.2 : Couverture du service d'eau potable par système, actuelle et prévue pour 2026.....	150
Figure 7.3 : Comparaison CJE, valeurs calculées et prévues	151
Figure 7.4 : CJE dans le monde.....	152
Figure 7.5 : Consommation domestique journalière en eau par habitant selon Eurostat	152
Figure 7.6 : Estimation des consommations (2001-2026) El Alto	154
Figure 7.7 : Estimation des consommations (2001-2026) : Pampahasi	154
Figure 7.8 : Estimation des consommations (2001-2026) : Achachicala	154
Figure 7.9 : Analyse de sensibilité selon l'augmentation de la CJE et la diminution des pertes, El Alto	156
Figure 7.10 : Scenarios du besoin de prélèvement d'eau aux sources (El Alto)	157
Figure 7.11 : Besoin de prélèvement d'eau aux sources (El Alto), Ecart type.....	158
Figure 7.12 : Besoin de prélèvement d'eau aux sources (El Alto), (Max et min)	158
Figure 8.1 : Bilans de l'offre et de la demande en eau pour les différents systèmes pour la période 2001–2026	164
Figure 8.2 : Estimation de l'influence de chaque variable sur le bilan de l'offre et de la demande (Bilan pour l'année 2026)	166
Figure 8.3 : Scenarios de bilan d'offre et demande d'eau d'El Alto en tenant en compte un possible apport de la nappe	167
Figure 8.4 : Proposition de mise en œuvre de la gestion en fonction de l'infrastructure nécessaire.....	169
Figure 8.5 : GIRE comme une proposition de construction d'une stratégie de planification de l'eau.....	175

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : « Dates de repère » de la vision stratégique de l'eau	3
Tableau 1.2 : Principales caractéristiques du service des systèmes d'approvisionnement d'eau potable	10
Tableau 1.3 : Bassins versants source fournissant l'eau à La Paz et El Alto	11
Tableau 1.4 : Caractéristiques des barrages de régulation	11
Tableau 1.5 : Pluviosité annuelle, zone d'étude, par bassin versant (2000-08)	12
Tableau 1.6 : Écoulement par bassin versant (2000-08)	12
Tableau 2.1 : Aspects nécessaires pour l'application de la GIRE à une gouvernance de l'eau	28
Tableau 3.1 : Données disponibles pour étudier les précipitations	40
Tableau 3.2 : Surfaces des bassins versants	42
Tableau 3.3 : Prévion du changement actuel des précipitations (Moyenne de 7 modèles IPCC)	46
Tableau 3.4 : Prévisions de l'augmentation des précipitations PNCC-PRAA (2007)	47
Tableau 3.5 : Besoin en précipitation des Bassins versants alimentant La Paz et El Alto [mm/an]	64
Tableau 4.1 : Coefficient d'écoulement moyen	74
Tableau 4.2 : Résultat de l'application de l'algorithme du bilan hydrologique (Valeurs totales 2000-08)	82
Tableau 4.3 : Résultat de forçage de P : Estimation de G_O	88
Tableau 4.4 : Résumé des résultats	93
Tableau 5.1 : Vérification des données et références de Chacaltaya	108
Tableau 5.2 : Valeurs de β	110
Tableau 5.3 : Paramètres employés pour la modélisation	110
Tableau 5.4 : Résultats Etape I	111
Tableau 5.5 : Résultats finaux de la deuxième étape de calibration	116
Tableau 5.6 : Références et résultats de la modélisation du recul du glacier de Chacaltaya 1998-2010	118
Tableau 5.7 : Moyenne en pourcentage des différences des valeurs entre les épaisseurs calculées pour la méthode de Farinotti et les mesurés sur terrain	126
Tableau 5.8 : Valeurs estimées du stock glaciaire dans les bassins et Systèmes d'eau de La Paz et El Alto	129
Tableau 5.9 : Volumes d'eau estimés, stockés sans les glaciers sources des villes de La Paz et El Alto	132
Tableau 6.1 : Capacité des barrages	135
Tableau 6.2 : Disponibilité des ressources pour chaque bassin	137
Tableau 6.3 : Besoin théorique en eau qui devrait être envoyée aux usines de traitement	138
Tableau 6.4 : Pertes dans les adductions	139
Tableaux 6.5 : Bilan d'eau du barrage à l'usine de traitement [Hm^3/an]	140
Tableaux 6.6 : Pertes d'eau des usines de traitement [m^3]	141
Tableaux 6.7 : Pertes d'eau dans le réseau [m^3]	142
Tableau 6.8 : Pertes totales par système	144
Tableau 7.1 : Population et taux de croissance annuelle en fonction du système	147
Tableau 7.2 : Population par système entre 2001 et 2026	149
Tableau 7.3 : Couverture du service d'eau potable par système, actuelle et prévue pour 2026	150
Tableau 7.4 : CJE par systèmes et par activités	151
Tableau 7.5 : El Alto : Valeurs de référence pour l'estimation des demandes (2001-2026)	154
Tableau 7.6 : Pampahasi : Valeurs de référence pour l'estimation des demandes (2001-2026)	154
Tableau 7.7 : Achachicala : Valeurs de référence pour l'estimation des demandes (2001-2026)	154
Tableau 7.8 : Demandes en eau par système	155
Tableau 8.1 : Valeurs de l'offre pour la situation de base (hm^3)	162
Tableau 8.2 : Résumé des paramètres des scénarios de bilan de l'offre et de la demande en eau	163

ACRONYMES

AISA :	Aguas del Illimani S.A.
CAF :	Corporación Andina de Fomento (Corporation Andine de Promotion vers le développement)
CAMINAR :	Catchment Management and Mining Impacts in Arid and Semi-Arid South America
CGIAB :	Comisión para la Gestión Integral del Agua en Bolivia (Commission pour la Gestion Intégrée de l'Eau en Bolivie)
DANIDA :	Danish International Development Agency (L'Agence danoise pour le développement international)
EISMINT :	European Ice Sheet Modeling INiTiative
ELA :	Equilibrium Line Altitude
ENC :	Eaux non comptabilisées. (ANC : Aguas no contabilizadas)
ENSO :	El Niño - Southern Oscillation
EPSAS :	Empresa Pública y Social del Agua y Saneamiento (Enterprise Publique et sociale de l'eau et de l'assainissement)
GIRE :	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GIRH :	Gestión Integral de Recursos Hídricos
GREATICE :	Programme Glaciers et Ressources en Eau d'Altitude, Indicateurs Climatiques et Environnementaux de l'IRD
GWP :	Global Water Partnership
IGM :	Institut Géographique Militaire
IHH :	Instituto de Hidráulica e Hidrología de l'UMSA (Institut d'Hydraulique et d'Hydrologie de l'Université de San Andrés à La Paz, en Bolivie)
INE :	Instituto Nacional de Estadísticas (Institut National des Statistiques)
IPCC :	Intergovernmental Panel on Climate Change / GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
IRD :	Institut français de Recherche pour le Développement
IWRM :	Integrated Water Resources Management
JICA :	Japan International Cooperation Agency
MMAyA :	Ministerio de Medio Ambiente y del Agua (Ministère de l'Environnement et de l'Eau)
MNT :	Modèle Numérique de Terrain
NCAR :	National Center for Atmospheric Research
NCEP :	National Center for Environmental Prediction
PAG :	Petit Age Glaciaire
PDM :	Plan de Desarrollo Municipal (Plan de développement de la municipalité)
PIEB :	Programa para la Investigación Estratégica en Bolivia (Programme de Recherche Stratégique en Bolivie)
PMIC :	Plan de Manejo Integrado de Cuencas (PGIB : Plan de gestion intégrée des bassins versants)
PNCC :	Programa Nacional de Cambio Climático (Programme National de Changement Climatique)
PND :	Plan Nacional de Desarrollo (Plan National de Développement)
PNUD :	Programme des Nations Unies pour le développement
POT :	Plan de Ordenamiento Territorial (PAT : Plan d'aménagement du territoire)
PRAA :	Programa Regional Andino de Adaptación al Cambio Climático (Programme régional andin d'adaptation au changement climatique)
PROMIC :	Programa de Manejo Integral de Cuencas (Programme National de Gestion Intégrée des Bassins Versants)

SAMAPA :	<i>Servicio Autónomo Municipal de Agua Potable y Alcantarillado. (Service Autonome Municipal Eau Potable et Égouts)</i>
SENAMHI :	<i>Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (Service National de Météorologie et Hydrologie de Bolivie)</i>
SERGEOTECMIN :	<i>Servicio Nacional Geológico y Técnico de Minas (Service Géologique Technique et des Mines).</i>
SISAB :	<i>Superintendencias de Aguas y Saneamiento Básico (Surintendance d'Eaux et d'assainissement → Ancien Institution qui etais l'autorité en matière des eaux en Bolivie)</i>
SS :	<i>Etat stationnaire ou steady-state</i>
TCO :	<i>Tierra Comunitaria de Origen (Terre Communautaire d'Origine).</i>
UMSA :	<i>Universidad Mayor de San Andrés (Université de San Andrés à La Paz, en Bolivie)</i>
UMSS :	<i>Universidad Mayor de San Simón (Université de San Simón à Cochabamba, en Bolivie).</i>
UTM :	<i>Universal Transverse Mercator</i>
WGS84 :	<i>World Geodetic System 1984</i>
ZCIT :	<i>Zone de convergence intertropicale</i>

LISTE DES SYMBOLES

Chapitre 3

$AnJref(i)$:	Anomalie de $J(i)$ par rapport au $Jref(i)$
ICP :	Indice de concentration des précipitations
$J_{(i)}$:	Jour de l'année hydrologique ($1 < i < 365$)
$J_{i\max(S)}$:	Dernier jour de l'année hydrologique où il peut arriver P_i pour une proportion de précipitation S_i
$J_{i\min(S)}$:	Premier jour de l'année hydrologique où il peut arriver P_i pour une proportion de précipitation S_i
$Jref(i)$:	Jour i de l'année hydrologique de la période de référence, (1961-1990) On peut associer une date qui correspondra au jour de référence $Jref(i)$ pour la proportion $S(i)$
$Nref$:	Pourcentage de référence de précipitation journalière ou période $Jref(i+1)-Jref(i)$.
$P_{cumulé_1}$:	Précipitation cumulée jusqu'au moment $J_{i\min(S)}$ [mm]
$P_{cumulé_2}$:	Précipitation cumulée jusqu'au moment $J_{i\max(S)}$ [mm]
P :	Précipitations [mm]
P_i :	Précipitation cumulée jusqu'au jour J_i de l'année hydrologique, ($1 < i < 365$) [mm]
P_T :	Précipitation cumulée totale d'une année hydrologique [mm]
$PTotale_annuelle(S)$:	Prédiction de la précipitation totale annuelle prévue à partir des valeurs associées aux proportions de la précipitation totale (S) [mm]
Q :	Apport en eau du bassin versant [m^3]
r :	Période où a lieu la précipitation $S(i+1)-S(i)$, pour la période de référence.
s :	Période où a lieu la précipitation $S(i+1)-S(i)$, pour l'année d'analyse.
$S(i)$:	Proportion de la précipitation annuelle qui correspond au moment $J(i)$ ($0 < S_i < 1$),
T :	Température [$^{\circ}C$]
ΔC :	Augmentation de la précipitation durant la période $Jref(i+1)-Jref(i)$. (Augmentation (+), Diminution (-))
ΔJ :	Différence de jours entre la période de base $Jref(i+1)-Jref(i)$ et la période de l'année en analyse pour $J(i+1)-J(i)$

Chapitre 4

$Cesc$:	Coefficient d'écoulement
E :	Écoulement (débit) [mm]
E_R :	Débit qui arrive au point de contrôle de la rivière / Écoulement provenant du bassin alimentant le barrage [mm]
ETP_{BV} :	Evapotranspiration au sein du bassin versant (à l'exclusion des eaux d'origine glaciaire) [mm]
ETP_L :	Evapotranspiration lac du barrage [mm]
E_{TW} :	Écoulement de Thornwaite [mm]
Ev_L :	Evaporations provenant des surfaces (sol ou de l'eau) (Zone du barrage) [mm]
G :	Apport en eau des glaciers [mm]
G_N :	Apport glaciaire net, qui arrive au point de contrôle de la rivière [mm]
G_O :	Apport glaciaire en amont du bassin, au pied du glacier
Inf_{BV} :	Infiltration de l'eau dans le sol au sein du bassin versant (approvisionnement de la nappe phréatique) [mm]
Inf_L :	Infiltration du lac de barrage [mm]
N :	Echange en eau entre la nappe et le bassin versant [mm]

$P :$	Précipitations [mm]
$R :$	Proportion de l'écoulement qui fait partie de l'apport glaciaire
$SP :$	Surplus du barrage [mm]
$TV_L :$	Transpiration végétale (sur lac du barrage) [mm]
$U :$	Débit envoyé à l'usine de traitement des eaux [mm]
$V_{(t+\Delta t)} :$	Volume d'eau du système moment $(t+\Delta t)$ [mm]
$Vol_{in} :$	Volume qui arrive au système sur la période Δt [mm]
$Vol_{out} :$	Volume qui sort du système sur la période Δt [mm]
$V_t :$	Volume d'eau du système moment (t) [mm]
$\Delta V :$	Changement du stock du système sur la période Δt [mm]
$VCR_{i(v)} :$	Valeur centrée –réduite de la variable V , pour l'année i .
$\mu :$	Moyenne des valeurs V_i
$\sigma :$	Ecart type des valeurs V_i

Chapitre 5

$\alpha :$	penne dans le sens de la ligne de flux
$\beta :$	Gradient altitudinal du bilan de masse
$\bullet$	
$\varepsilon_{xz} :$	taux de déformation dans le sens x due à la contrainte de direction z
$\rho :$	densité de la glace [kg m^{-3}]
$\vec{u} :$	champ de vitesse [m a^{-1}]
$A(T) :$	paramètre de la loi de flux dépendant de la température [$\text{Pa}^{-n} \text{an}^{-1}$]
$B :$	Topographie basale
$BM :$	bilan de masse [m a^{-1}]
$g :$	accélération gravitationnelle [m s^{-2}]
$H :$	épaisseur de glace [m]
$n :$	exposant de la loi de flux de Glen ($n=3$; Paterson, 1994)
$S :$	Surface [km^2]
$t :$	temps [an]
$TD_{(i,j)} :$	contrainte directrice au point (i,j) (Driving Stress), [N m^{-2}]
$T_{ii} :$	contrainte agissant dans la direction i sur le plan perpendiculaire à la direction i [N m^{-2}]
$V :$	Volume [km^3]

Chapitre 6

$E :$	Écoulement
$Epr :$	Écoulement associée à une valeur de probabilité. [mm Km^{-2}]
$P :$	Précipitation [mm]
$Ppr :$	Précipitation associée à une valeur de probabilité [mm]
$pr :$	Valeur de probabilité
$Q :$	Débit d'apport du bassin [$\text{m}^3 \text{an}^{-1}$]
$Q_{bes} :$	Débit à prélever du barrage pour répondre aux besoins en eau de la population [$\text{m}^3 \text{an}^{-1}$]
$Q_{pr} :$	Débit d'apport du bassin associé à une valeur de probabilité [$\text{hm}^3 \text{an}^{-1}$]
$T_{bes} :$	Temps de résidence indispensable pour couvrir les besoins en eau de la population [mois]
$T_{res} :$	Temps de résidence [mois]
$V_{ef} :$	Volume effectif du barrage [m^3]

Chapitre 7

<i>CJE :</i>	<i>consommation journalière en eau par habitant [m³]</i>
<i>Cr :</i>	<i>couverture du réseau</i>
<i>i :</i>	<i>Indice ou taux de croissance annuelle</i>
<i>Pf :</i>	<i>population future [hab]</i>
<i>Po :</i>	<i>population de référence [hab]</i>
<i>Pop :</i>	<i>population [hab]</i>
<i>t :</i>	<i>temps [an, mois]</i>

Demande :

<i>D_{réseau} :</i>	<i>Consommation en eau de la population du réseau [m³]</i>
<i>D_{out Usine} :</i>	<i>Quantité d'eau à la sortie de l'usine de traitement [m³]</i>
<i>D_{in Usine} :</i>	<i>Volume d'eau entrant de l'usine de traitement ; volume provenant des barrages [m³]</i>
<i>D_{sources} :</i>	<i>Volume d'eau qui doit être prélevé des bassins versants [m³]</i>

Pertes :

<i>Pertes_Réseau :</i>	<i>au réseau [m³]</i>
<i>Pertes_usne_traitement :</i>	<i>dans l'usine de traitement d'eau [m³]</i>
<i>Pertes_aduction :</i>	<i>dans l'aduction [m³]</i>
