

Note: Cette traduction a été établie par le Greffe à des fins internes et n'a aucun caractère officiel

COUR INTERNATIONALE DE JUSTICE

**DIFFÉREND CONCERNANT LE STATUT ET L'UTILISATION DES EAUX DU SILALA
(CHILI c. BOLIVIE)**

RÉPLIQUE DU CHILI

VOLUME 2 (ANNEXES 92 – 99)

15 février 2019

[Traduction du Greffe]

LISTE DES ANNEXES

VOLUME 2 ANNEXES 92 — 99

		<i>Page</i>
Annexe 92	Lettre du 7 avril 1916 adressée au secrétaire du conseil de direction de la FCAB par l'administrateur général de la compagnie	1
Annexe 93	Lettre du 8 septembre 1916 adressée au secrétaire du conseil de direction de la FCAB par l'administrateur général de la compagnie	3
Annexe 94	Bolivian Geology and Mining Survey (SERGEOMIN), <i>Study on Hydrographic Basins, Silala Springs Basin, Basin 20</i> , June 2003	-
Annexe 95	National Report on the Implementation of the Ramsar Convention on Wetlands Submitted by the Plurinational State of Bolivia to the 12 th Meeting of the Conference of the Contracting Parties, 2 January 2015	-
Annexe 96	Ministry of the Environment and Water of Bolivia, <i>Characterization of Water Resources in the Southwest of the Department of Potosí — Municipality of San Pablo de Lipez “Wetlands of Silala Valley and Adjacent Sectors”</i> (Volume II), July 2016	-
Annexe 97	Note n° VRE-Cs-58/2016 du 27 juillet 2016 adressée au conseiller principal pour les Amériques du secrétariat Ramsar par le ministère bolivien des affaires étrangères	6
Annexe 98	Ana Paola Castel, Analyse multi-temporelle à partir d'images satellites des <i>bofedales</i> (zones humides des hauts plateaux andins) des sources du Silala, Potosí — Bolivie, septembre 2017	8
Annexe 99	99.1. Lettre du 5 novembre 2018 adressée à l'agent de l'Etat plurinational de Bolivie par l'agent de la République du Chili	51
	99.2. Lettre du 22 novembre 2018 adressée à l'agent de la République du Chili par l'agent de l'Etat plurinational de Bolivie	52
	99.3. Lettre du 30 novembre 2018 adressée à l'agent de l'Etat plurinational de Bolivie par l'agent de la République du Chili	53
	99.4. Lettre du 11 décembre 2018 adressée à l'agent de la République du Chili par l'agent de l'Etat plurinational de Bolivie	55
	99.5. Lettre du 21 décembre 2018 adressée à l'agent de l'Etat plurinational de Bolivie par l'agent de la République du Chili	57
	99.6. Lettre du 11 janvier 2019 adressée à l'agent de la République du Chili par l'agent de l'Etat plurinational de Bolivie	59

- 99.7. Lettre du 7 février 2019 adressée à l'agent de la République du Chili par l'agent de l'Etat plurinational de Bolivie 60

ANNEXE 92

LETTRE DU 7 AVRIL 1916 ADRESSÉE AU SECRÉTAIRE DU CONSEIL DE DIRECTION DE LA FCAB PAR L'ADMINISTRATEUR GÉNÉRAL DE LA COMPAGNIE

[Traduction du Greffe]

Monsieur A. W. Bolden, Esq., secrétaire du conseil de direction de la FCAB

1 Broad Street Place, London E. C.

Cher Monsieur,

Nous avons pris connaissance de vos courriers personnels et officiels datés des 11 (deux lettres) et 25 février et vous en remercions.

Inventaire des stocks :

La copie de votre lettre du 11 février à ce sujet, reçue le même jour que l'original, a été transmise sans délai au comptable, qui est actuellement en Bolivie, pour suite à donner.

Instructions n° 42 : personnel du service comptabilité :

Nous tenons à vous remercier de l'approbation par le conseil de direction de l'augmentation de salaire accordée à M. Brandon, toutefois, comme nous vous l'avions notifié précédemment, cet employé a quitté la compagnie pour s'engager dans l'armée.

Responsable des locomotives :

Nous vous prions de vous reporter à notre lettre du 25 février à laquelle nous n'avons pour l'heure rien à ajouter.

Service médical : Dr G. W. Young :

Nous sommes tout à fait d'avis que le Dr Young a droit à six mois de congés après presque quatre années de service et, le 4 courant, nous vous avons télégraphié le message suivant «Young oui» pour vous faire savoir que nous souhaitons qu'il perçoive l'intégralité de son salaire durant cette période. Nous tenons néanmoins à préciser que cette période d'absence ne sera pas déduite de la durée de son contrat et qu'il reprendra ses fonctions après la guerre dans des conditions absolument identiques à celles existant au moment de son départ.

Môle de Mejillones :

Ayant reçu des instructions claires de votre part concernant la manière dont vous souhaitez voir traiter cette question, nous sommes maintenant en mesure de formuler des propositions et d'engager des négociations, ce que nous ferons en temps utile. Dans l'intervalle, vous aurez noté à la lecture de la correspondance échangée avec M. Garcia de la Huerta que nous avons l'intention de déposer une demande («*solicitud*») à l'effet d'obtenir un délai supplémentaire pour l'exécution des travaux. Si cela ne nous est pas accordé, il sera temps d'engager des négociations.

Personnel : service des ouvrages hydrauliques :

Nous tenons à vous remercier d'avoir obtenu l'approbation du conseil de direction concernant l'augmentation, sur ma recommandation, du salaire de M. R. H. Fox, qui passe ainsi de 550 à 600 livres annuelles avec effet rétroactif au 1^{er} janvier.

Quant à M. Blakey, vous aurez noté que nous vous avons précédemment signalé sa démission, motivée par l'état de santé précaire de son épouse.

Eau : pose d'une troisième conduite vers la zone des nitrates, doublement de la conduite principale du Siloli :

Nous prenons note de ce que les membres du conseil de direction ont catégoriquement rejeté la possibilité de poser une troisième conduite principale et de doubler celle qui part des sources du Siloli en raison de l'impossibilité de réunir les capitaux nécessaires. Nous allons cependant continuer à faire tout notre possible dans des conditions excessivement difficiles, qui risquent de se détériorer encore davantage si la Chile Exploration Company augmente le nombre de ses sites de production et nous demande de les alimenter en eau à hauteur de 2000 tonnes par jour.

Concessions foncières :

Nous souhaitons appeler tout particulièrement votre attention sur un courrier personnel très instructif que nous venons de recevoir de M. Garcia de la Huerta, qui indique très clairement la détermination du nouveau président à amasser des fonds aux dépens des entreprises étrangères.

Gisement de nitrate de Peñon :

Nous vous avons avisé dès juillet 1911 que MM. Gibbs & Co. avaient acquis un tiers de ce gisement, sur lequel, d'après leur représentant qui m'a appelé hier, ils ont donné une option à un groupe américain à échéance d'août prochain. Ce groupe est représenté par un certain M. Adams, qui s'est établi à Antofagasta. Reste à savoir si l'affaire va se conclure. Dans l'intervalle, des dépenses d'exploration ont été engagées à hauteur de 25 000 dollars. C'est là une indication supplémentaire des investissements de capitaux américains réalisés au Chili et je vous serais reconnaissant de bien vouloir me faire connaître la position du conseil de direction concernant le financement du prolongement de la ligne Remiendos n° 2 vers le gisement de Peñon. Il se peut que nous ayons des difficultés à obtenir la permission du gouvernement pour un nouveau tracé visant à exploiter cette zone, car vous vous souvenez peut-être que cela nous a déjà été refusé une fois, alors que notre concession est toujours valide. MM. Gibbs & Co. seraient naturellement intéressés par la possibilité d'expédier leur production par voie maritime de Mejillones. Nous nous employons à calculer les capitaux nécessaires, les volumes de fret, etc.

Je vous prie d'agréer, cher Monsieur, l'expression de mes sincères salutations.

(Signé) L'administrateur général.

Pièces jointes :

Copie de la correspondance personnelle échangée avec M. Garcia de la Huerta.

ANNEXE 93

**LETTRE DU 8 SEPTEMBRE 1916 ADRESSÉE AU SECRÉTAIRE DU CONSEIL DE DIRECTION
DE LA FCAB PAR L'ADMINISTRATEUR GÉNÉRAL DE LA COMPAGNIE**

[Traduction du Greffe]

Monsieur A. W. Bolden, Esq., secrétaire du conseil de direction de la FCAB

1 Broad Street Place, London E. C.

Cher Monsieur,

Le dernier courrier personnel que je vous ai adressé date du 11 août, et j'ai le plaisir d'accuser réception de vos recommandations en date des 29 juin et 13 et 27 juillet.

Inventaire des stocks.

Nous avons pris bonne note de vos observations, qui ont été transmises au comptable afin qu'il puisse en prendre connaissance et agir en conséquence.

Personnel : responsable des locomotives.

J'ai avisé M. Mayne que les membres du conseil de direction avaient approuvé sa nomination au poste de responsable des locomotives pour le Chili. Je suis toutefois d'avis que le salaire de M. Mayne devrait être relevé eu égard au fait que, le parc du matériel roulant en Bolivie étant assez restreint alors qu'au Chili le responsable des locomotives supervise directement les ateliers de Mejillones, la charge de travail et les responsabilités du poste dans les deux pays ne sont pas comparables.

Visite du comptable en Bolivie.

Nous nous permettons de vous informer que nous avons envoyé une copie du rapport de M. Hunt à l'administrateur général par intérim pour la Bolivie en même temps qu'à vous-même.

Je joins au présent courrier une lettre de remerciements adressée aux membres du conseil de direction par M. Hunt pour la prime qui lui a été accordée.

Loyer : agent de Valparaíso.

La proposition qui suit est venue spontanément à l'auteur de ces lignes, qui se permet de vous la soumettre. Compte tenu de la baisse importante des dépenses de la FCAB à Valparaíso, ainsi que des excellents résultats obtenus depuis que M. Loveday l'y représente et de l'engagement dont celui-ci fait preuve en faveur des affaires de la société, il me semble tout à fait justifié de vous recommander d'approuver la prise en charge du loyer de M. Loveday, eu égard notamment à l'augmentation du coût de la vie sur la côte depuis un an ou deux et au fait que l'intéressé m'ait expressément proposé d'installer mon bureau chez lui lorsque je me trouve dans le Sud.

M. Loveday sollicite systématiquement mon accord avant de conclure des affaires à titre personnel ; celles-ci sont pour l'heure très limitées mais pourraient augmenter très sensiblement s'il avait les mains libres. D'autres entreprises — notamment la société Arauco — seraient sans aucun doute très heureuses de pouvoir s'assurer ses excellents services.

Chile Exploration Company.

J'ai appris que des changements importants s'étaient produits dans la direction de la Chile Exploration Company. De toute évidence, des désaccords au sein du groupe financier gérant cette société à New York ont entraîné le départ de M. Yeatman et l'envoi d'un nouvel ingénieur chargé de superviser l'ensemble des travaux de construction sans avoir à rendre compte à l'administrateur général.

Nous croyons également comprendre que le groupe représenté par MM. Potter et Wagner, ce dernier résidant à Santiago, a évincé M. Yeatman et probablement aussi l'un des Guggenheim.

Ces changements ne vont pas, j'en ai peur, améliorer nos relations avec la Chile Exploration Company, et je crains qu'il s'avère particulièrement difficile de traiter avec M. Wagner.

M. Hellmann est revenu, son contrat ayant été renouvelé pour trois ans, mais je viens d'apprendre qu'il doit partir le mois prochain pour remplacer M. Yeatman.

Pose d'une troisième conduite vers la zone des nitrates : doublement de la conduite principale du Siloli.

Concernant les observations que vous avez formulées sous ce point, notre intention a toujours été de poser une conduite principale supplémentaire entre la rivière San Pedro et les sources du Siloli, en même temps qu'une troisième conduite allant de nos prises d'eau sur la San Pedro à la zone des nitrates. Cependant, il est très probable que la situation complexe créée par la guerre en Europe nous oblige à modifier notre réseau pour être à même de fournir à la Chile Exploration Company, à partir de la San Pedro, jusqu'à 2000 tonnes d'eau potable du Siloli. Pour cela, il sera indispensable, comme je l'ai écrit dans mon courrier précédent, de poser une deuxième conduite entre la San Pedro et le Siloli afin d'alimenter nos réservoirs en suffisance pour pouvoir livrer à la société américaine la quantité d'eau dont elle a besoin pour son usine de Chuquicamata.

Dans mon courrier précédent, j'avais souligné combien il nous importait de ne pas laisser ces gens empiéter sur nos droits ni prendre part au commerce de l'eau qui est entre nos mains depuis si longtemps. Ainsi, pour nous permettre de prévenir toute initiative dans ce sens, il me semble absolument indispensable de procéder à la construction d'une seconde conduite vers le Siloli.

A ce propos, il convient aussi de mentionner que la Chile Exploration Company dispose d'une concession sur la Toconce, située à 90 km environ de Chuquicamata, mais qu'elle ne peut en tirer que 1000 tonnes d'eau par jour, ce qui signifie qu'il lui conviendrait sans aucun doute de pouvoir obtenir de la FCAB toute l'eau potable dont elle a besoin, par sa conduite principale de San Pedro.

Je vous prie d'agréer, cher Monsieur, l'expression de mes sincères salutations.

(Signé) L'administrateur général.

P. S. : responsable des locomotives.

Je me permets de joindre au présent courrier une lettre adressée par M. Mayne aux membres du conseil de direction pour les remercier d'avoir, à ma demande, approuvé sa nomination au poste de responsable des locomotives pour le Chili.

Pièces jointes.

- 1) Lettre du comptable.
 - 2) Lettre du responsable des locomotives.
-

ANNEXE 97

**NOTE N° VRE-Cs-58/2016 DU 27 JUILLET 2016 ADRESSÉE AU CONSEILLER PRINCIPAL
POUR LES AMÉRIQUES DU SECRÉTARIAT RAMSAR PAR LE MINISTÈRE
BOLIVIEN DES AFFAIRES ÉTRANGÈRES**

[Traduction établie par le Greffe à partir de la traduction anglaise de l'original espagnol fournie par le Chili]

A l'honorable María Rivera
Conseiller pour les Amériques
Convention de Ramsar relative aux zones humides
Gland — Suisse

Chère Madame,

J'ai l'honneur de vous écrire pour faire suite à la réunion tenue à Genève le 6 juillet 2016 au sujet du site Ramsar de Los Lipez en Bolivie auquel appartient la zone humide du Silala.

A ce propos, conformément à l'article 3, paragraphe 2, de la convention de Ramsar, l'Etat plurinational de Bolivie tient à exprimer sa préoccupation face aux changements négatifs observés dans les caractéristiques écologiques du site de Los Lipez, des zones humides du Silala et des zones connexes, dus à la chenalisation artificielle des sources réalisée pour faciliter l'exploitation de leurs eaux, d'abord par une société ferroviaire opérant au Chili puis, actuellement, pour le compte des entreprises minières établies dans ce même pays.

Les éléments dont nous disposons nous permettent de constater que les eaux non renouvelables du Silala ont baissé, que les sols se sont dégradés et que le système hydrographique de cette zone humide ainsi que le vivant qui lui est attaché ont pâti de cette situation. Etant donné que la cause de ces changements persiste, regrettablement, nous sommes très inquiets des effets néfastes que cela entraîne pour l'écologie et la durabilité environnementale du site et des zones connexes, ainsi que pour la préservation des eaux fossiles du Silala, eu égard à la grande vulnérabilité de ce site, qui se trouve dans l'une des régions les plus sèches de la planète et dans un écosystème unique où les précipitations annuelles sont extrêmement faibles.

En conséquence, par la présente nous adressons au secrétariat une demande officielle d'assistance au titre de la recommandation 4.7 afin qu'il mène une mission consultative sur le site de Los Lipez, et en particulier dans la zone humide du Silala, en vue d'évaluer les changements et effets négatifs subis par l'écologie du site à cause de la chenalisation artificielle de ses eaux et de leur surexploitation par les entreprises minières installées au Chili. Nous demandons également qu'un rapport soit établi, avec des recommandations visant à aider l'Etat plurinational de Bolivie à préserver et rétablir les caractéristiques écologiques de cette zone humide. Notre pays s'engage dès à présent à offrir l'assistance financière, logistique et technique nécessaire à l'exécution de la mission consultative Ramsar.

Il serait crucial pour nous de pouvoir disposer du rapport de la mission cette année et nous vous serions très reconnaissants de bien vouloir diligenter celle-ci dès que possible : nous proposons pour cela le mois d'octobre prochain.

Au nom de l'Etat plurinational de Bolivie, qui est l'un des pays au monde possédant la plus grande surface de zones humides inscrites sur la liste Ramsar, je souhaite réaffirmer notre engagement ferme en faveur de la convention de Ramsar relative aux zones humides et notre détermination à continuer de promouvoir la protection de la vie dans le cadre de notre constitution et de notre loi sur la Terre-Mère.

Vous remerciant vivement de votre participation à la réunion de Genève et dans l'attente d'une prompte réponse de votre part, je vous prie d'agréer, Madame, l'expression de ma haute considération.

L'ambassadeur de l'Etat plurinational de Bolivie,
vice-ministre des affaires étrangères,
(Signé) Juan Carlos Alurralde TEJADA.

ANNEXE 98

**ANA PAOLA CASTEL, ANALYSE MULTI-TEMPORELLE À PARTIR D'IMAGES SATELLITE
DES BOFEDALES (ZONES HUMIDES DES HAUTS PLATEAUX ANDINS) DES SOURCES
DU SILALA, POTOSÍ — BOLIVIE, SEPTEMBRE 2017**

[Traduction établie par le Greffe à partir de la traduction anglaise de l'original espagnol fournie par le Chili]

**Bureau stratégique de reconnaissance des prétentions maritimes, du Silala
et des ressources hydriques internationales (DIREMAR)**



**Analyse multi-temporelle à partir d'images satellite des *bofedales*
(zones humides des hauts plateaux andins)
des sources du Silala, Potosí — Bolivie**

Ana Paola Castel

Spécialiste des systèmes d'information géographique, septembre 2017

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
1. INTRODUCTION.....	1
2. OBJECTIFS.....	1
2.1. Objectif général.....	1
2.2. Objectifs spécifiques.....	1
3. DESCRIPTION DE LA ZONE ÉTUDIÉE.....	2
4. CADRE THÉORIQUE.....	3
4.1. Les <i>bofedales</i> : zones humides (<i>humedales</i>) d'altitude andines.....	3
4.2. Le rôle des zones humides d'altitude dans le cycle hydrologique.....	4
4.3. Les zones humides d'altitude des sources du Silala.....	4
4.4. Description de la végétation à partir des données spectrales.....	5
5. MÉTHODOLOGIE.....	7
5.1. Choix des images satellite.....	7
5.1.1. Images Landsat.....	7
5.1.2. Images à haute résolution.....	8
5.2. Prétraitement des images satellite.....	8
5.3. Classification des zones humides d'altitude.....	9
5.3.1. Classification non supervisée et post-traitement.....	9
5.3.2. Superficie et variabilité totales et saisonnières (tendances).....	11
5.3.3. Sensibilité des zones humides d'altitude et influence des chenaux.....	11
6. RÉSULTATS.....	12
6.1. Images Landsat.....	12
6.1.1. Superficie multi-temporelle des zones humides d'altitude.....	12
6.1.2. Analyse de la variabilité des zones humides d'altitude.....	18
6.1.3. Analyse de sensibilité.....	22
6.2. Images à haute résolution.....	22
6.2.1. Superficie multi-temporelle des zones humides d'altitude.....	22
6.2.2. Analyse de la variabilité des zones humides d'altitude.....	26
6.2.3. Analyse de sensibilité.....	30
7. DISCUSSION.....	30
8. CONCLUSIONS.....	34
9. BIBLIOGRAPHIE.....	35

LISTE DES FIGURES

	<i>Page</i>
Figure 1	Carte situant l'emplacement des sources du Silala 2
Figure 2	Représentation de la végétation dans le spectre électromagnétique 6
Figure 3	Valeurs NDVI calculées à partir du rayonnement réfléchi par la végétation dans le proche infrarouge et la partie rouge du spectre visible 7
Figure 4	Profil botanique du Mauri..... 10
Figure 5	Superficie totale des zones humides d'altitude (ha). Période comprise entre 1975 et 2000 (saisons sèche et humide) — images Landsat..... 12
Figure 6	Superficie des zones humides d'altitude en saison sèche. Période comprise entre 1975 et 2000 — images Landsat..... 13
Figure 7	Superficie des zones humides d'altitude en saison humide. Période comprise entre 1975 et 2000 — images Landsat..... 13
Figure 8	Superficie totale de la zone humide d'altitude sud (saisons humide et sèche). Période comprise entre 1975 et 2000 — images Landsat..... 14
Figure 9	Superficie totale de la zone humide d'altitude nord (saisons humide et sèche). Période comprise entre 1975 et 2000 — images Landsat..... 14
Figure 10	Superficie totale des autres zones humides d'altitude (saisons humide et sèche). Période comprise entre 1975 et 2000 — images Landsat..... 15
Figure 11	Distribution des valeurs NDVI (minimum, premier quartile, médiane, troisième quartile et maximum) sur toute la série temporelle de la période comprise entre 1975 et 2000 — images Landsat 18
Figure 12	Distribution des valeurs NDVI (minimum, premier quartile, médiane, troisième quartile et maximum) en saison sèche pendant la période comprise entre 1975 et 2000 — images Landsat..... 19
Figure 13	Distribution des valeurs NDVI (minimum, premier quartile, médiane, troisième quartile et maximum) en saison humide pendant la période comprise entre 1975 et 2000 — images Landsat..... 20
Figure 14	Distribution des valeurs NDVI minimales, médianes et maximales pendant la période comprise entre 1975 et 2000 — images Landsat 20
Figure 15	Superficie totale des zones humides d'altitude (ha). Période comprise entre 2002 et 2017 (saisons sèche et humide) — images à haute résolution 22
Figure 16	Carte de sensibilité des zones humides d'altitude des sources du Silala. Période comprise entre 1975 et 2000 — images Landsat..... 23
Figure 17	Superficie des zones humides d'altitude en saison sèche. Période comprise entre 2002 et 2017 — images à haute résolution..... 24
Figure 18	Superficie des zones humides d'altitude en saison humide. Période comprise entre 2002 et 2017 — images à haute résolution..... 25
Figure 19	Superficie totale de la zone humide d'altitude nord (saisons sèche et humide). Période comprise entre 2002 et 2017 – images à haute résolution 25
Figure 20	Superficie totale de la zone humide d'altitude sud (saisons sèche et humide). Période comprise entre 2002 et 2017 — images à haute résolution 26

Figure 21	Superficie totale des autres zones humides d'altitude (saisons sèche et humide). Période comprise entre 2002 et 2017 — images à haute résolution..	26
Figure 22	Distribution des valeurs NDVI (minimum, premier quartile, médiane, troisième quartile et maximum) sur toute la série temporelle de la période comprise entre 2002 et 2017 — images à haute résolution	27
Figure 23	Distribution des valeurs NDVI (minimum, premier quartile, médiane, troisième quartile et maximum) en saison sèche pendant la période comprise entre 2002 et 2017 — images à haute résolution.....	28
Figure 24	Distribution des valeurs NDVI (minimum, premier quartile, médiane, troisième quartile et maximum) en saison humide pendant la période comprise entre 2002 et 2017 — images à haute résolution.....	29
Figure 25	Distribution des valeurs NDVI minimales, médianes et maximales pendant la période comprise entre 2002 et 2017 — images à haute résolution	30
Figure 26	Carte de sensibilité des zones humides d'altitude des sources du Silala. Période comprise entre 2002 et 2017 — images à haute résolution	33

LISTE DES TABLEAUX

		<i>Page</i>
Tableau 1	Superficie des zones humides d'altitude des sources du Silala. Période comprise entre 1975 et 2000 — images Landsat.....	16
Tableau 2	Superficie des zones humides d'altitude des sources du Silala. Période comprise entre 2002 et 2017 — images à haute résolution	16
Tableau 3	Superficie totale des zones humides d'altitude des sources du Silala et coefficient de variabilité intersaisonnière et interannuelle. Période comprise entre 1975 et 2000 (à gauche) et période comprise entre 2002 et 2017 (à droite).....	17
Tableau [4]	Valeurs NDVI médianes, maximales et minimales — images à haute résolution	21
Tableau [5]	Valeurs NDVI médianes, maximales et minimales — images Landsat.....	21

LISTE DES FORMULES

		<i>Page</i>
Formule 1	Equation NDVI (indice de végétation normalisé)	5
Formule 2	Formule de conversion en luminance au sommet de l'atmosphère pour les capteurs Digital Globe	8
Formule 3	Formule de conversion en réflectance au sommet de l'atmosphère pour les capteurs Digital Globe	9
Formule 4	Correction atmosphérique à l'aide de la méthode QUAC (Quick Atmospheric Correction)	9

1. INTRODUCTION

Le présent rapport a été établi conformément au contrat de consultation en ligne n° 01/2017, qui prévoyait la réalisation par un «professionnel des systèmes d'information géographique» d'une «analyse multi-temporelle des *bofedales* (zones humides des hauts plateaux andins)», dans le cadre de la mission de défense des sources du Silala confiée au bureau stratégique de reconnaissance des prétentions maritimes, du Silala et des ressources hydriques internationales (DIREMAR).

Depuis le début du XX^e siècle, plusieurs aménagements ont été réalisés dans les sources du Silala pour capter l'eau et l'acheminer jusqu'en territoire chilien. D'importants travaux de maçonnerie ont été effectués dans une série de canaux, divisés en chenaux principaux et chenaux secondaires, sans que soient pris en compte les effets des ouvrages sur les zones humides d'altitude des Andes (*bofedales*). Ces zones humides se sont développées dans la région en raison de la présence de sources et, à l'état naturel, elles auraient dû se maintenir sans variations annuelles importantes et auraient même pu s'étendre sur une superficie plus vaste que celle observée aujourd'hui. Bien que les aménagements aient eu sur la distribution des zones humides d'altitude un effet observable à l'œil nu, l'impact qu'ils ont causé au fil des ans reste inconnu. Par conséquent, il a fallu l'estimer au moyen de différentes études *in situ* et de méthodes indirectes. La présente étude s'inscrit dans ce contexte.

Le présent rapport vise à mettre en évidence et à évaluer, à l'aide d'images satellite, les éventuelles modifications observées dans les zones humides d'altitude pendant la période comprise entre 1975 et 2017, du fait des aménagements et ouvrages artificiels de captage et de transport d'eau en service depuis le début du [XX^e] siècle. Les zones humides d'altitude ont atteint une stabilité hydrologique qui dépend presque exclusivement de la disponibilité de l'eau fournie par les pluies saisonnières dans la région. Compte tenu de la disponibilité saisonnière de l'eau pluviale, on note d'importantes variations saisonnières dans la superficie des zones humides d'altitude, en lien avec la saisonnalité des périodes d'activité et d'inactivité de la végétation. Ainsi, un large pourcentage de la superficie totale des zones humides d'altitude présente une sensibilité entre haute et moyenne à toute variation de la disponibilité en eau, telle qu'une diminution des précipitations ou un allongement des périodes sèches en raison du changement climatique ou d'autres facteurs, comme les modifications apportées aux modalités de gestion des zones humides d'altitude.

2. OBJECTIFS

2.1. Objectif général

La présente étude vise à réaliser une analyse multi-temporelle à partir d'images satellite afin d'évaluer les changements et la sensibilité des zones humides des sources du Silala pendant la période comprise entre 1975 et 2017.

2.2. Objectifs spécifiques

- Déterminer la superficie des zones humides d'altitude en saison humide et en saison sèche pendant la période comprise entre 1975 et 2000, au moyen d'images Landsat¹.
- Déterminer la superficie des zones humides d'altitude en saison humide et en saison sèche pendant la période comprise entre 2002 et 2017, au moyen d'images à haute résolution.
- Estimer les tendances à long terme relatives aux changements dans les zones humides d'altitude.

¹ <https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/>.

— Déterminer la sensibilité des zones humides d'altitude pendant les périodes 1982-2000 et 2002-2017.

3. DESCRIPTION DE LA ZONE ÉTUDIÉE

Les zones humides d'altitude des sources du Silala se situent dans le département de Potosí (province Sud Lípez), à la frontière avec le Chili, à l'intérieur de l'aire protégée et site Ramsar de «Los Lípez» ainsi que de la réserve nationale Eduardo Avaroa, entre $22^{\circ} 59' 5,83''$ et $22^{\circ} 1' 36,92''$ de latitude sud et $68^{\circ} 1' 49,86''$ et $67^{\circ} 59' 41,726''$ de longitude ouest. Elles se trouvent à une altitude comprise entre 4250 et 4500 mètres au-dessus du niveau de la mer, dans la région désertique de Puna (FAN, 2003), où prédominent des systèmes de végétation de Puna de type xérophytique², des formations végétales de glacis et de piémont, ainsi que des buissons de tola halophytes inféodés à des sols plus sablonneux et secs (Navarro *et al.*, 2007). Le climat sec et aride y est typique d'une zone désertique de haute montagne et affiche une grande amplitude thermique entre la nuit et le jour, oscillant entre -15°C et 29°C , pour une moyenne de $14,2^{\circ}\text{C}$. Les températures les plus basses sont enregistrées entre avril et août, et les plus élevées entre décembre et mars. Les précipitations sont unimodales, la saison des pluies s'étendant de décembre à mars, avec une moyenne annuelle de 59,1 mm (Claros, 2005).

Les zones humides d'altitude des sources du Silala se divisent en zone humide sud et zone humide nord, situées toutes deux sur des plateaux volcaniques constitués de dépôts ignimbricitiques et de sédiments fluvioglaciaires, au travers desquels les sources émanent (SERGEOMIN, 2003) entre des pentes oscillant entre 1,50 % et 2,80 % respectivement (estimation de l'auteur). Ces zones humides d'altitude ont été modifiées par une série de chenaux artificiels qui acheminent l'eau jusqu'en territoire chilien (figure 1).

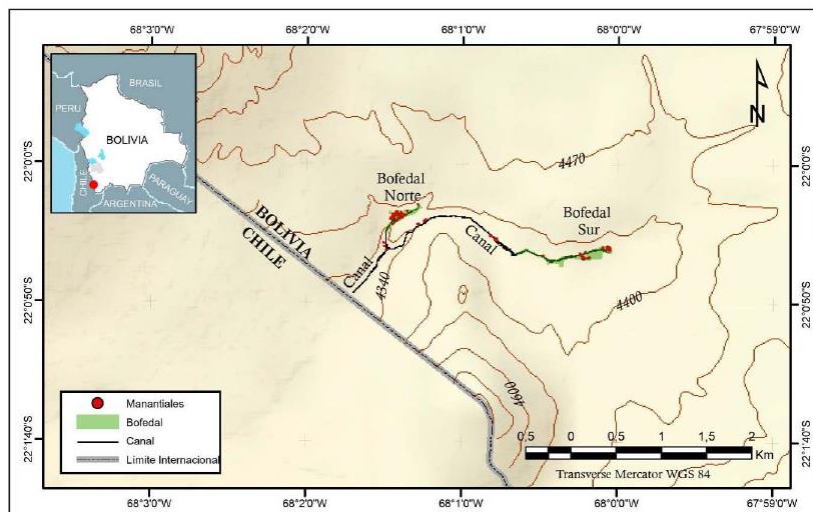


Figure 1
Carte situant l'emplacement des sources du Silala

² Végétation adaptée aux milieux secs.

4. CADRE THÉORIQUE

4.1. Les *bofedales* : zones humides (*humedales*) d'altitude andines

Les zones humides (*humedales*) sont des écosystèmes inondés de façon permanente ou périodique, sujets à une saturation prolongée des sols, ce qui permet l'établissement d'espèces hydrophytes³ et le développement de sols hydromorphes (Ji, 2007). Au sens de la convention de Ramsar (2006), les zones humides sont des espaces où l'eau est le principal facteur déterminant l'environnement et la vie végétale et animale associée, et où la nappe phréatique affleure ou est proche de la surface du sol. Il s'agit d'espaces recouverts d'eaux, naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce ou saumâtre, dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres. Selon la convention, les *bofedales* ou zones humides d'altitude sont des tourbières non boisées.

On considère que les *bofedales* sont des zones humides d'altitude, où naissent les tourbières naturelles dites alto-andines ou les zones humides d'altitude sempervirentes, qui sont alimentées par un apport d'eau permanent, principalement d'origine souterraine (Navarro et Maldonado, 2002 ; Ruthsatz, 2012 ; Squeo *et al.*, 2006). Les *bofedales* se forment généralement sur des terrains plats, dans les fonds des vallées inclinées et les bassins hydrographiques peu profonds, où leur végétation contraste fortement avec les formations végétales environnantes, car elle se démarque par sa biomasse élevée et sa vaste couverture, qui est principalement fonction de la quantité d'eau disponible, surtout en période sèche (Squeo *et al.*, 2006). Leurs nutriments proviennent des minéraux dissous que transporte l'eau infiltrée, si bien que c'est la disponibilité de l'eau qui permet la progression et l'extension de la végétation des zones humides d'altitude ; en période de sécheresse prolongée, d'autres espèces apparaissent et s'étendent là où les zones humides d'altitude présentent des signes d'assèchement ou de dégradation (Ruthsatz, 2012).

Les zones humides alto-andines figurent parmi les écosystèmes les plus productifs et singuliers de notre planète, et fournissent des services environnementaux clés qui contribuent à la diversité des montagnes andines et au mode de vie des populations vivant à haute altitude. On estime que, au cours de la phase de peuplement qui s'est produite il y a 5000 ans, l'emplacement des villages et hameaux de la Puna était déterminé par la proximité avec les *bofedales* (Lumbreras, 2006, cité dans Fonkén, 2014), qui, dans certains cas, se façonnaient en «paysages culturels», à savoir des écosystèmes entretenus par l'activité humaine (Fonkén, 2014). Dans le même temps, ces écosystèmes sont extrêmement fragiles, étant sensibles aux changements climatiques et aux altérations d'origine anthropique (Squeo *et al.*, 2006).

Les zones humides d'altitude jouent aussi un rôle important dans la préservation de la diversité biologique unique et endémique des Andes, offrant une aire de pâturage et de nidification, ainsi qu'une source d'eau, disponible par le biais de l'humidité des sols (Squeo *et al.*, 2006 ; Ruthsatz, 2012). Elles sont également considérées comme d'importants puits de carbone (Segnini *et al.*, 2010, cité dans Fonkén, 2014 ; Hribljan *et al.*, 2015). Bien qu'elles aient une superficie inférieure à celle des zones humides situées aux latitudes nord, les zones humides d'altitude stockent des quantités bien supérieures de carbone (Earle *et al.*, 2003) ; compte tenu de leur capacité à piéger le dioxyde de carbone et à émettre du méthane, elles font partie intégrante du système mondial, constituant un réservoir où est stocké 30 % du carbone organique présent dans les sols (Frolking *et al.*, 2011).

Les zones humides d'altitude jouent également un rôle important dans les cycles de la matière et la qualité de l'eau, assurant des fonctions de rétention, de transformation et/ou d'élimination des sédiments, des nutriments et des polluants (Ecosur, 2005).

³ Plantes aquatiques ou plantes qui vivent dans les sols inondés. Les formations végétales qui en résultent sont en partie déterminées par la profondeur de l'eau.

4.2. Le rôle des zones humides d'altitude dans le cycle hydrologique

De par leur formation, les zones humides d'altitude se présentent comme des régulateurs des régimes hydrologiques des zones où se produisent des processus d'accumulation de l'eau et de recharge des aquifères (Fonkén, 2014). Les zones humides d'altitude se développent dans des milieux qui reçoivent de l'eau issue de la fonte des glaciers, des cours d'eau, lacs et aquifères (Ruthsatz, 2012), auxquels s'ajoutent les précipitations et de considérables réserves d'eau stockées dans les bassins hydrographiques de la cordillère situés à plus haute altitude, lesquels contribuent de manière importante au maintien structurel et fonctionnel des zones humides d'altitude.

Plusieurs études soulignent l'important rôle que jouent les zones humides d'altitude en tant que régulateurs du système hydrologique et de la recharge des aquifères, dans la mesure où elles permettent aux eaux souterraines de s'accumuler par infiltration. Elles sont considérées comme de grands réservoirs naturels, en raison de leur importante capacité de stockage de l'eau et de leur faible taux de transmission de l'eau (Earle *et al.*, 2003 ; Otto *et al.*, 2011). Cet écosystème régule l'écoulement descendant vers l'aval, car ses eaux de ruissellement circulent lentement et, dans de nombreux cas, s'infiltrent à travers le sous-sol pour retrouver leur cours à des niveaux inférieurs (Fonkén, 2014). Les zones humides d'altitude assurent d'importantes fonctions dans le cycle hydrologique régional et local, telles que : 1) le contrôle et la régulation des écoulements des aquifères, 2) la lutte contre l'érosion, 3) l'assimilation de l'eau, et 4) la fonction de source-puits sédimentaire (Earle *et al.*, 2003). Etant tributaires de la fluctuation des cours naturels permanents et épisodiques, les zones humides d'altitude ont un comportement saisonnier, comme en témoignent les changements spectaculaires qui interviennent selon la saison et les variations annuelles (Mitsch, 1993).

S'appuyant sur la disponibilité de l'eau ou la pente phréatique, différentes études classent les zones humides d'altitude en trois catégories : 1) les zones inondables ou saturées d'altitude, où les espèces aquatiques prédominent, car les sols sont inondés en permanence. Ces sols sont uniques, recelant une grande quantité de matière organique, et abritent une végétation dominée par *Oxychloe andina*, *Distichia muscoides* et *Plantago tubulosa* ; 2) les zones humides d'altitude moyennement saturées en eau qui reçoivent une quantité d'eau suffisante pendant l'année et présentent souvent une activité fourragère d'intensité supérieure ; et 3) les zones humides d'altitude moins saturées en eau ou périphériques, qui reçoivent de l'eau de façon semi-permanente, peuvent s'assécher en hiver et sont influencées par des espèces de steppe (Buttolph, 1998 ; Beck *et al.*, 2010 ; Alzérreca *et al.*, 2001).

4.3. Les zones humides d'altitude des sources du Silala

Dans la région alto-andine, les zones humides d'altitude relèvent de la classe hydromorphe neutre (en permanence humide) et sont dominées par *Oxychloe andina* et *Distichia muscoides* de la famille des joncacées (Alzérreca *et al.*, 2001). Cependant, au sud-ouest du pays, on trouve principalement des zones humides dominées par *Oxychloe andina*, en raison du climat très aride et du volcanisme récent (Ruthsatz, 2012). Parmi les espèces que l'on rencontre souvent dans les zones humides d'altitude figurent *Zameioscirpus muticus* et *Phylloscirpus deserticola* de la famille des cypéracées, qui forment des coussins aplatis et moins profonds peu producteurs de tourbe (Ruthsatz, 2012) ; ce sont aussi des espèces associées à des conditions plus salines (Squeo *et al.*, 2006), capables de stocker la plus haute teneur en matière organique observée dans les zones humides d'altitude (Cooper *et al.*, 2015).

Toutefois, les zones humides d'altitude des sources du Silala ont été modifiées par un réseau de chenaux artificiels qui capte l'eau et l'achemine jusqu'en territoire chilien. Ces chenaux traversent une grande partie des zones humides d'altitude, qui séparent hydrauliquement des sous-systèmes de zone humide et des nappes phréatiques plus basses dans les tourbières, ce qui induit une diminution de l'eau disponible pour la végétation, créant des couloirs de propagation des végétaux envahissants

(DHI, 2017). On considère ainsi que ces zones se trouvent dans un état de morcellement ou de fragmentation, étant composées de végétation subhumide et/ou temporairement engorgée qui assure la transition vers d'autres types de végétation.

4.4. Description de la végétation à partir des données spectrales

La réponse spectrale de la végétation traduit une baisse de la réflectivité dans les bandes visibles du spectre électromagnétique, tandis que la réflectivité est élevée dans le proche infrarouge (figure 2) (Chuvienco, 1996). La délimitation des zones humides d'altitude par télédétection est possible, car celles-ci contrastent avec la configuration de la végétation environnante, puisqu'elles possèdent un couvert végétal généralement bien supérieur (dépassant habituellement les 70 %) et une forte productivité (Squeo *et al.*, 2006).

Pour mieux distinguer les différents couverts par imagerie satellitaire et obtenir de nouvelles informations, on utilise différentes combinaisons multispectrales, pour lesquelles ont été mis au point des indices qui mettent à profit les possibilités offertes par le capteur pour la détection de certaines caractéristiques de la végétation. Les différents types de végétation, la teneur en eau, la pigmentation, la teneur en carbone, la teneur en azote et d'autres propriétés sont mis en évidence dans différentes parties du spectre, ce qui nous renseigne sur la santé de la zone, le stress environnemental et d'autres caractéristiques que l'on peut décrire à l'aide de différents indices de végétation.

L'un de ces indices est l'indice de végétation normalisé (NDVI), largement utilisé pour le suivi et la détection de la végétation, des modifications dans l'utilisation des sols, du stress environnemental et de la dégradation de l'environnement, car il s'agit d'un indice solide, fondé sur des bases scientifiques et que l'on peut appliquer pour représenter le comportement de la végétation (Anderson *et al.*, 1993 ; Lu *et al.*, 2004 ; Wessels *et al.*, 2004 ; Chen et Rao, 2008, cité dans Hartman *et al.*, 2016). Dans l'étude des zones humides alto-andines, cet indice a été utilisé pour évaluer la biomasse, tout en tenant compte des faibles effets atmosphériques dus à l'altitude et de la faible influence d'un horizon sous-jacent résultant du dense couvert végétal des zones humides d'altitude (Otto *et al.*, 2011).

L'indice NDVI est calculé à partir de la bande spectrale du proche infrarouge (NIR) et de celle du rouge (RED), à l'aide de la formule suivante :

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Formule 1

Equation NDVI (indice de végétation normalisé)

Où

NIR = Bande spectrale du proche infrarouge

RED = Bande spectrale du rouge dans le spectre électromagnétique

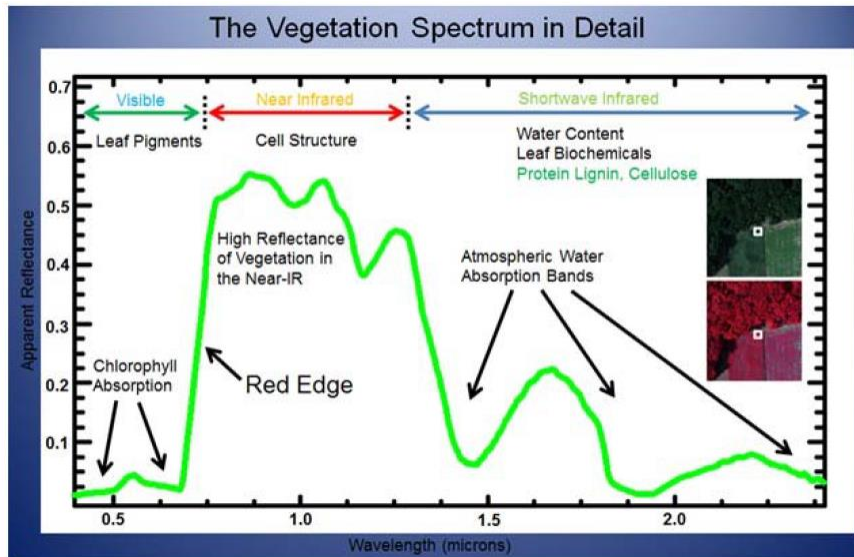


Figure 2
Représentation de la végétation dans le spectre électromagnétique

Source : Elowitz, Mark R. What is Imaging Spectroscopy (Hyperspectral Imaging)? www.markelowitz.com/Hyperspectral.html (ENVI, 2013).

Les plantes absorbent l'énergie de la lumière solaire grâce à la chlorophylle, pigment vert présent dans les feuilles qui permet la photosynthèse. La végétation absorbe les longueurs d'onde du rouge et du bleu, réfléchit le vert et réfléchit fortement le proche infrarouge (ENVI, 2013).

Lorsque l'on utilise le proche infrarouge, l'indice NDVI est considéré comme un indicateur de la «verdure» de la végétation ou de son activité photosynthétique, qui est à son tour liée à la densité relative de la végétation, à son activité et à sa vigueur ou santé (figure 3). Il a été démontré que le NDVI était bien corrélé à certains des paramètres biologiques de la végétation, tels que la biomasse totale, les indices de verdure des feuilles et les indices de surface foliaire (Curran, 1980 ; Jensen, 1983, cité dans Chuvieco, 1996). Cet indice peut aussi nous renseigner sur les conditions d'humidité de la végétation et son comportement phénologique, lequel est très sensible aux variations du climat (USGS, 2004 ; Bradley et Salyler, 1999).

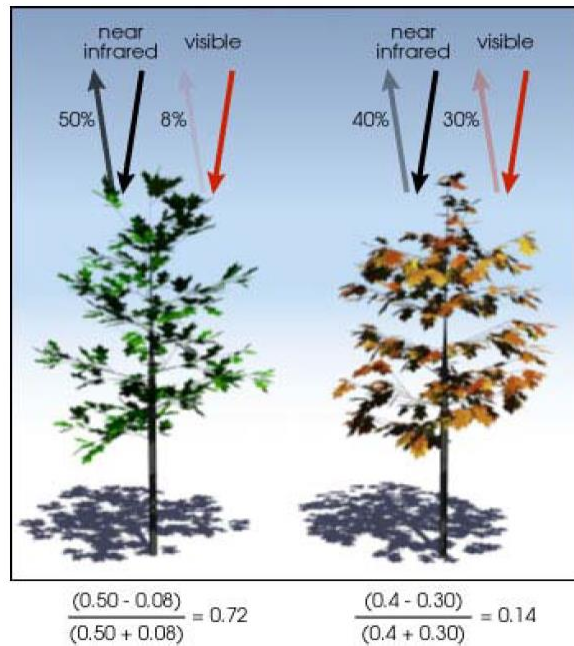


Figure 3
Valeurs NDVI calculées à partir du rayonnement réfléchi par la végétation dans le proche infrarouge et la partie rouge du spectre visible

La végétation saine (à gauche) absorbe la plus grande partie de la lumière visible et réfléchit une large part de la lumière dans le domaine proche infrarouge. La végétation dégradée ou éparse (à droite) réfléchit davantage la lumière visible et moins celle du spectre proche infrarouge (Weier et Herring, 2000).

Les valeurs NDVI varient entre +1,0 et -1,0, sachant que la végétation éparse, les arbustes et les prairies ou les plantes cultivées sénescentes peuvent produire des valeurs modérées, situées entre 0,2 et 0,5 environ. Les valeurs élevées, entre 0,6 et 0,9, correspondent à une végétation dense, telle que celle observée dans les forêts ou les surfaces cultivées en période de croissance maximale (USGS, 2004). Si ces valeurs ne se traduisent pas directement en grandeurs physiques, elles fournissent une échelle ordinale, où les valeurs NDVI hautes et basses correspondent à des réflectivités hautes et basses respectivement (ENVI, 2013).

5. MÉTHODOLOGIE

5.1. Choix des images satellite

5.1.1. Images Landsat

Au total, 18 scènes Path 233 Row 075, relevées sur neuf ans (deux scènes par an) en saison humide (novembre à mars) et sèche (avril à septembre), ont été étudiées pour la série de données d'imagerie Landsat correspondant à la période comprise entre 1975 et 2000. Les différences saisonnières ont été examinées pour caractériser les variations entre les saisons et les effets d'une sécheresse prolongée. Le choix s'est porté sur des images sans nuages ou présentant des pourcentages très faibles de couverture nuageuse qui n'avaient pas d'incidence directe sur la zone étudiée. Les images sont de type L1T — à savoir qu'elles ont fait l'objet d'un étalonnage radiométrique et qu'elles ont été orthorectifiées à l'aide de points de contrôle et d'un modèle numérique de terrain — et ont été obtenues sur le serveur <http://earthexplorer.usgs.gov/> de l'institut américain d'études géologiques (US Geological Survey). Toutes les images ont été projetées sur le datum WGS 84 / UTM zone 19 sud. Pour plus de détails sur les caractéristiques des images utilisées, on se reportera à l'annexe 1.

5.1.2. Images à haute résolution

Pour la série de données d'imagerie à haute résolution, 13 scènes, relevées sur neuf ans pendant la période comprise entre 2002 et 2017, ont été examinées. Bien que la saisonnalité climatique ait été prise en compte, la sélection des images correspondant aux différentes années s'est limitée aux dates, aux types de capteurs et aux résolutions disponibles, ainsi qu'aux dates sans nuages ni neige. Les images ont été obtenues de différentes sources, depuis des serveurs européens dont des représentants sont présents dans le pays. Les caractéristiques des images sont détaillées à l'annexe 1.

5.2. Prétraitement des images satellite

Pour interpréter quantitativement les valeurs de pixel sous forme de valeurs absolues qui puissent être comparées entre les différentes dates d'analyse, capteurs et scènes des images Landsat et des images à haute résolution, on a procédé comme suit :

1. Les images ont été enregistrées, image par image, au moyen de 28 à 100 points de contrôle générés automatiquement et assistés manuellement dans le cas des images Landsat, dans le but d'obtenir une erreur quadratique moyenne $\leq 0,70$. Aux fins de ce processus, nous avons utilisé une image Landsat GLS orthorectifiée pour le groupe des images Landsat, et l'image Pléiades orthorectifiée et géoréférencée avec pour date de référence le 10 octobre 2016 [sic]. Les images à haute résolution n° 2-8 et 10 (annexe 1) ont été préalablement orthorectifiées et géoréférencées sur la base du modèle numérique de terrain ASTER GDEM, avec une résolution de 30 mètres.
2. La conversion du compte numérique en réflectance au sommet de l'atmosphère (réflectance ToA — Top-of-Atmosphere) a été effectuée sur la base des informations qui figurent dans le fichier de métadonnées de chaque image et le fichier des valeurs de correction qui accompagne chaque image à haute résolution.

Pour les images à haute résolution Digital Globe (images 2-8 et 10 ; annexe 1), une correction radiométrique absolue a été appliquée avec passage à des valeurs de luminance ToA (luminance au sommet de l'atmosphère) pour chaque bande recommandée par le fournisseur (Digital Globe, 2017) pour ce type de capteur, à l'aide de la formule suivante :

$$L = GAIN * DN * \left(\frac{abscalfactor}{effectivebandwidth} \right) + OFFSET$$

Formule 2

Formule de conversion en luminance au sommet de l'atmosphère pour les capteurs Digital Globe

Où

L = luminance au sommet de l'atmosphère du pixel dans une bande spectrale donnée ($W\mu m^{-1} m^{-2} sr^{-1}$)

Gain = valeur du gain d'une bande spectrale

DN (CN en français) = compte numérique du pixel

Offset = offset ou décalage d'une bande spectrale

AbsCalFactor = facteur de calcul absolu dans une bande spécifique

Effectivebandwidth = largeur de la bande spectrale

Ensuite, les valeurs ont été converties en réflectance ToA, à l'aide de l'équation suivante :

$$\rho_{\lambda_{\text{Bande}}^{\text{ref}}} = \frac{L_{\lambda_{\text{Bande}}^{\text{ref}}} \cdot d_{\text{ES}}^2 \cdot \pi}{E_{\text{sun}}_{\lambda_{\text{Bande}}^{\text{ref}}} \cdot \cos(\theta_s)}$$

Formule 3

Formule de conversion en réflectance au sommet de l'atmosphère pour les capteurs Digital Globe

L = luminance de chaque bande calculée par d_{ES} = distance Terre-Soleil en UA pour la date concernée

E_{sun} = éclairement solaire moyen hors atmosphère pour chaque bande (Thuillier, 2003, cité dans Digital Globe, 2017)

θ_s = angle zénithal solaire (angle d'altitude solaire moyen de 90°)

3. Pour réduire les effets atmosphériques qui interviennent au moment de l'acquisition de la scène, la correction atmosphérique QUAC par ENVI a été appliquée (Bernstein *et al.*, 2012). Cet algorithme détermine la compensation atmosphérique en se basant directement sur les informations fournies par la scène. Le principe consiste à déterminer les paramètres d'offset et de gain afin d'obtenir la réflectance (formule 4). Cette correction empirique est communément utilisée et a été largement testée sur la végétation, donnant des résultats optimaux (Dewi et Trisakti, 2017 ; Mandanici *et al.*, 2015).

$$\rho_{\text{SUP}} = \text{Gain}(L_{\text{TOA}} - \text{Offset})$$

Formule 4

Correction atmosphérique à l'aide de la méthode QUAC (Quick Atmospheric Correction)

Où

L = bandes en réflectance ToA

Offset = valeur minimale de réflectance pour chaque bande

Gain = rapport entre la moyenne des spectres de réflectance de référence et la moyenne des spectres des pixels observés dans la scène

4. L'indice NDVI (équation 1) a été calculé pour chaque date.

5.3. Classification des zones humides d'altitude

5.3.1. Classification non supervisée et post-traitement

Pour distinguer et délimiter les zones humides d'altitude, on a utilisé la combinaison infrarouge fausses couleurs (bandes RVB 4, 3, 2), qui fait ressortir la végétation, ainsi que des combinaisons d'images composites en vraies couleurs (RVB 4/NDVI/2 et RVB 4/NDVI/5 (Landsat)), ce qui a permis de mettre en évidence les différents états de «verdure» ou d'activité de la végétation des zones humides d'altitude. Dans le même temps, pour appuyer l'identification des zones humides d'altitude du Silala, on a retenu les deux principales zones humides — nord et sud — (figure 1) et examiné le profil botanique de la végétation des zones humides de l'Altiplano (Coronel, 2010 — figure 4), où l'on peut observer principalement des herbages hygrophiles à engorgement saisonnier (type 3), de la végétation aquatique (type 4), des herbages hygrophiles à engorgement saisonnier (type 6), ainsi que de petites étendues humides à engorgement permanent (type 5), en veillant à ne pas prendre en compte la végétation située aux extrémités du profil.

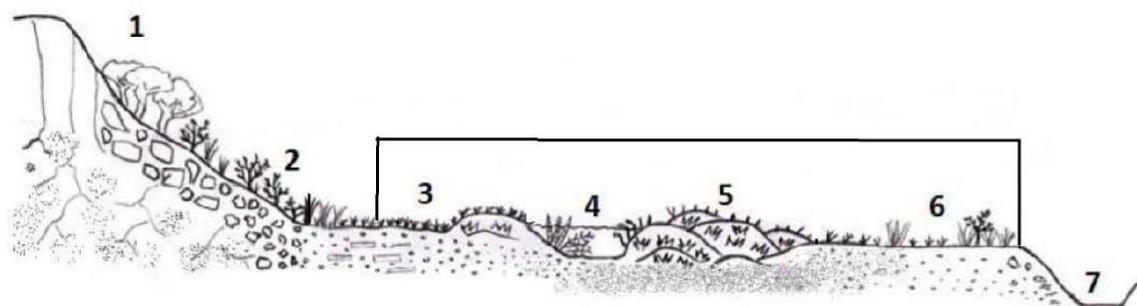


Figure 4
Profil botanique du Mauri

Légende :

- | | | |
|---|---|--|
| 1 | = | <i>Kewiñares</i> , forêt occidentale alto-andine de <i>Polylepis tarapacana</i> |
| 2 | = | Buissons de talo composés de <i>Parastrephia lepidophylla</i> , associés à <i>Tetraglochin cristatus</i> et à <i>Festuca dilichophylla</i> |
| 3 | = | Herbage hygrophile à engorgement saisonnier, composé de <i>Scirpus deserticola</i> , <i>Deyeuxia curvula</i> , <i>D. rigescens</i> et <i>Plantago tubulosa</i> |
| 4 | = | Végétation aquatique inféodée à des eaux minéralisées, principalement constituée de <i>Lilaeopsis macloviana</i> , <i>Lachemilla diplophylla</i> et <i>Ranunculus uniflorus</i> |
| 5 | = | Zone humide d'altitude à engorgement permanent, saturée en eaux minéralisées, où l'on trouve des coussins compacts d' <i>Oxychloe andina</i> et, dans une proportion moindre, <i>Distichia muscoides</i> |
| 6 | = | Herbage hygrophile à engorgement saisonnier, composé de <i>Deyeuxia curvula</i> et de <i>D. rigescens</i> , associées à d'abondantes pailles sauvages (<i>Panicum prionitis</i>) |
| 7 | = | Plan d'eau principal (Coronel, 2010) |

La classification non supervisée par seuils naturels (méthode d'optimisation de Jenks) (Jenks, 1967 ; Morsy *et al.*, 2016 ; Gavazzi *et al.*, 2016 ; Anchang *et al.*, 2016) a été appliquée pour classer les images satellite. Avec la méthode de Jenks, les classes sont déterminées par les regroupements naturels inhérents aux données. Les seuils de classe sont créés de manière à optimiser le regroupement des valeurs similaires et à maximiser les différences entre les classes. On a obtenu ≤ 18 classes pour les différentes dates ; les limites séparant les classes sont définies aux endroits où l'on observe des discontinuités relativement importantes dans les valeurs (ESRI, 2017). Pour chaque date, on a examiné la classification des valeurs les plus élevées de la plage NDVI, qui représentent la plus forte activité et donc la plus grande disponibilité en eau, ce qui permet de différencier la végétation des zones humides des autres formations végétales présentes dans la zone étudiée. Etant donné que, dans la région, les zones humides d'altitude sont en grande partie fragmentées du fait de la présence de chenaux, on considère que la végétation classée comprend des formations végétales de transition de type 3, 4 et 6, comme on peut le voir à la figure 4.

Ensuite, dans le cadre du post-traitement, on a examiné l'influence de la résolution spatiale sur l'échelle cartographique, en appliquant l'unité minimale cartographiable (UMC) de la classification numérique de Tobler (1987). Selon cette méthode, la surface minimale permettant de déterminer une catégorie à cartographier est de deux pixels, ce qui équivaut à 0,36 ha (3600 m²) dans une image dont la résolution spatiale est de 30 mètres, et à une surface comprise entre 1 et 100 m² pour les images à haute résolution. Etant donné que l'unité cartographique définie pour la zone étudiée mesure environ 10 m², aucune méthode de post-traitement n'a été appliquée aux images Landsat, les résultats de la classification étant restés inchangés. Toutefois, pour les images à haute résolution, un noyau de convolution de dimension 4x4 (filtrage majoritaire) a été appliqué pour éliminer l'effet poivre et sel

des pixels individuels et isolés. Enfin, le résultat de la classification a été converti en polygones en vue du calcul de superficie.

5.3.2. Superficie et variabilité totales et saisonnières (tendances)

Pour calculer la superficie totale des zones humides d'altitude, on a converti la classification en polygones, organisés comme suit : zone humide d'altitude nord, zone humide d'altitude sud et autres zones humides d'altitude (en référence à d'autres polygones de végétation qui ont aussi été classés comme zones humides d'altitude).

Pour l'analyse de variabilité, les valeurs NDVI ont été extraites de chaque polygone délimité comme représentant la zone humide nord et la zone humide sud aux différentes dates, de sorte à construire une série temporelle. Pour détecter les changements, on a procédé à une analyse, consistant à obtenir les valeurs médianes, maximales et minimales de chaque date, puis à effectuer des comparaisons année-saison/année-saison. Les écarts observés ont été évalués au moyen de différents graphiques exploratoires. En outre, pour mettre en évidence la distribution des valeurs NDVI à chaque date, les données sont représentées dans des diagrammes de quartiles pour la série complète, ainsi que par saison, ce qui permet de montrer de façon synthétique : le minimum, le premier quartile, la médiane, le troisième quartile et le maximum.

Les analyses sont initialement divisées en fonction des différences de résolution des données (images Landsat et images à haute résolution), l'hypothèse étant posée qu'il y a plus de pixels mixtes⁴ dans les images Landsat que dans celles à haute résolution. Il est postulé que ces différences sont en partie réduites par l'application de valeurs moyennes dans les analyses statistiques.

Par ailleurs, il faut aussi tenir compte des différences entre les capteurs, au sein desquels les bandes d'une même région du spectre peuvent présenter différentes longueurs d'onde ou différentes fonctions de réponse spectrale, ce qui peut induire des différences dans les valeurs de pixel d'un même couvert (ENVI, 2017).

5.3.3. Sensibilité des zones humides d'altitude et influence des chenaux

La sensibilité aux variations de la disponibilité de l'eau dans les zones humides d'altitude est estimée à partir des variations intersaisonnières et interannuelles de toute la série temporelle analysée. La fonction Sum Cell Statistics⁵ d'ArcGis 10 est utilisée pour calculer la sensibilité. Pour simplifier les résultats, on a attribué la valeur 1 à toutes les formes de végétation classées dans la catégorie «zone humide d'altitude». Les résultats ainsi obtenus montrent que, là où les zones humides d'altitude sont plus fréquentes, on observe une plus grande stabilité dans le temps et, donc, une moindre sensibilité à la disponibilité de l'eau ; à l'inverse, là où la fréquence est inférieure, la sensibilité aux changements associés à la disponibilité de l'eau est supérieure. Les résultats sont présentés pour les deux périodes étudiées, ventilés par résolution.

⁴ Un pixel mixte est un élément du pixel qui est utilisé pour plusieurs types de couverts. Deux situations se présentent : 1) les pixels situés sur les bords d'un grand couvert traduiront une valeur mixte, 2) un objet est relativement petit par rapport à la résolution spatiale du capteur (Klein Gebbinck *et al.*, 1998).

⁵ Cette fonction calcule la somme de toutes les cellules raster des fichiers d'entrée pour les représenter sous forme de valeurs en sortie.

6. RÉSULTATS

6.1. Images Landsat

6.1.1. Superficie multi-temporelle des zones humides d'altitude

Les résultats de la classification des zones humides d'altitude, réalisée pour obtenir la superficie totale pour la période 1975–2000, montrent qu'en général la variabilité intra-annuelle et interannuelle entre la saison sèche et la saison humide est considérable. Néanmoins, il ne se dégage aucune tendance significative des changements relevés dans la période complète ; ainsi, bien qu'elle enregistre d'importants changements saisonniers, la superficie des zones humides d'altitude s'est maintenue dans la même plage de superficie au cours de la période étudiée.

La légère tendance à la hausse observée à la figure 5 s'explique principalement par le fait que la superficie balayée en 1975 était plus petite, la résolution spatiale du capteur étant inférieure à cette date de la saison sèche.

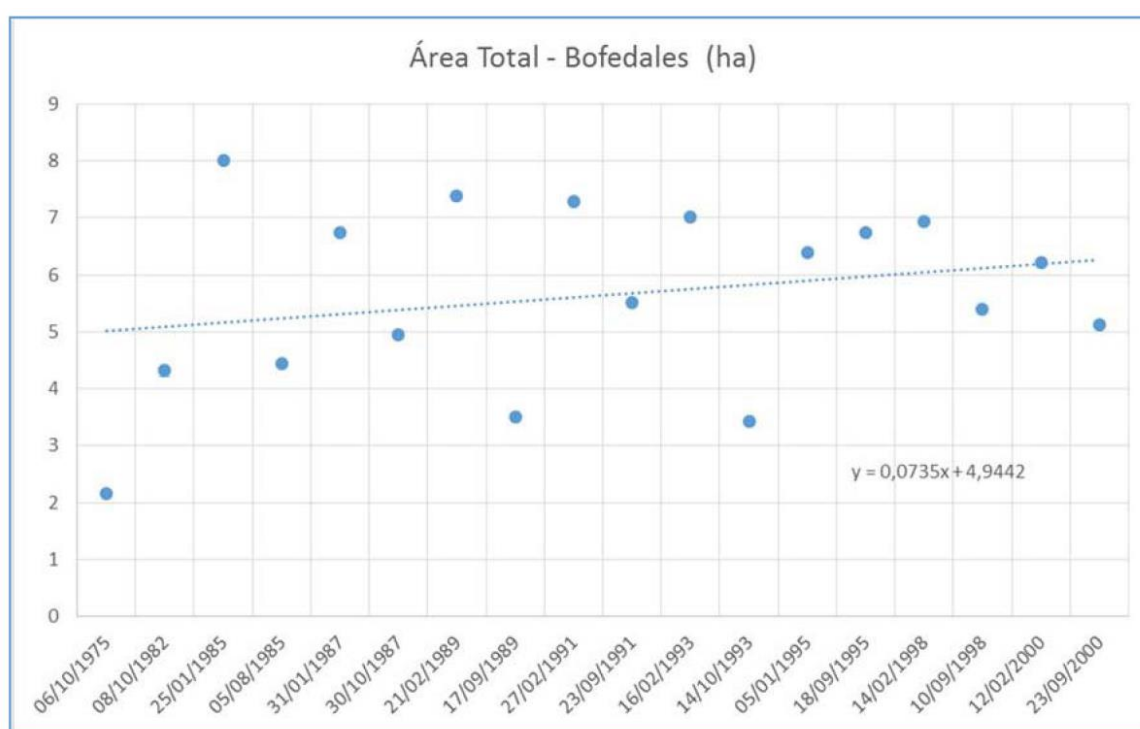


Figure 5
Superficie totale des zones humides d'altitude (ha). Période comprise entre 1975 et 2000 (saisons sèche et humide) — images Landsat (voir le tableau 1)

En saison sèche (figure 6), la superficie affiche une légère tendance à la hausse, en particulier vers la fin des séries temporelles étudiées (1995 à 2000). Ce comportement semble directement lié à la tendance à la contraction de la superficie, observée en saison humide (figure 6). De manière générale, il convient de noter que la superficie classée comme zone humide d'altitude est supérieure en saison humide (figure 7), car les valeurs NDVI en saison sèche atteignent des niveaux très bas, comparables à ceux des autres formes de végétation voisines ; or, pour différencier les couverts, la classification distingue principalement les valeurs les plus élevées, qui correspondent à une zone plus petite que celle observée en saison humide.

Notons qu'en saison sèche la tendance observée est légèrement influencée par la date de la saison sèche de 1975, dont la résolution spatiale est inférieure à celle du reste de la série.

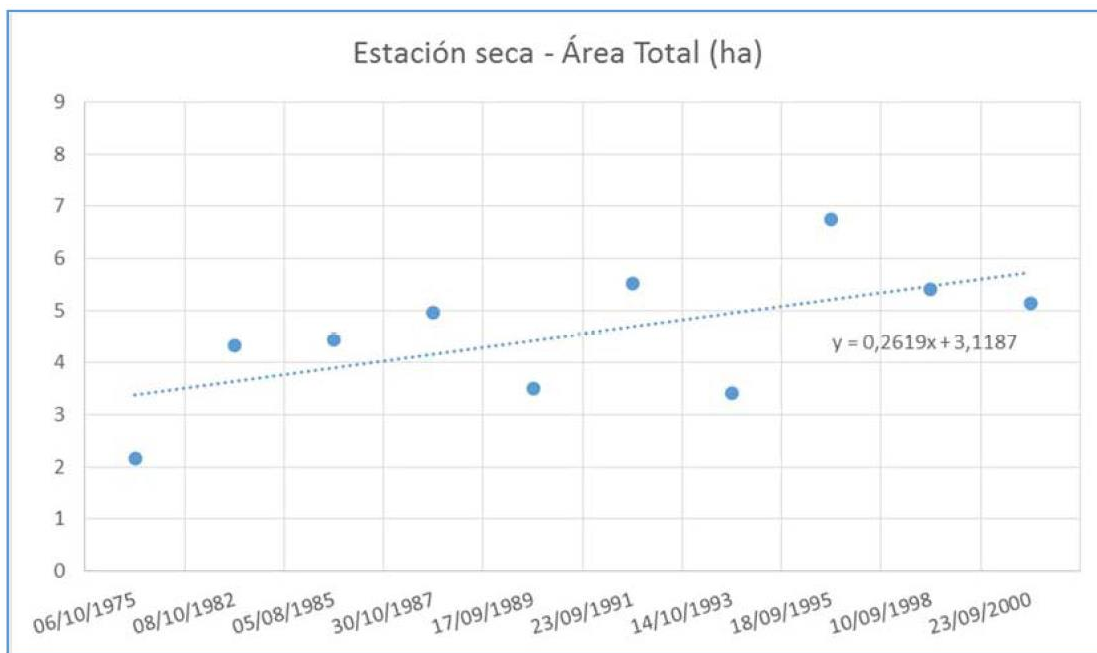


Figure 6
Superficie des zones humides d'altitude en saison sèche. Période comprise entre 1975 et 2000 — images Landsat (voir le tableau 1 pour plus de détails)

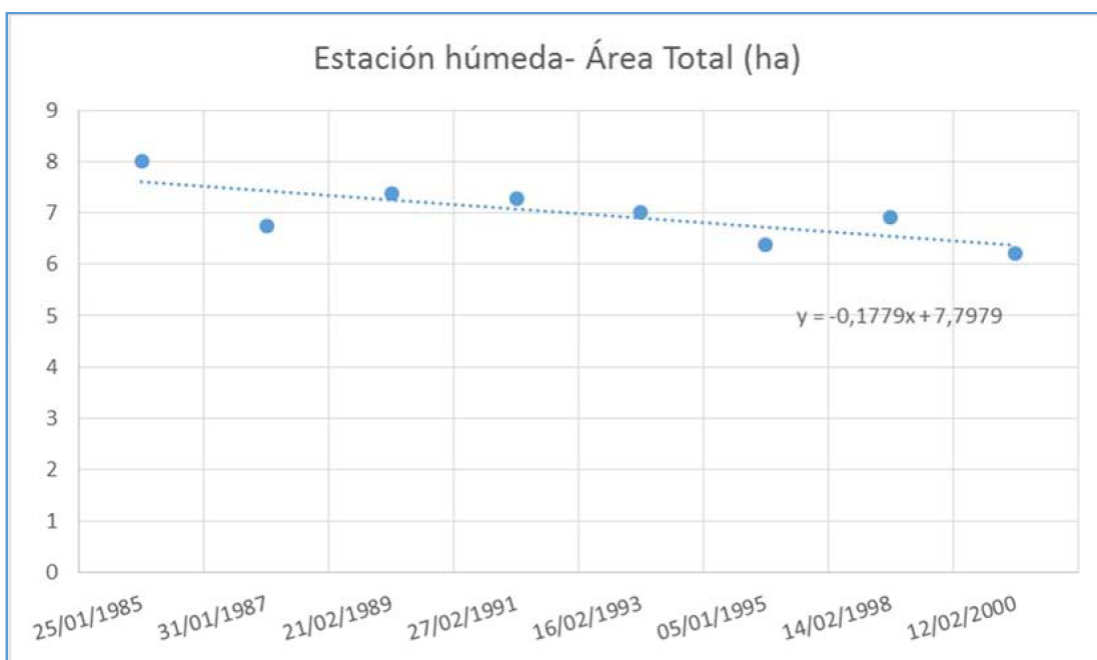


Figure 7
Superficie des zones humides d'altitude en saison humide. Période comprise entre 1975 et 2000 — images Landsat (voir le tableau 1 pour plus de détails)

En général, les superficies des zones humides nord, sud et autres sont stables dans la zone (figures 8 à 10). On observe en outre une variabilité significative entre la saison sèche et la saison humide de la série, celle de la zone humide nord étant inférieure, surtout si on la compare à celle de la zone sud. De surcroît, la superficie de la zone humide d'altitude sud est supérieure à celle de la zone nord et des autres zones humides.

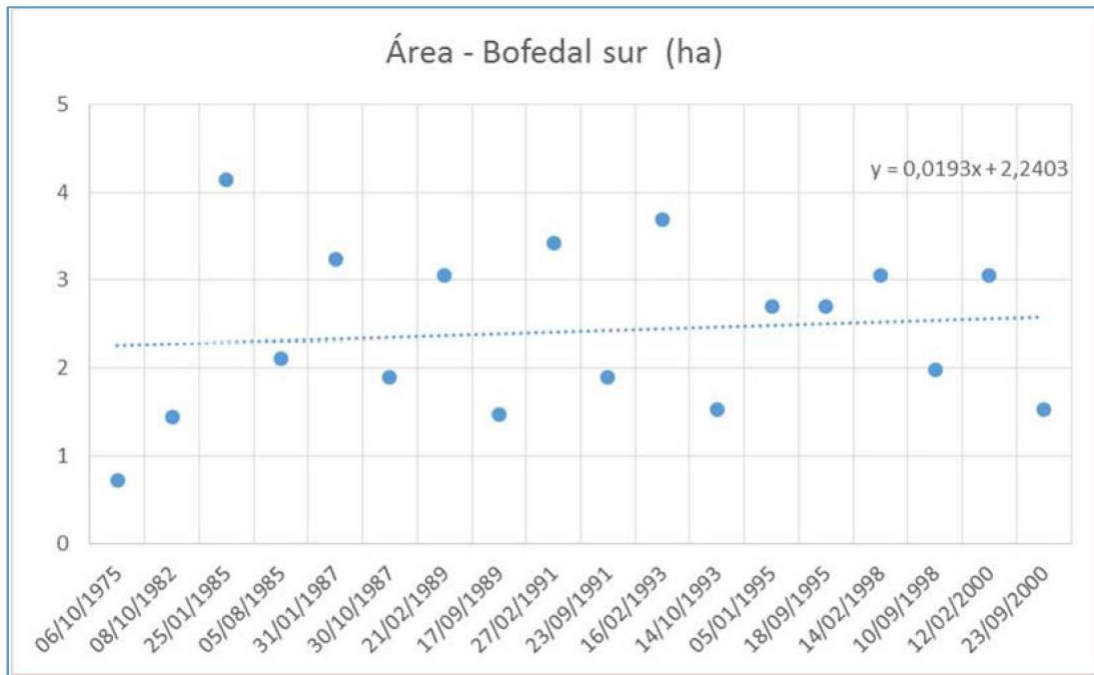


Figure 8
Superficie totale de la zone humide d'altitude sud (saisons humide et sèche). Période comprise entre 1975 et 2000 — images Landsat (voir le tableau 1 pour plus de détails)

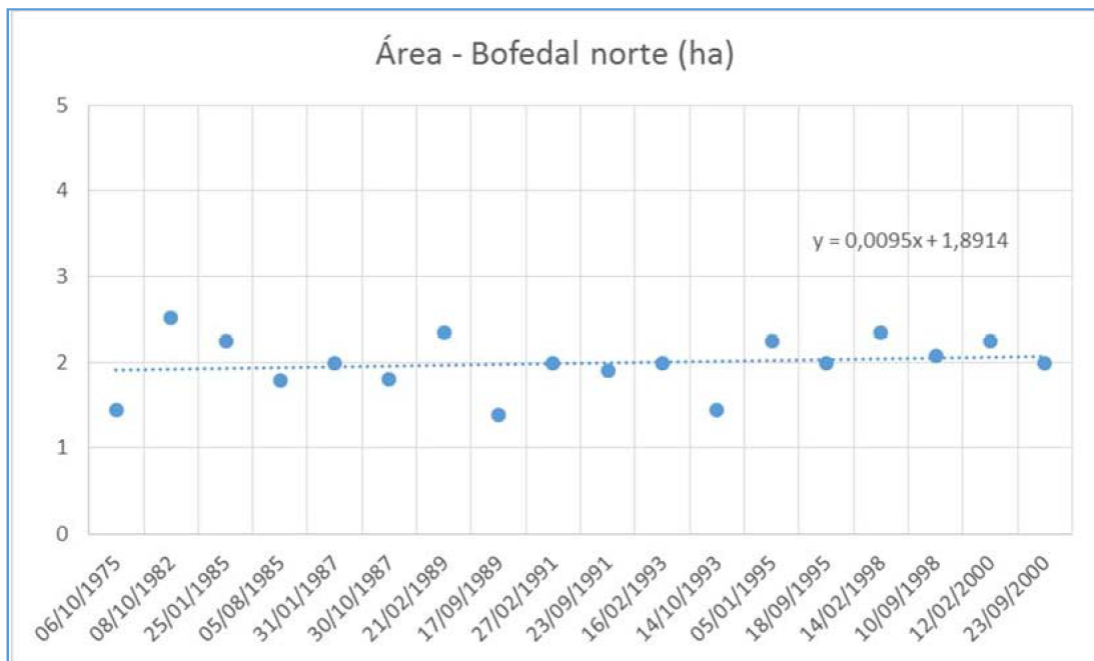


Figure 9
Superficie totale de la zone humide d'altitude nord (saisons humide et sèche). Période comprise entre 1975 et 2000 — images Landsat (voir le tableau 1 pour plus de détails)

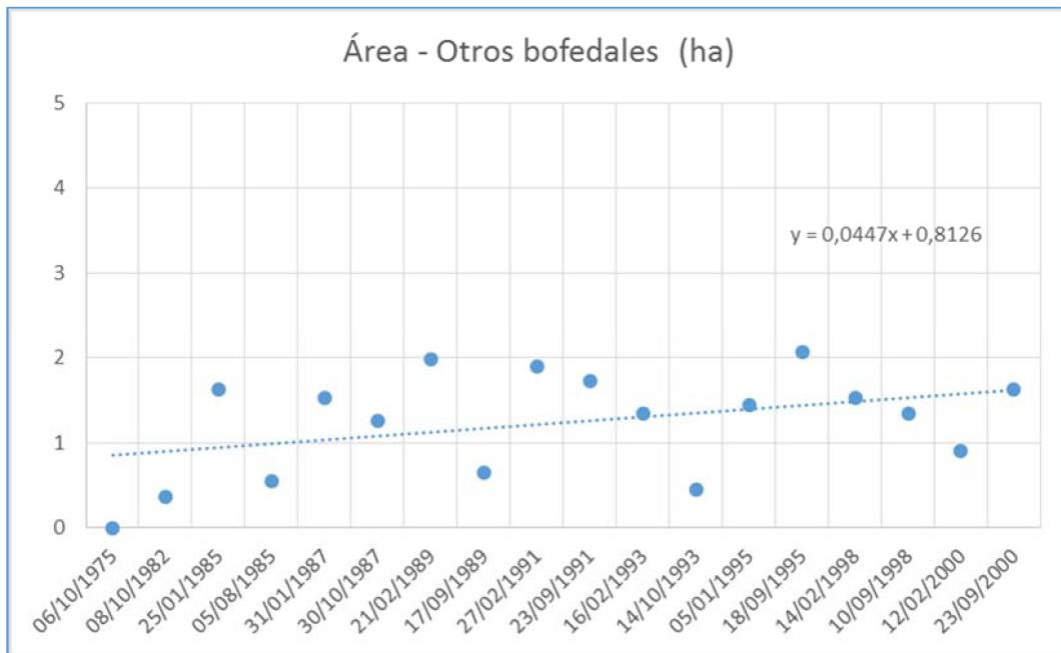


Figure 10
Superficie total des autres zones humides d'altitude (saisons humide et sèche). Période comprise entre 1975 et 2000 — images Landsat (voir le tableau 1 pour plus de détails)

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Date	06/10/1975	08/10/1982	25/01/1985	05/08/1985	31/01/1987	30/10/1987	21/02/1989	17/09/1989	27/02/1991	23/09/1991	16/02/1993	14/10/1993	05/01/1995	18/09/1995	14/02/1998	10/09/1998	12/02/2000	23/09/2000
Zone humide nord	1,44	2,52	2,25	1,79	1,98	1,8	2,34	1,38	1,98	1,9	1,98	1,44	2,25	1,98	2,34	2,07	2,25	1,98
Zone humide sud	0,72	1,44	4,14	2,11	3,24	1,89	3,06	1,47	3,42	1,89	3,69	1,53	2,7	2,7	3,06	1,98	3,06	1,53
Zone humide	0	0,36	1,62	0,55	1,53	1,26	1,98	0,65	1,89	1,72	1,35	0,45	1,44	2,07	1,53	1,35	0,9	1,62
Total	2,16	4,32	8,01	4,45	6,75	4,95	7,38	3,5	7,29	5,51	7,02	3,42	6,39	6,75	6,93	5,4	6,21	5,13
Saison	Sèche	Sèche	Humide	Sèche	Humide	Sèche	Humide	Sèche	Humide	Sèche	Humide	Sèche	Humide	Sèche	Humide	Sèche	Humide	Sèche

Tableau 1

Superficie des zones humides d'altitude des sources du Silala. Période comprise entre 1975 et 2000 — images Landsat

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Date	06/12/2002	16/06/2004	30/05/2007	10/09/2010	21/03/2011	15/10/2011	03/03/2014	12/10/2014	08/08/2015	02/03/2016	25/06/2016	10/08/2016	01/02/2017
Zone humide nord	0,9	0,5	0,7	0,7	0,5	0,4	1,1	0,6	0,8	0,8	0,9	0,5	0,7
Zone humide sud	1,9	1,2	1,5	1,2	1,6	0,9	2,4	0,7	1,0	2,0	0,7	0,5	1,9
Zone humide	1,1	1,4	0,9	1,7	1,5	0,7	2,4	1,1	1,4	2,0	1,4	1,1	1,5
Total	3,97	3,185	3,02	3,65	3,58	1,92	5,88	2,39	3,25	4,87	2,91	2,07	4,06
Saison	Humide	Sèche	Sèche	Sèche	Humide	Sèche	Humide	Sèche	Sèche	Humide	Sèche	Sèche	Humide

Tableau 2

Superficie des zones humides d'altitude des sources du Silala. Période comprise entre 2002 et 2017 — images à haute résolution

N°	Date	Total	Saison	Ecart saisonnier	Médiane	Coef. var. intersaisonnaire	
1	06/10/1975	2,16	Sèche	-	-	-	
2	08/10/1982	4,32	Sèche				
3	25/01/1985	8,01	Humide	2,52	6,23	40,41	
4	05/08/1985	4,45	Sèche				
5	31/01/1987	6,75	Humide	1,27	5,85	21,76	
6	30/10/1987	4,95	Sèche				
7	21/02/1989	7,38	Humide	2,74	5,44	50,43	
8	17/09/1989	3,50	Sèche				
9	27/02/1991	7,29	Humide	1,26	6,40	19,67	
10	23/09/1991	5,51	Sèche				
11	16/02/1993	7,02	Humide	2,55	5,22	48,77	
12	14/10/1993	3,42	Sèche				
13	05/01/1995	6,39	Humide	0,25	6,57	3,87	
14	18/09/1995	6,75	Sèche				
15	14/02/1998	6,93	Humide	1,08	6,17	17,55	
16	10/09/1998	5,40	Sèche				
17	12/02/2000	6,21	Humide	0,76	5,67	13,47	
18	23/09/2000	5,13	Sèche				
Humide				0,57	7,00	8,21	Coef. var. interannuelle
Sèche				1,30	4,56	28,44	

N°	Date	Total	Saison	Ecart saisonnier	Médiane	Coef. var. intersaisonnaire	
1	06/12/2002	3,97	Humide	-	-	-	
2	16/06/2004	3,19	Sèche	-	-	-	
3	30/05/2007	3,02	Sèche	-	-	-	
4	10/09/2010	3,65	Sèche	0,05	3,62	1,37	
5	21/03/2011	3,58	Humide				
6	15/10/2011	1,92	Sèche	-	-	-	
7	03/03/2014	5,88	Humide	2,47	4,14	59,68	
8	12/10/2014	2,39	Sèche				
9	08/08/2015	3,25	Sèche	1,15	4,06	28,21	
10	02/03/2016	4,87	Humide				
11	25/06/2016	2,91	Sèche	-	-	-	
12	10/08/2016	2,07	Sèche	1,41	3,07	45,91	
13	01/02/2017	4,06	Humide				
Humide				0,92	4,47	20,49	Coef. var. interannuelle
Sèche				0,61	2,80	21,81	

Tableau 3
Superficie totale des zones humides d'altitude des sources du Silala et coefficient de variabilité intersaisonnaire et interannuelle.
Période comprise entre 1975 et 2000 (à gauche) et période comprise entre 2002 et 2017 (à droite)

6.1.2. Analyse de la variabilité des zones humides d'altitude

L'analyse des valeurs NDVI correspondant à la superficie des zones classées comme zones humides d'altitude montre que ces valeurs sont distribuées autour d'une médiane d'environ 0,4. Les différences saisonnières apparaissent clairement à la figure 11, atteignant des valeurs plus élevées en saison humide, au cours de laquelle la plage de valeurs enregistrée est plus large que celle observée en saison sèche.

De manière générale, aucun changement significatif n'a été mis en évidence pendant la période étudiée. La végétation semble se maintenir dans les mêmes plages au fil des ans et de saison en saison. Les changements observés dans les données pourraient être davantage liés à l'année au cours de laquelle ils sont relevés.

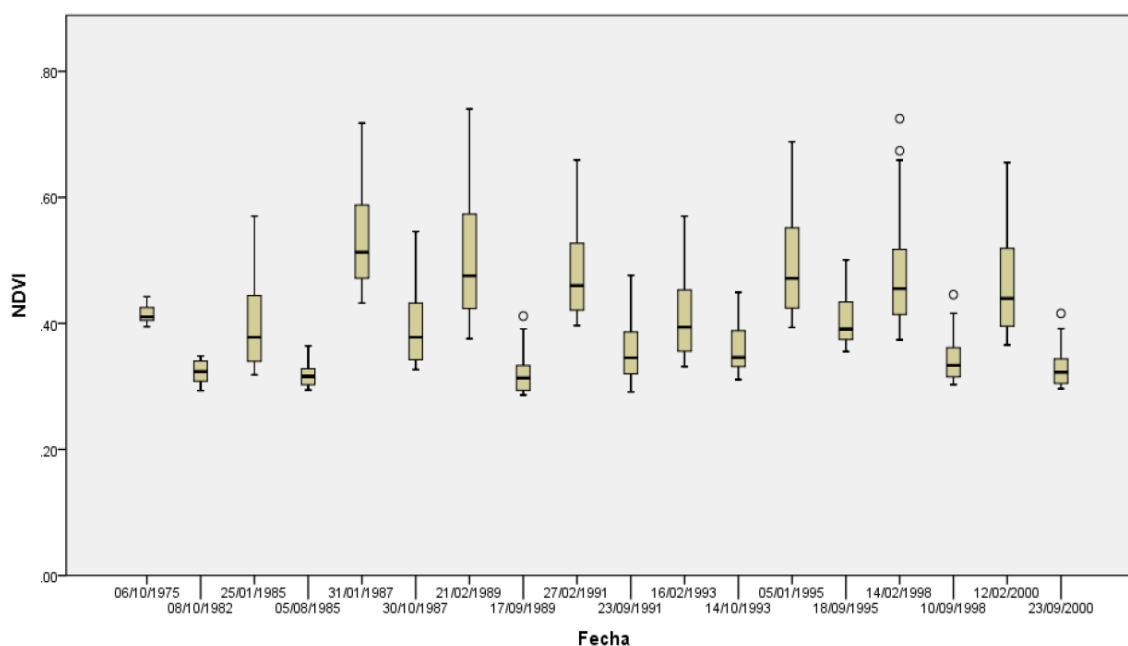


Figure 11

Distribution des valeurs NDVI (minimum, premier quartile, médiane, troisième quartile et maximum) sur toute la série temporelle de la période comprise entre 1975 et 2000 — images Landsat

Si l'on examine en détail la distribution de la saison sèche (figure 12), on constate qu'il n'y a aucun changement significatif durant la période étudiée et que toute variation pourrait être davantage liée à la date observée et à la durée de la saison sèche pendant l'année considérée. Durant cette saison, les zones humides d'altitude se maintiennent principalement entre 0,20 et 0,40, une plage qui correspond généralement à des herbes sèches et empêche leur différenciation par rapport aux autres formes de végétation. La plage de valeurs NDVI en saison sèche est plus étroite, les pics atteints en saison humide étant en outre absents (annexe 4).

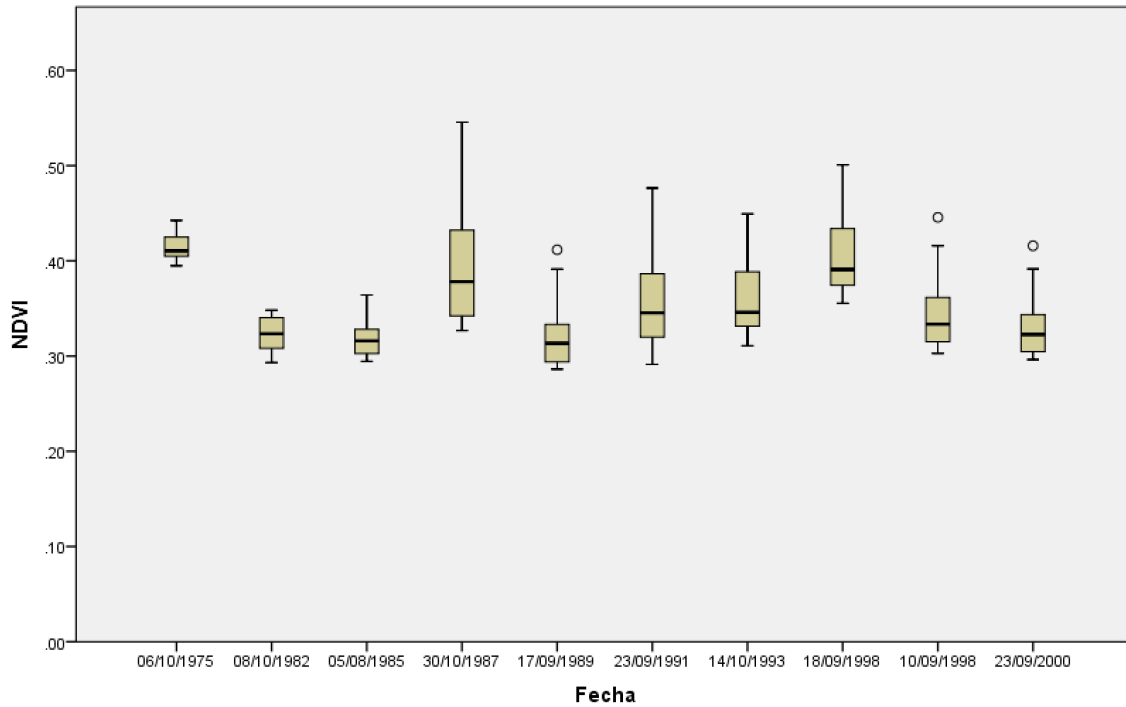


Figure 12

Distribution des valeurs NDVI (minimum, premier quartile, médiane, troisième quartile et maximum) en saison sèche pendant la période comprise entre 1975 et 2000 — images Landsat

Aucun changement significatif n'a en outre été relevé en saison humide pendant la période étudiée (figure 13). Tout changement observé pourrait être associé à la date et à la disponibilité de l'eau au moment considéré. Comme indiqué précédemment, la plage de valeurs NDVI en saison humide est [beaucoup plus] large, atteignant des valeurs situées entre 0,40 et 0,70, qui correspondent à une végétation saine et active.

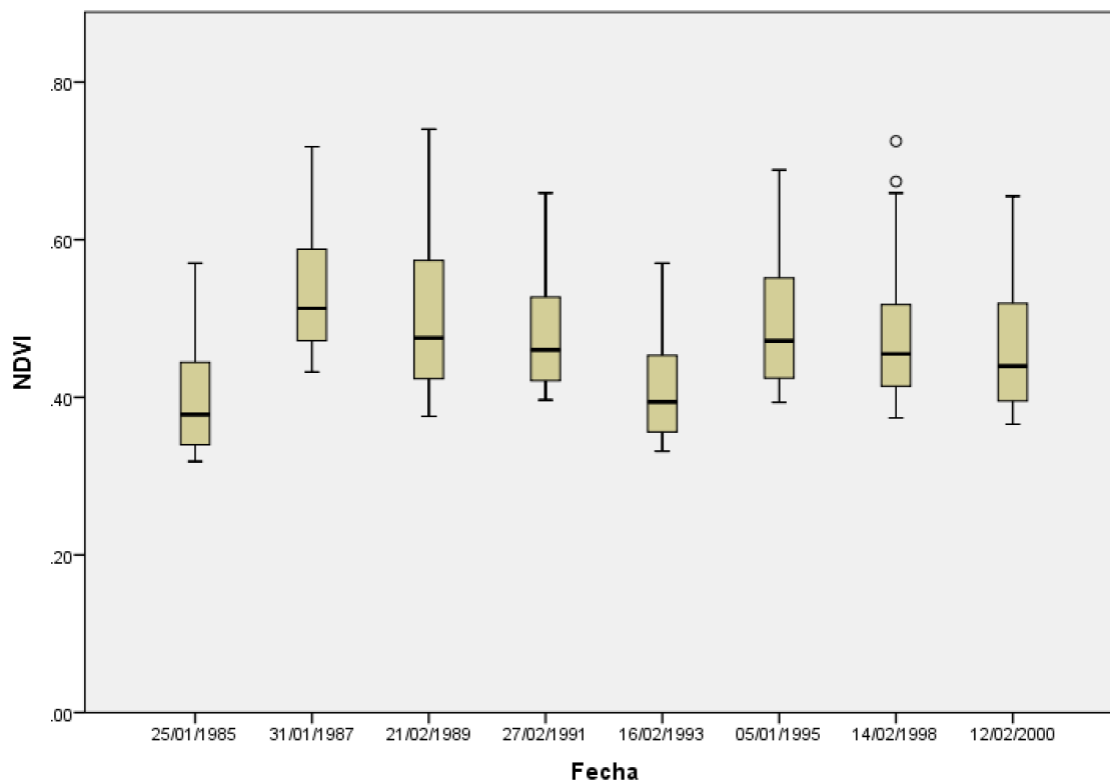


Figure 13

Distribution des valeurs NDVI (minimum, premier quartile, médiane, troisième quartile et maximum) en saison humide pendant la période comprise entre 1975 et 2000 — images Landsat

L'analyse des valeurs médianes, minimales et maximales de la série de données complète (figure 14 et tableau 5) ne révèle pas non plus de changements au cours de l'ensemble de la période d'étude. On peut observer des variations saisonnières importantes dans l'activité de la végétation des zones humides d'altitude, qui se maintient stable pendant toute la période.

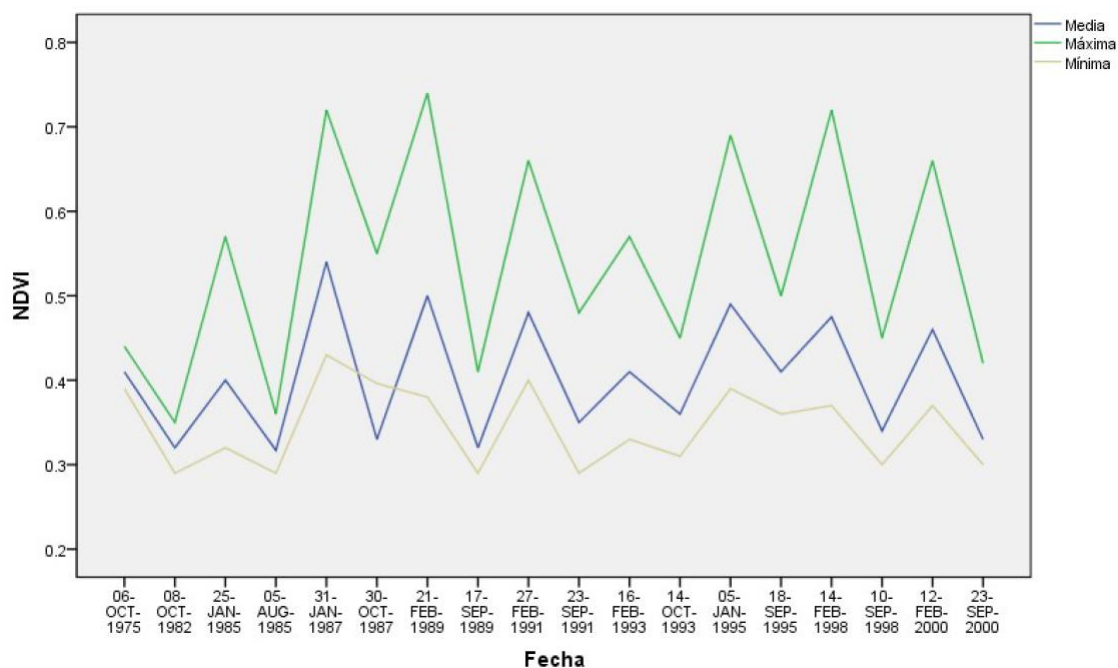


Figure 14

Distribution des valeurs NDVI minimales, médianes et maximales pendant la période comprise entre 1975 et 2000 — images Landsat

N°	1	2	3	4	5	7	9	10	11	12	13
Date	06/12/2002	16/06/2004	30/05/2007	10/09/2010	21/03/2011	03/03/2014	08/08/2015	02/03/2016	25/06/2016	10/08/2016	01/02/2017
Médiane	0,13	0,27	0,28	0,28	0,56	0,48	0,3	0,5	0,32	0,31	0,79
Maximum	0,39	1	1	1	0,92	1	0,56	0,8	0,48	0,53	1
Minimum	0,06	0,22	0,24	0,13	0,32	0,34	0,25	0,36	0,29	0,27	0,76

Tableau 4
Valeurs NDVI médianes, maximales et minimales — images à haute résolution

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Date	06/10/1975	08/10/1982	25/01/1985	05/08/1985	31/01/1987	30/10/1987	21/02/1989	17/09/1989	27/02/1991	23/09/1991	16/02/1993	14/10/1993	05/01/1995	18/09/1995	14/02/1998	10/09/1998	12/02/2000	23/09/2000
Méd.	0,41	0,32	0,40	0,32	0,54	0,33	0,50	0,32	0,48	0,35	0,41	0,36	0,49	0,41	0,48	0,34	0,46	0,33
Max.	0,44	0,35	0,57	0,36	0,72	0,55	0,74	0,41	0,66	0,48	0,57	0,45	0,69	0,50	0,72	0,45	0,66	0,42
Min.	0,39	0,29	0,32	0,29	0,43	0,40	0,38	0,29	0,40	0,29	0,33	0,31	0,39	0,36	0,37	0,30	0,37	0,30

Tableau 5
Valeurs NDVI médianes, maximales et minimales — images Landsat

6.1.3. Analyse de sensibilité

On estime que 58 % et 28 % (8,8 et 4,2 hectares environ) de la superficie totale des zones humides d'altitude se situent dans les niveaux élevés et moyens de sensibilité, tandis que la superficie restante, 17 % (2,5 hectares environ), est classée dans les niveaux moyens et faibles de sensibilité (figure 16).

De même, on estime que la végétation qui se maintient aux niveaux de sensibilité faibles est, pour la plus grande part, tributaire de sources d'eau intarissables, telles que des trous d'eau ou sources.

6.2. Images à haute résolution

6.2.1. Superficie multi-temporelle des zones humides d'altitude

Les résultats de la classification de la superficie des zones humides d'altitude au moyen d'images à haute résolution pour la période 2002–2017 montrent que, de manière générale, aucun changement important n'est observé dans la superficie de ces zones. Les changements constatés dans la superficie correspondent à des variations saisonnières, à savoir que, au cours d'une même année, on relève une variabilité considérable de la superficie entre la saison humide et la saison sèche ; néanmoins, ces changements s'observent chaque année, les différences variant selon la date à laquelle l'image a été acquise et la disponibilité de l'eau résultant des précipitations locales.

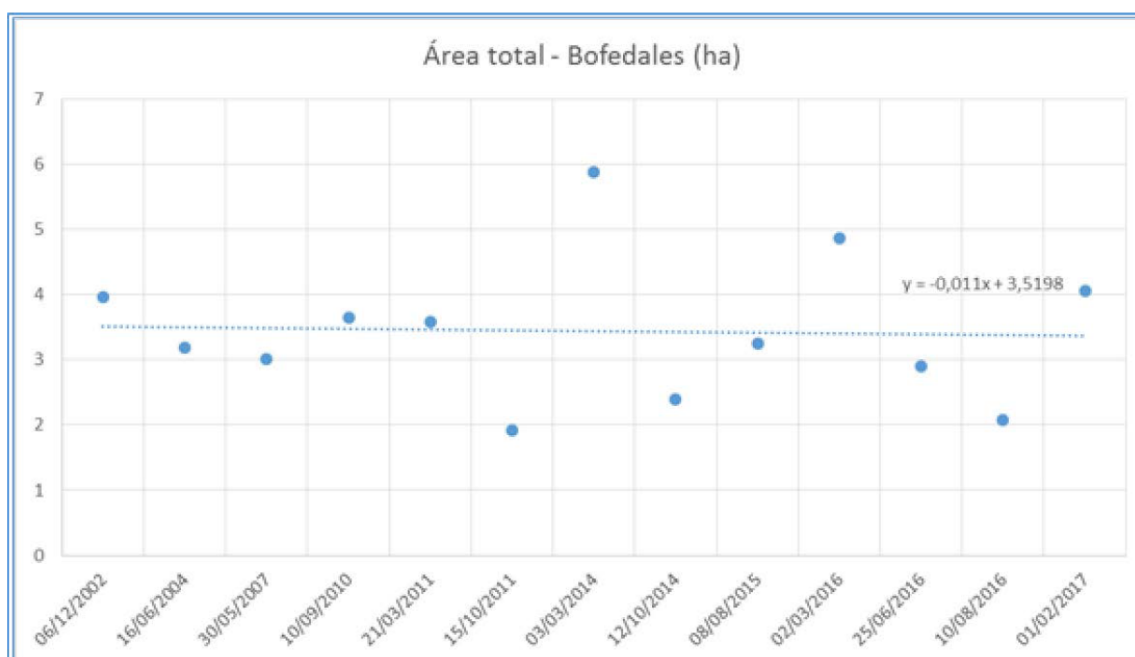


Figure 15

Superficie totale des zones humides d'altitude (ha). Période comprise entre 2002 et 2017 (saisons sèche et humide) — images à haute résolution (voir le tableau 3 pour plus de détails)

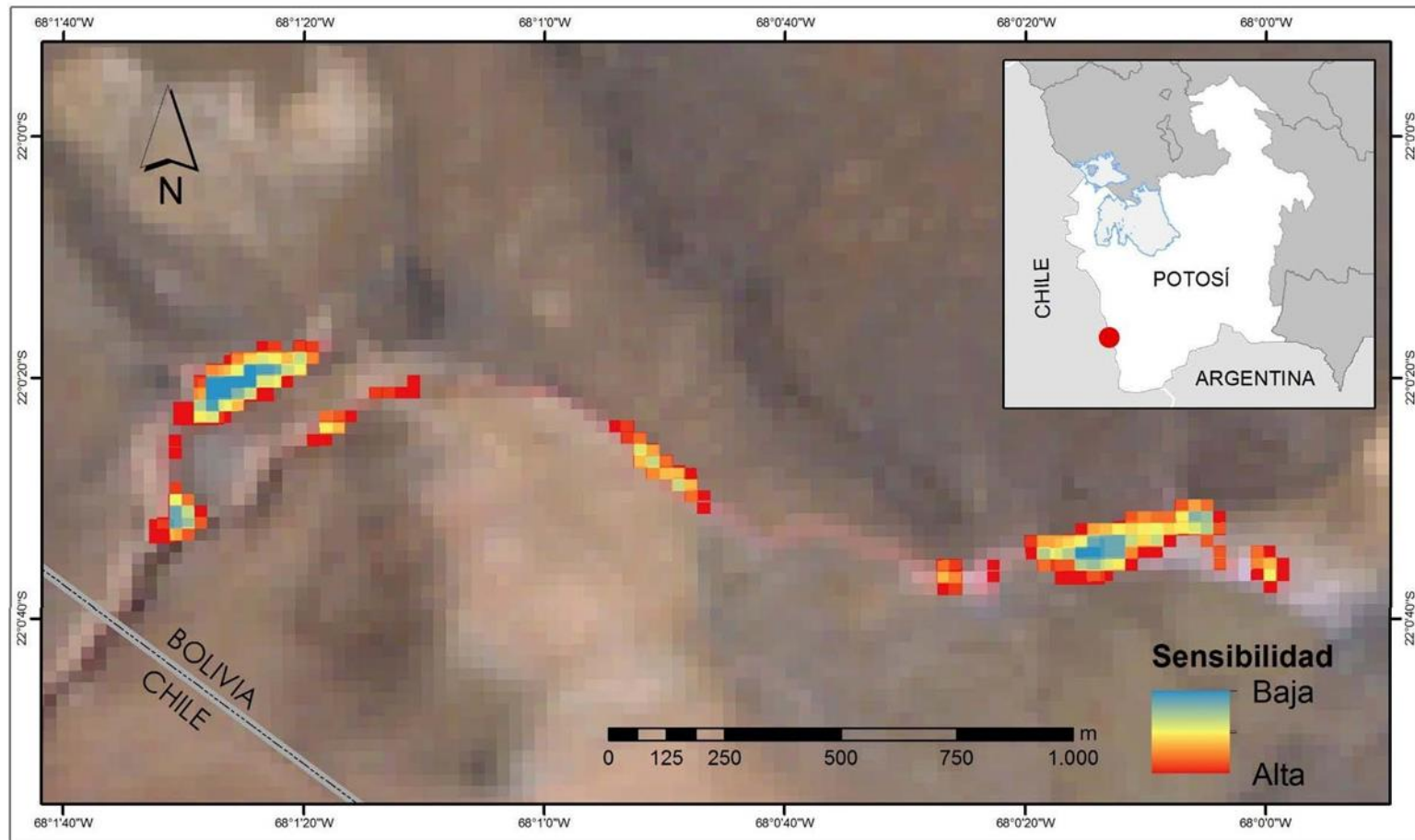


Figure 16

Carte de sensibilité des zones humides d'altitude des sources du Silala. Période comprise entre 1975 et 2000 — images Landsat

En saison sèche (figure 17), la superficie des zones humides d'altitude tend à diminuer, une tendance que l'on observe plus particulièrement au cours de la dernière décennie. Cette tendance est à mettre en lien avec l'augmentation de la superficie en saison humide, qui a également été constatée au cours de la dernière décennie. De plus, la superficie est supérieure en saison humide. Comme pour les images Landsat, il est utile de souligner que les valeurs et plages de valeurs NDVI sont plus grandes en saison humide qu'en saison sèche, ce qui explique que la superficie classifiée soit supérieure en saison humide. Les valeurs NDVI en saison sèche sont comparées aux autres formations végétales observées dans la zone (voir l'annexe 4).

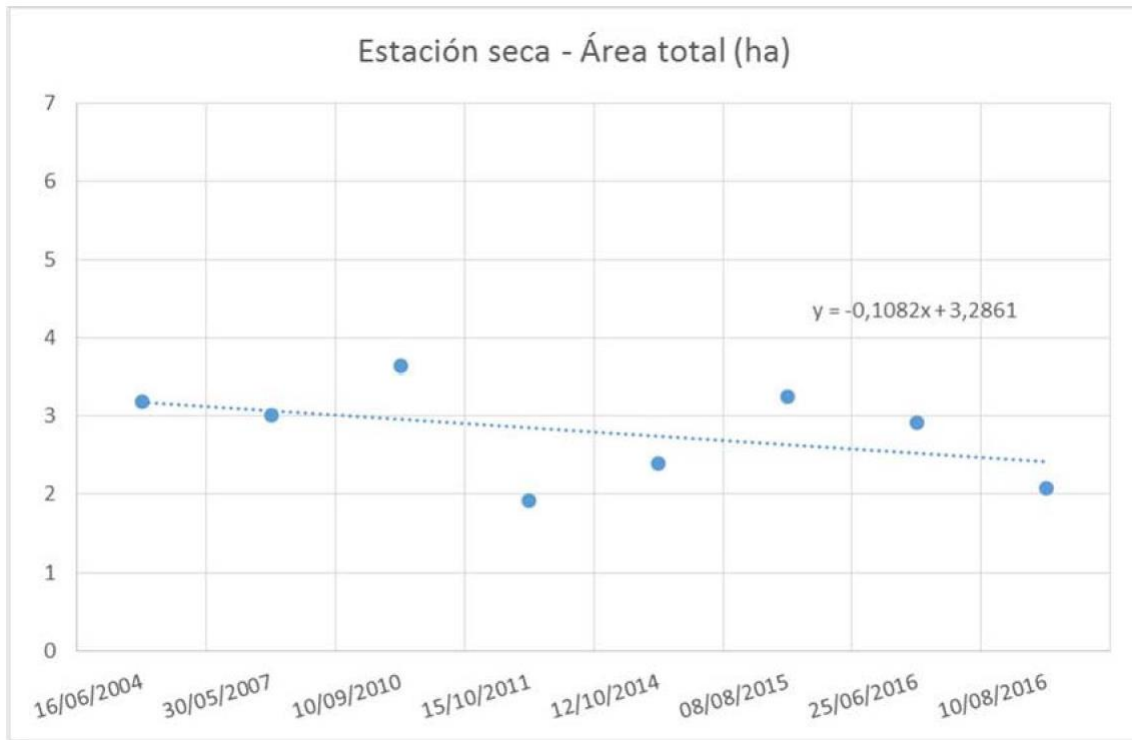


Figure 17
Superficie des zones humides d'altitude en saison sèche. Période comprise entre 2002 et 2017 — images à haute résolution (voir le tableau 3 pour plus de détails)

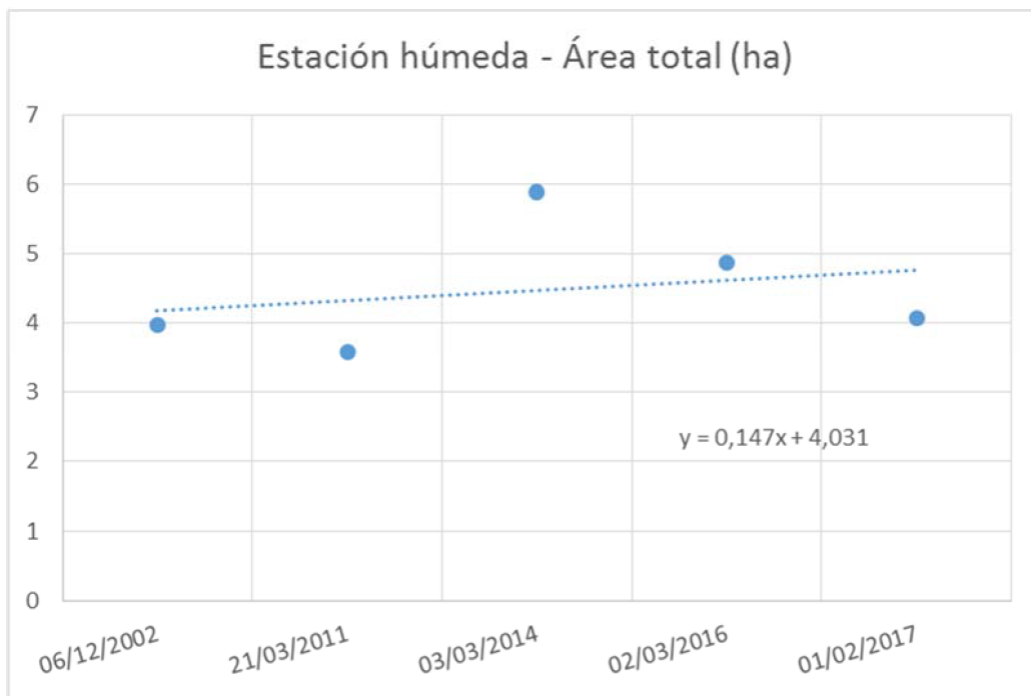


Figure 18

Superficie des zones humides d’altitude en saison humide. Période comprise entre 2002 et 2017 — images à haute résolution (voir le tableau 3 pour plus de détails)

Les différences de superficie observées entre les zones humides nord, sud et autres dans la zone (figures 19 à 21) révèlent que la zone humide sud présente la plus grande superficie, aux côtés des autres zones humides. La superficie des trois zones humides d’altitude est restée globalement stable, ne présentant pas de changements significatifs, ce qui est particulièrement vrai pour la zone humide nord. Les changements observés sont liés à la variabilité saisonnière, qui peut être importante à différentes dates.

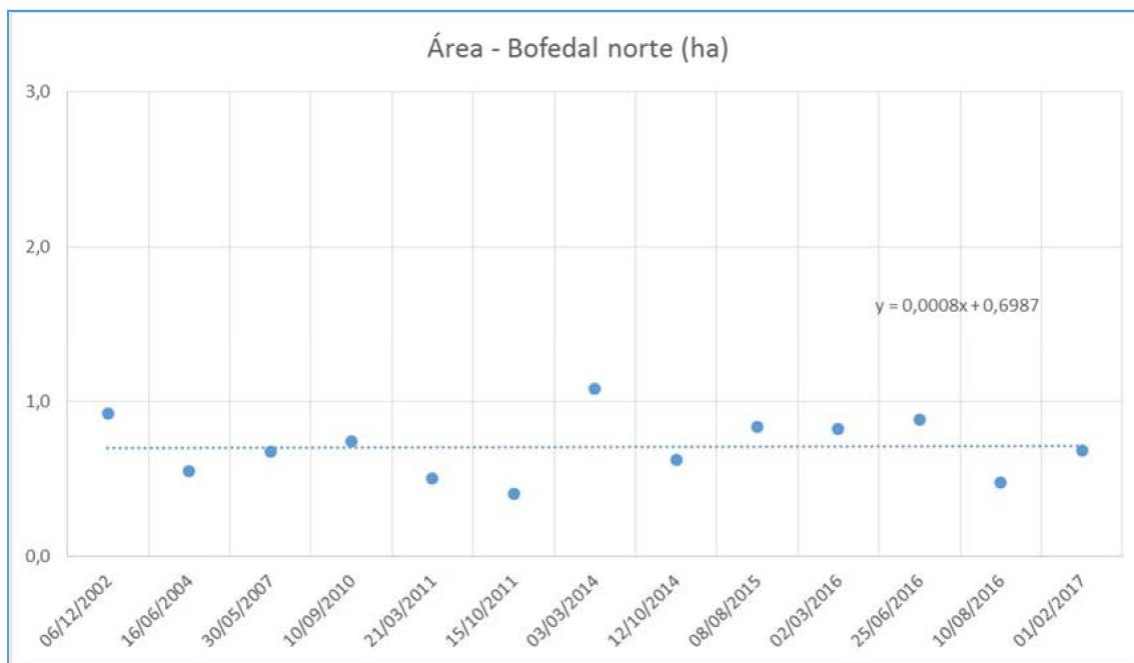


Figure 19

Superficie totale de la zone humide d’altitude nord (saisons sèche et humide). Période comprise entre 2002 et 2017 — images à haute résolution (voir le tableau 3 pour plus de détails)

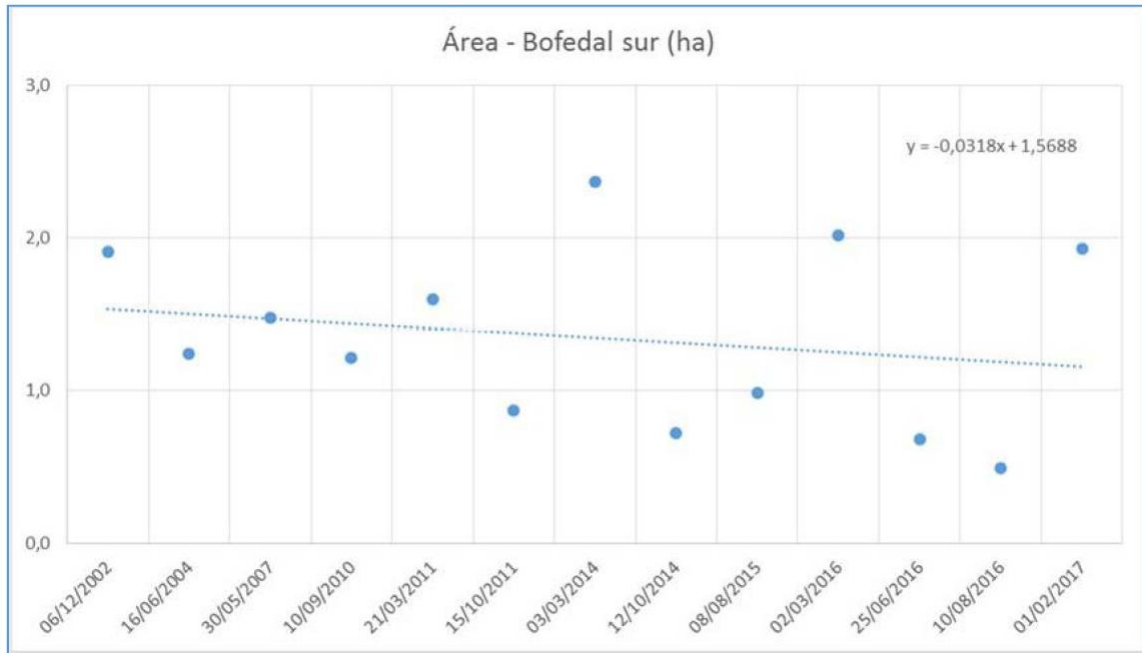


Figure 20
Superficie totale de la zone humide d'altitude sud (saisons sèche et humide). Période comprise entre 2002 et 2017 — images à haute résolution (voir le tableau 3 pour plus de détails)

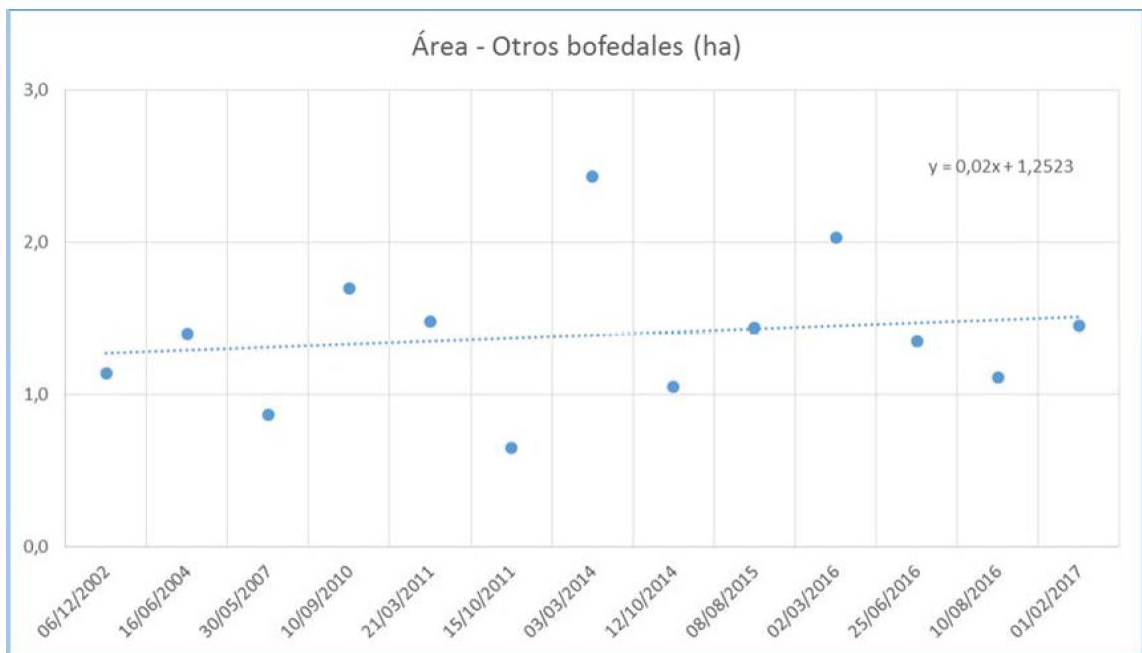


Figure 21
Superficie totale des autres zones humides d'altitude (saisons sèche et humide). Période comprise entre 2002 et 2017 — images à haute résolution (voir le tableau 3 pour plus de détails)

6.2.2. Analyse de la variabilité des zones humides d'altitude

L'analyse des valeurs NDVI correspondant à la superficie des zones classées comme zones humides d'altitude à l'aide des images à haute résolution montre que ces valeurs sont distribuées autour d'une médiane d'environ 0,25 en saison sèche et d'environ 0,50 en saison humide (figure 22). De manière générale, aucun changement significatif n'a été observé pendant la période étudiée. La végétation semble se maintenir dans la même plage au fil des ans et de saison en saison. Les changements observés traduisent les variations saisonnières, atteignant des valeurs plus élevées en saison humide, au cours de laquelle la plage de valeurs enregistrée est légèrement plus large que celle

observée en saison sèche. Ces valeurs sont liées à la disponibilité de l'eau de pluie à la date considérée.

A toutes les dates, on observe un grand nombre de valeurs extérieures à la médiane. Cela s'explique probablement par la meilleure résolution spatiale, qui permet d'enregistrer le comportement dans une partie plus isolée et exclusive de la végétation observée en ce point, sans pâtir de l'effet de mélange de couverts que l'on peut observer dans les images de résolution inférieure, telles que les images Landsat.

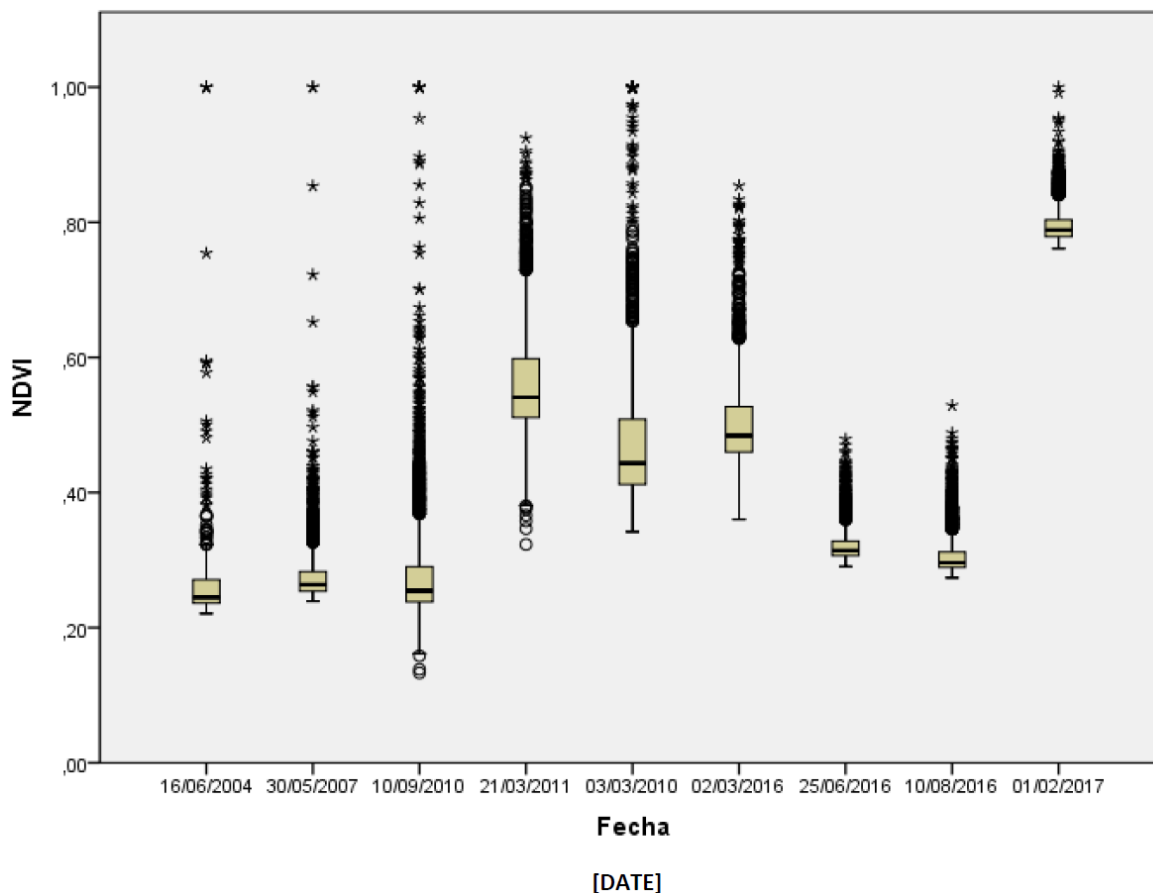


Figure 22
Distribution des valeurs NDVI (minimum, premier quartile, médiane, troisième quartile et maximum) sur toute la série temporelle de la période comprise entre 2002 et 2017 — images à haute résolution

En saison sèche, on constate la présence d'une plage de valeurs stables, qui reste inchangée à travers les années étudiées (figure 23). Par conséquent, aucun changement significatif n'est observé pendant la période considérée. Les valeurs extérieures à la médiane, qui peuvent aller jusqu'à atteindre les maximales, pourraient être associées à de petites zones où l'activité est maintenue grâce à un apport constant d'eau, mais qui sont isolées. Pendant cette saison, les zones humides se maintiennent principalement dans une petite plage, située entre 0,20 et 0,30, que l'on peut confondre avec les herbes sèches (annexe 4).

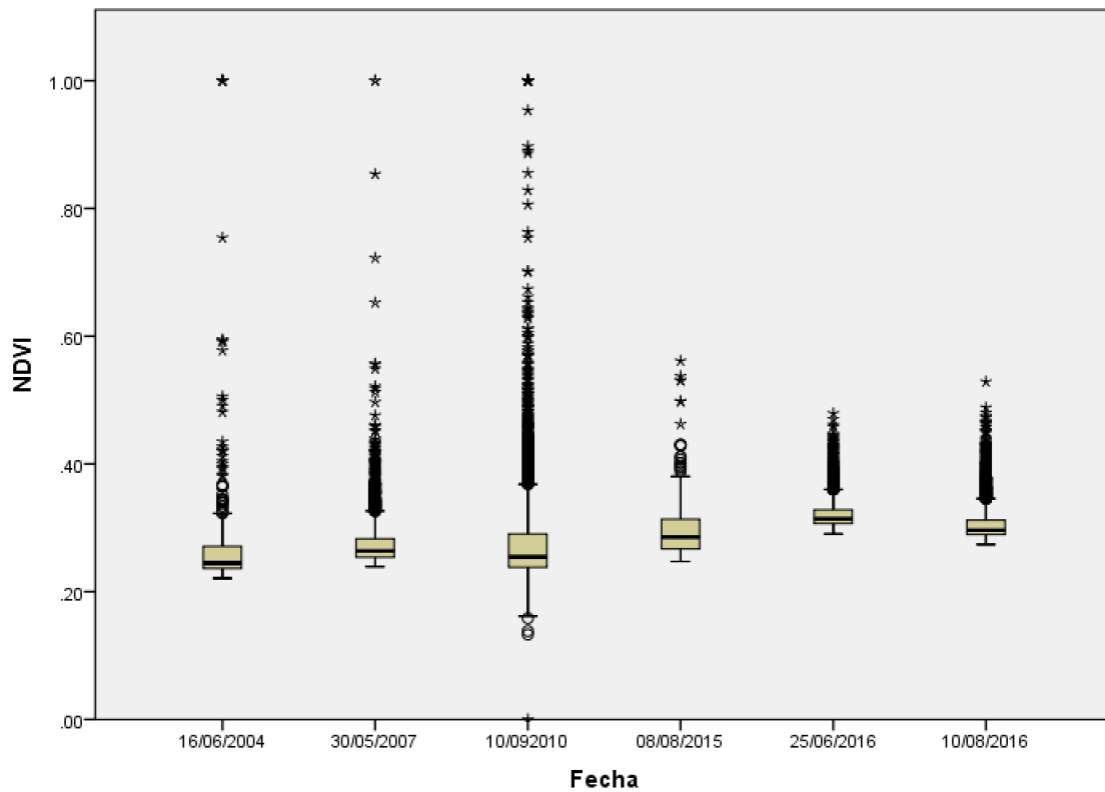


Figure 23

Distribution des valeurs NDVI (minimum, premier quartile, médiane, troisième quartile et maximum) en saison sèche pendant la période comprise entre 2002 et 2017 — images à haute résolution

Il n'y a pas non plus de changement significatif à signaler pendant la saison humide (figure 24). La médiane des valeurs en saison humide se maintient entre 0,40 et 0,60 environ. Les changements observés sont davantage liés à la date considérée et à la disponibilité de l'eau. Pour l'année 2017, on observe des valeurs nettement supérieures à celles des autres dates, sans pour autant constituer un changement significatif dans la série temporelle.

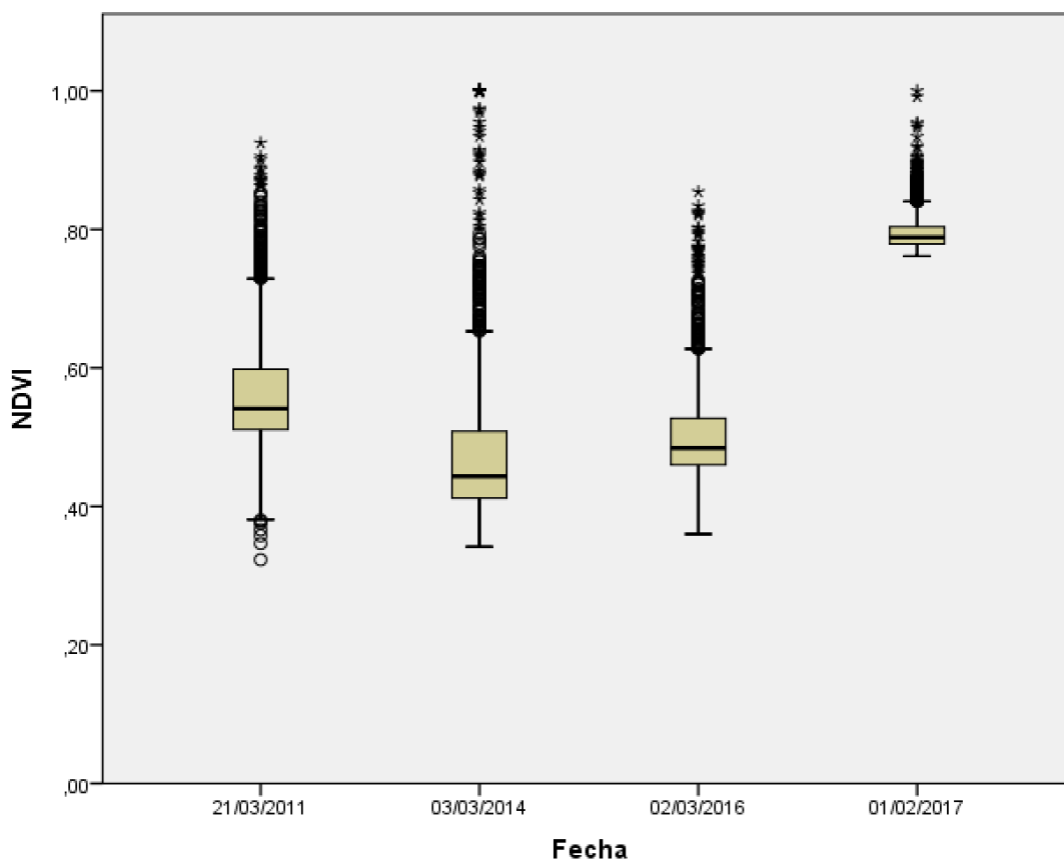


Figure 24

Distribution des valeurs NDVI (minimum, premier quartile, médiane, troisième quartile et maximum) en saison humide pendant la période comprise entre 2002 et 2017 — images à haute résolution

L'analyse des valeurs médianes, minimales et maximales correspondant à la série de données complète d'images à haute résolution montre que d'importants changements se sont produits pendant la période étudiée (figure 25 et tableau 4). On constate que certaines valeurs atteignent le maximum de la plage NDVI, même en saison sèche. Ces valeurs pourraient renvoyer à des superficies moindres de végétation qui disposent d'un accès permanent à l'eau. Les changements observés sont liés aux variations saisonnières, qui peuvent être importantes entre les valeurs maximales, minimales et médianes d'une même date et entre différentes années et saisons.

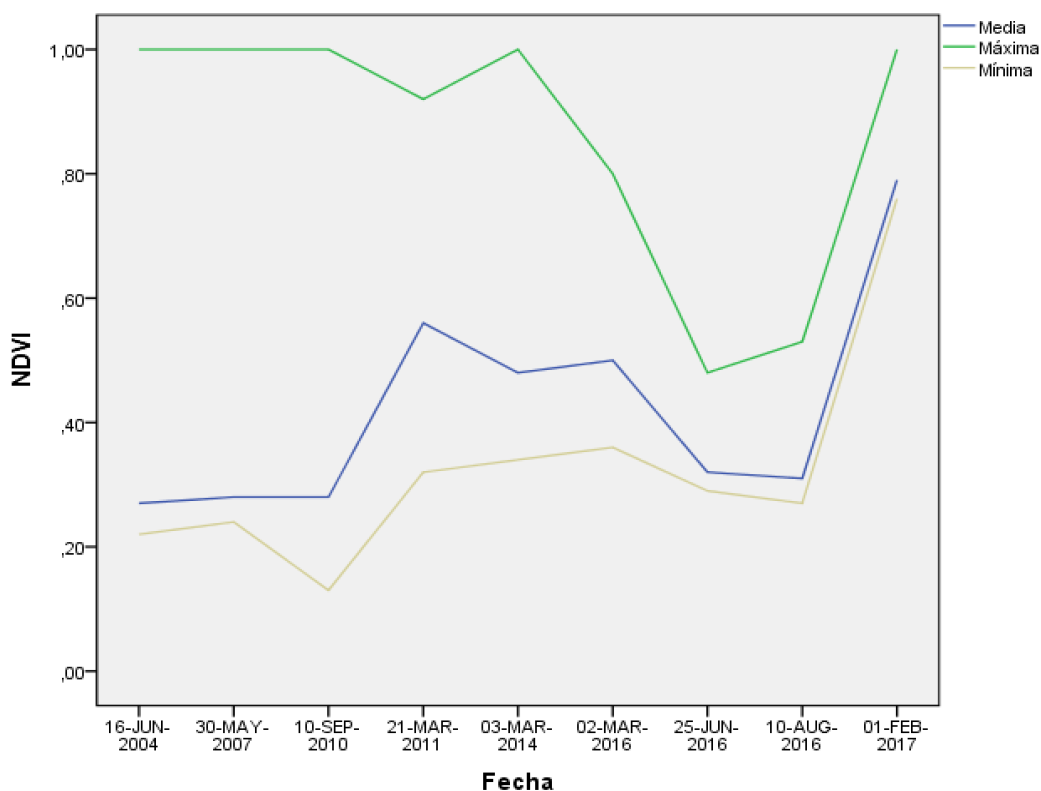


Figure 25
Distribution des valeurs NDVI minimales, médianes et maximales pendant la période comprise entre 2002 et 2017 — images à haute résolution

6.2.3. Analyse de sensibilité

On estime que 50 % et 36 % (4 et 2,80 hectares environ) de la superficie totale des zones humides d'altitude se situent dans les niveaux élevés et moyens de sensibilité, tandis que la superficie restante, 22 % (1,79 hectare environ), est classée dans les niveaux moyens et faibles de sensibilité (figure 26).

De même, on estime que la végétation qui se maintient aux niveaux de sensibilité faibles est, pour la plus grande part, tributaire de sources d'eau intarissables, telles que des trous d'eau et sources, des lacs ou encore des canaux.

7. DISCUSSION

Bien qu'aucune tendance à long terme ne se dégage des variations de la superficie des zones humides d'altitude dans les différentes périodes étudiées, d'importants changements ou fluctuations intersaisonniers et interannuels ont été constatés dans la superficie et l'activité de la végétation. Les variations de l'activité ou de la «verdure» de la végétation apparaissent clairement dans une image satellite, sans qu'il faille appliquer différentes combinaisons de bandes spectrales pour mettre en évidence la végétation (annexe 4).

Il est estimé que la superficie totale des zones humides d'altitude pendant la période comprise entre 1975 et 2000 (images Landsat) oscille entre 8,01 et 6,21 hectares en saison humide, et entre 6,75 et 2,16 hectares en saison sèche, la variabilité intersaisonnaire atteignant jusqu'à environ 50 %, contre quelque 28 % pour la variabilité interannuelle (tableau 3).

S'agissant de la période comprise entre 2002 et 2017 (images à haute résolution), la superficie totale des zones humides fluctue entre 5,88 et 3,58 hectares en saison humide, et entre 3,65 et 1,92 hectares en saison sèche, la variabilité intersaisonnière atteignant jusqu'à 60 % environ, contre 22 % environ pour la variabilité interannuelle (tableau 3). Ces variations, quoique importantes, se sont maintenues dans la même plage, ce qui laisse supposer qu'il n'y a pas de différences dans la superficie à long terme.

Les résultats relatifs à la superficie sont, en moyenne, proches de ceux estimés par GPS dans les travaux de Claros (2005 ; 214 et SERGEOMIN, 2003). Toutefois, on observe que, à certaines dates, la superficie est inférieure ou supérieure, selon la saison, et l'écart pourrait être de ± 1 hectare dans le cas des images à haute résolution et de $\pm 1,89$ hectare environ pour les images Landsat. Il est plus courant d'observer une quantification de la superficie inférieure à celle estimée par GPS dans les images à haute résolution, tandis que l'inverse se produit avec les images Landsat. Ces différences pourraient être liées à la date de l'année et au type de végétation des zones humides d'altitude considérés dans le calcul de superficie par GPS.

Néanmoins, malgré les différences de résolution spatiale, on observe les mêmes résultats concernant le comportement dans les deux périodes étudiées. Les différences de résolution transparaissent dans le fait que la superficie estimée est supérieure dans le cas des images Landsat (moindre résolution spatiale), par rapport à une image à haute résolution, ces différences pouvant atteindre jusqu'à 40 % environ de la superficie estimée au moyen des images à haute résolution.

Par ailleurs, la tendance qui se dégage des variations saisonnières pendant la période comprise entre 1975 et 2000 traduit une augmentation de la superficie sèche, laquelle est associée à la contraction de la superficie observée en saison humide. L'inverse se vérifie, certes dans une moindre mesure, pendant la période comprise entre 2000 et 2017 ; la superficie se contracte en saison sèche, puis augmente en saison humide. La stabilité de la superficie observée durant la série temporelle complète est liée aux échanges de superficies qui interviennent à titre intersaisonnier : la superficie classée comme zone humide d'altitude active en saison humide ne le sera que partiellement en saison sèche.

Ces échanges de superficies entre saisons se manifestent sous forme de différences dans la plage de valeurs NDVI représentant l'activité ou la «verdure» de la végétation. L'activité est supérieure en saison humide, pour laquelle les valeurs NDVI sont en moyenne plus élevées sur une superficie plus grande, tandis que l'activité faiblit en saison sèche, ce qui réduit la superficie classée comme zone humide d'altitude. Pendant cette saison, la végétation affiche des valeurs NDVI proches de celles de la végétation avoisinante, dont elle ne se distingue plus clairement. Les changements de superficie sont directement liés à l'activité de la végétation en saison sèche et humide.

A cet égard, aucune tendance ne transparaît dans les variations des valeurs NDVI, quelle que soit la saison considérée. Les valeurs NDVI en saison sèche et humide pendant les deux périodes étudiées se sont maintenues dans les mêmes plages, les différences relevées étant davantage liées à la date observée et à la disponibilité de l'eau. Si l'on associe ce résultat aux tendances relatives aux variations de superficie enregistrées au cours des deux saisons, on pourrait confirmer que ces variations sont dues à des changements relevés dans la santé des zones humides d'altitude qui ne se traduisent pas par la contraction de leur superficie [mais par un échange saisonnier], la superficie tendant à augmenter en saison sèche pendant la période 1975-2000, et à diminuer pendant la période 2002-2017.

Par ailleurs, la comparaison des zones humides d'altitude nord et sud au cours des différentes périodes étudiées révèle que la zone humide nord est plus stable, à savoir que sa superficie est mieux définie que celle de la zone humide sud ou des autres zones humides recensées dans la région.

Il convient de noter que, malgré les différences de résolution, on observe en général des similitudes dans le comportement des zones humides au cours des deux périodes étudiées. Les

valeurs NDVI obtenues pour les deux types de résolution et capteurs sont en moyenne moindres pour les images à haute résolution. L'intervalle des variations, en particulier pour ce qui concerne les pixels extérieurs, est bien plus large, ce qui s'explique par une capacité accrue à détecter différents changements dans une même zone. Cependant, le comportement observé, aussi bien en termes de superficies que de valeurs NDVI, affiche la même stabilité, sans changements significatifs à signaler.

S'agissant de la sensibilité des zones humides d'altitude, une importante part de la superficie voit son activité réduite en saison sèche. Cela signifie qu'une superficie accrue est exposée aux fluctuations de la disponibilité de l'eau, que ce soit en raison des changements de gestion des zones humides ou d'une baisse de la quantité ou de la durée des précipitations saisonnières sous l'effet du changement climatique. Dans le cas des sources du Silala, la superficie des zones humides se limite aux zones stables (faible sensibilité), qui continuent de recevoir des apports d'eaux souterraines, tandis que les superficies qui connaissent des changements importants (sensibilité élevée) dépendent presque exclusivement des précipitations saisonnières et peuvent être le théâtre de plusieurs stades de succession des espèces végétales, si bien qu'elles finissent par ne plus être considérées comme des zones humides d'altitude (*bofedales*) ou des zones humides (*humedales*) (figures 16 et 26). On peut considérer que ces dernières subissent l'incidence du drainage de l'eau en direction des chenaux. Il se peut que les superficies très sensibles aient été incluses à un moment donné dans le périmètre des zones humides d'altitude qui sont en permanence actives à l'état naturel, avant qu'elles ne soient modifiées par les ouvrages de collecte et de chenalisation mis en place pour transporter l'eau jusqu'en territoire chilien. De manière générale, cela pourrait représenter 70 à 80 % de la superficie totale cartographiée à long terme et considérée comme hautement ou moyennement sensible pendant les deux périodes étudiées, soit environ 5 hectares, sachant que 3 hectares de zone humide d'altitude sont touchés à différents degrés⁶. Ces pourcentages coïncident avec ceux estimés dans le cadre d'autres études (Claros, 2005 ; SERGEOMIN, 2003 ; Ramsar, 2017) qui portent sur l'incidence des canaux sur la végétation des zones humides d'altitude. Il convient de tenir compte du fait que ce calcul exclut les marais salins/zones humides d'altitude (environ 2,5 hectares) qui, selon les estimations, appartenaient à la zone humide sud à l'état naturel et qui ne présentent aucune activité (réponse à l'humidité disponible) aux dates étudiées.

Les zones humides d'altitude, parce qu'elles se forment dans des climats arides où les ressources en eau sont limitées, peuvent être extrêmement vulnérables face à l'évolution du climat et de l'occupation des sols, qui peut perturber l'hydrologie du système humide et réduire l'accumulation de tourbe (Chimner et Cooper, 2003 ; Cooper *et al.*, 2015, cité dans Hribljan *et al.*, 2015). L'un des effets causés par la réduction de la profondeur de la nappe phréatique, qui reste basse durant plusieurs mois dans les zones humides d'altitude en Bolivie (y compris pendant la saison des pluies), est que les plantes se trouvent coupées de leur source d'eau souterraine, ce qui engendre une augmentation de la mortalité végétale (Cooper *et al.*, 2015).

En outre, certains changements ont été signalés dans la production de biomasse dans les Andes méridionales au Chili, lesquels s'expliquent par un raccourcissement de la saison de croissance, qui est directement lié aux épisodes El Niño et La Niña, pendant lesquels les périodes prolongées de réduction de la disponibilité de l'eau contribuent à la dégradation de la végétation. Si l'on est en présence de processus d'autorégulation du cycle hydrologique, ceux-ci contribueront aussi à la dégradation des zones humides d'altitude, puisqu'ils limiteront leur extension et accéléreront la détérioration de ces écosystèmes délicats (Squeo *et al.*, 2006).

Par ailleurs, l'indice NDVI attribue des valeurs basses ou négatives aux superficies inondées ou saturées, ce qui pourrait accroître l'incertitude entourant les résultats.

⁶ Chiffre approximatif tiré de la carte de sensibilité — images à haute résolution.

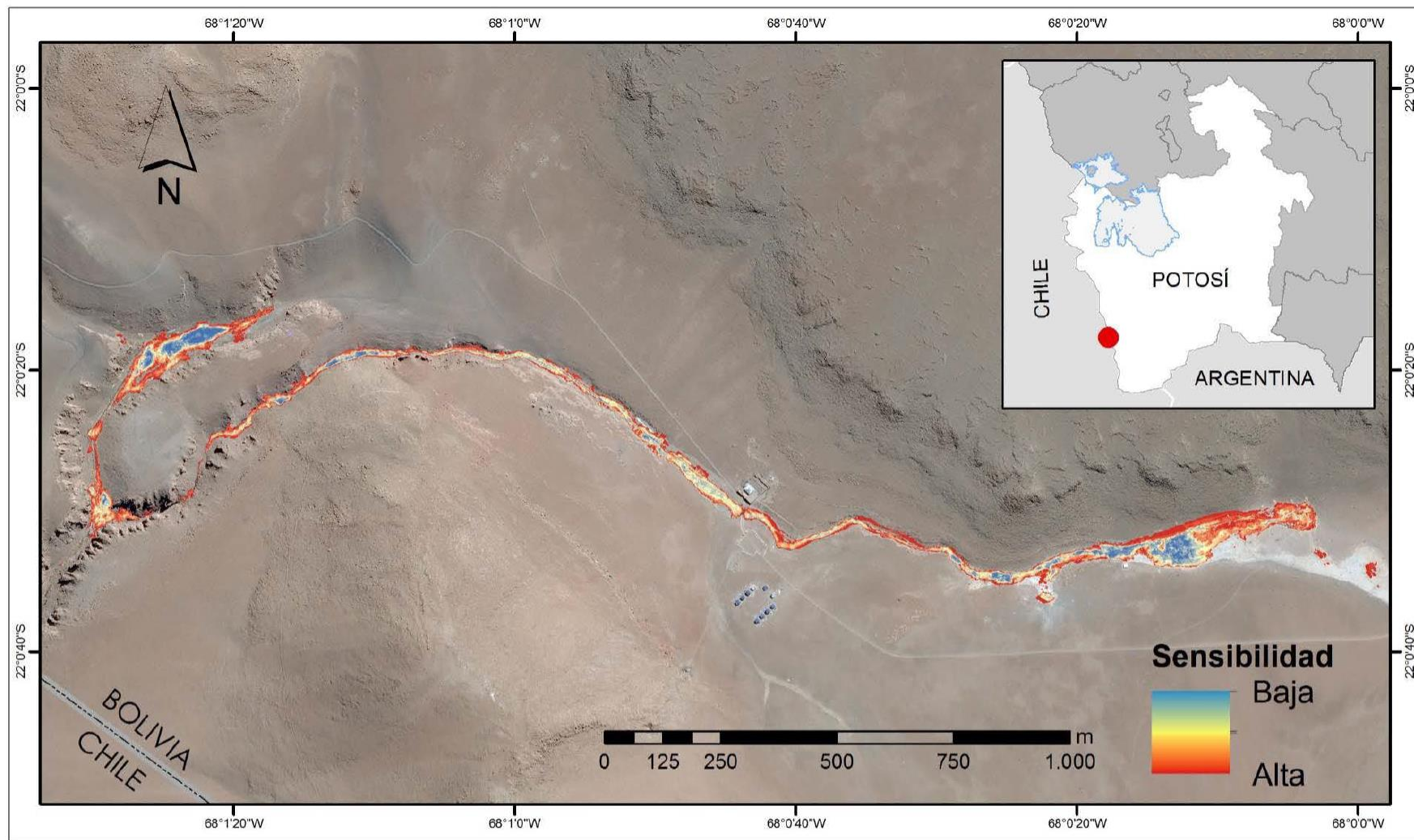


Figure 26

Carte de sensibilité des zones humides d'altitude des sources du Silala. Période comprise entre 2002 et 2017 — images à haute résolution

8. CONCLUSIONS

L'objectif de la présente étude était de réaliser une analyse multi-temporelle des zones humides d'altitude des sources du Silala afin d'évaluer les changements intervenus dans leur superficie et dans la végétation qu'elles abritent. Deux périodes ont été analysées, en tenant compte de l'alternance entre saison humide et saison sèche : la période comprise entre 1975 et 2000 a été étudiée à l'aide d'images Landsat à résolution moyenne, et la période comprise entre 2002 et 2017 a été analysée au moyen d'images à haute résolution. Pour délimiter la superficie des zones humides d'altitude, l'indice NDVI a été utilisé, de même que la classification non supervisée par seuils naturels de Jenks. Les résultats ainsi obtenus ont permis d'analyser les changements dans le comportement de la végétation, représentée dans la fourchette -1 à +1 des valeurs NDVI, qui sont utilisées comme indicateur de l'activité ou de la santé de la végétation.

Par conséquent, il a été estimé pour la période 1975–2000 (images Landsat) que la superficie totale des zones humides d'altitude oscillait entre 8,01 et 6,21 hectares en saison humide, et entre 6,75 et 2,16 hectares en saison sèche, la variabilité intersaisonnière atteignant jusqu'à 50 % environ, contre 28 % environ pour la variabilité interannuelle. S'agissant de la période comprise entre 2002 et 2017 (images à haute résolution), la superficie totale des zones humides fluctue entre 5,88 et 3,58 hectares en saison humide, et entre 3,65 et 1,92 hectares en saison sèche, la variabilité intersaisonnière atteignant jusqu'à 60 % environ, contre 22 % environ pour la variabilité interannuelle.

Aucun changement significatif à long terme n'a été constaté dans la superficie des zones humides d'altitude pendant les deux périodes étudiées. Tant les images Landsat que les images à haute résolution montrent que, en dépit d'une variabilité saisonnière considérable, on ne note aucune tendance à la contraction de la superficie totale des zones humides d'altitude.

L'importante variabilité saisonnière observée témoigne de la forte dépendance des zones humides des sources du Silala à l'égard des précipitations saisonnières, qui constituent leur principal apport d'eau en l'absence d'apports souterrains suffisants, lesquels sont habituellement observés à l'état naturel dans ce type de zone humide. En ce sens, une grande partie de la superficie cartographiée pourrait bien être exclue de la catégorie «zone humide d'altitude», la zone touchée étant estimée à 5 hectares, tandis que 3 hectares de zone humide d'altitude se trouvent à différents stades de dégradation. De plus, la forte dépendance des zones humides à l'égard de la disponibilité de l'eau saisonnière les rend sensibles aux changements causés par différents facteurs, tels que le changement climatique.

Les différences de résolution spatiale se manifestent dans la quantification de la zone définie comme zone humide d'altitude, l'extension étant, comme on pouvait s'y attendre, inférieure avec les images dont la résolution est moindre. Néanmoins, la variabilité de la superficie est la même, bien qu'elle représente deux périodes différentes. Par ailleurs, le comportement qui se dégage des variations de la «verdure» ou de l'activité de la végétation est similaire pour les deux périodes, alors même que les plages de valeurs sont moins étendues et plus variables (nombre supérieur de valeurs aberrantes) dans les images à haute résolution.

Les deux périodes étudiées sont relativement courtes, ce qui ne permet pas de dégager des tendances des changements observés, ces derniers devant être évalués au moyen d'une analyse de signification statistique. De surcroît, les zones humides d'altitude des sources du Silala se trouvent dans un état aménagé depuis le début du XX^e siècle, si bien qu'il est impossible d'analyser une période à l'état naturel, sans aménagements, à partir d'images satellite.

En conclusion, les zones humides d'altitude ont atteint une stabilité hydrologique qui dépend presque exclusivement de la disponibilité de l'eau issue des pluies saisonnières. En raison du caractère saisonnier de la disponibilité de l'eau, on observe d'importants changements dans la

superficie des zones humides d'altitude, qui sont à mettre en relation avec la part élevée de la superficie totale présentant une sensibilité haute et moyenne aux variations de la disponibilité de l'eau, que ces changements soient dus à des modifications dans la gestion des zones humides ou à la présence de périodes sèches plus longues, sous l'effet du changement climatique.

9. BIBLIOGRAPHIE

9. Referencias bibliográficas

Alzérreca, H., Prieto, G., Laura, J., et al. (2001) **Características y distribución de los bofedales en el Ambito Boliviano. Informe de Consultoría. Asociación Integral de Ganaderos En Camélidos de Los Andes Altos (AIGACAA)**

Anchang, J.Y., Ananga, E.O. and Pu, R. (2016) **An efficient unsupervised index based approach for mapping urban vegetation from IKONOS imagery.** International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 50: 211–220

Beck, S., Domic, A., García, C., et al. (2010) **El Parque Nacional Sajama y sus plantas.** Herbario Nacional de Bolivia, La Paz

Bernstein, L.S., Jin, X., Gregor, B., et al. (2012) **Quick atmospheric correction code: algorithm description and recent upgrades.** Optical engineering, 51 (11): 111711–111719

Bradley, C. and Salyer, K. (1999) **A Method for Deriving Phenological Metrics...** [online]. Available from: <http://geochange.er.usgs.gov/sw/impacts/biology/Phenological-CO/>

Buttolph, L.P. (1998) **Rangeland dynamics and pastoral development in the high Andes: The camelid herders of Cosapa, Bolivia.**

Chuvieco, E. (1996) **Fundamentos de Teledetección.** 3ª edición revisada. Ediciones RIALP, Madrid. España

Claros, F. (2005) **Recopilación de Información Técnica sobre Recursos Hídricos del Silala Tomo I: Parte I a Parte IV. Editado UDAPEX.**

Cooper, D.J., Kaczynski, K., Slayback, D., et al. (2015) **Growth and Organic Carbon Production in Peatlands Dominated by, Bolivia, South America.** Arctic, Antarctic, and Alpine Research [online], 47 (3): 505–510. Available from: <http://www.bioone.org/doi/abs/10.1657/AAAR0014-060>

Coronel, J.S. (2010) **Bofedales de la cuenca del río Mauri: vegetación y características físico - químicas.**

Dewi, E.K. and Trisakti, B. (2017) **COMPARING ATMOSPHERIC CORRECTION METHODS FOR LANDSAT OLI DATA.** International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences (IJReSES), 13 (2): 105–120

DHI (2017) **Fase II, Producto N° 2. Informe Provisional N° 1 - Flujos Superficiales.**

Digital Globe (2017) **Absolute Radiometric Calibration: 2016v0**

Earle, L.R., Warner, B.G. and Aravena, R. (2003) **Rapid development of an unusual peat-accumulating ecosystem in the Chilean Altiplano.,** 59: 2–11

ENVI (2013) **Vegetation Analysis: Using Vegetation Indices in ENVI.** Exelis VIS [online]. Available from: <http://www.exelisvis.com/Learn/WhitepapersDetail/TabId/802/ArtMID/2627/ArticleID/13742/Vegetation-Analysis-Using-Vegetation-Indices-in-ENVI.aspx>

ENVI (2017) **Change Detection Analysis** [online]. Available from: <https://www.harrisgeospatial.com/docs/ChangeDetectionAnalysis.html>

ESRI (2017) **ArcGis Help** [online]. Available from: <http://desktop.arcgis.com>

FAN (2003) **Ecoregiones de Bolivia**

Fonkén, M.S.M. (2014) **An introduction to the bofedales of the Peruvian High Andes**. Mires and Peat, 15 (DECEMBER 2014): 1–13

Frolking, S., Talbot, J., Jones, M.C., et al. (2011) **Peatlands in the Earth's 21st century climate system**. Environmental Reviews, 19 (NA): 371–396

Gavazzi, G.M., Madricardo, F., Janowski, L., et al. (2016) **Evaluation of seabed mapping methods for fine-scale classification of extremely shallow benthic habitats—application to the Venice Lagoon, Italy**. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 170: 45–60

Hartman, B.D., Bookhagen, B. and Chadwick, O.A. (2016) **The effects of check dams and other erosion control structures on the restoration of Andean bofedal ecosystems**. Restoration Ecology, 24 (6): 761–772

Hribljan, J.A., Cooper, D.J., Sueltenfuss, J., et al. (2015) **Carbon storage and long-term rate of accumulation in high-altitude Andean peatlands of Bolivia**. Mires and Peat [online], 15 (12): 1–14. Available from: <http://www.mires-and-peat.net/>,

Jenks, G.F. (1967) **The data model concept in statistical mapping**. International yearbook of cartography, 7 (1): 186–190

Ji, W. (2007) **Wetland and water resource modeling and assessment: a watershed perspective**. CRC Press

klein Gebbinck, M.S., Bibliotheek, C.K. and Klein, M.S. (1998) **Decomposition of mixed pixels in remote sensing images to improve the area estimation of agricultural fields**.

Mandanici, E., Franci, F., Bitelli, G., et al. (2015) **“Comparison between empirical and physically based models of atmospheric correction.”** In Third International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment. 2015. International Society for Optics and Photonics. p. 95350E–95350E

Mitsch, W. (1993) **Ecological engineering a cooperative role with the planetary life-support system**. Environmental Science & Technology, 27 (3): 438–445

Morsy, S., Shaker, A., El-Rabbany, A., et al. (2016) **AIRBORNE MULTISPECTRAL LIDAR DATA FOR LAND-COVER CLASSIFICATION AND LAND/WATER MAPPING USING DIFFERENT SPECTRAL INDEXES**. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 3 (3)

Navarro, G., Ferreira, W. and Chambí, J. (2007) **Mapeo, clasificación y descripción de la vegetación de Bolivia. Escala 1: 250 000**. 2007th ed. Rumbol

Navarro, G. and Maldonado, M. (2002) **Geografía ecológica de Bolivia: Vegetación y ambientes acuáticos** [online]. Centro de Ecología Simón I. Patiño, Departamento de Difusión. Available from: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=AGRISUM.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=000241>

Otto, M., Scherer, D. and Richters, J. (2011) **Hydrological differentiation and spatial distribution of high altitude wetlands in a semi-arid Andean region derived from satellite data**. Hydrology and Earth System Sciences, 15 (5): 1713–1727

Ramsar (2017) **Misión Ramsar de Asesoramiento N° 84 - Sitio Ramsar Los Lipez, Bolivia**

Ramsar, S. de la C. de (2006) **Manual de la Convención de Ramsar**, 4a. edición. Secretaría de la Convención de Ramsar [online], 4 (4): 93–99. Available from:
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10256016.2013.831089>
http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:No+Title#0%5Cnhttp://www.ramsar.org/pdf/lib/lib_manual2006s.pdf%5Cnhttp://www.tellusb.net/index.php/tellusb/article/view/16628

Ruthsatz, B. (2012) **Vegetation and ecology of the high Andean peatlands of Bolivia**.
Phytocoenologia, 42 (3–4): 133–179

SERGEOMIN (2003) **ESTUDIO DE LA GEOLOGÍA, HIDDROLOGÍA, HIDROGEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE DEL ÁREA DE LOS MANANTIALES DE SILALA**

Squeo, F.A., Warner, B.G., Aravena, R., et al. (2006) **Bofedales: High altitude peatlands of the central Andes**. *Revista Chilena de Historia Natural*, 79 (2): 245–255

Tobler, W. (1987) **“Measuring spatial resolution.”** In *Proceedings, Land Resources Information Systems Conference*. 1987. pp. 12–16

USGS (2004) **Remote Sensing Phenology**. [online]. Available from:
<http://phenology.cr.usgs.gov/overview.php>

Weier, J. and Herring, D. (2000) **Measuring Vegetation (NDVI & EVI)** [online]. Available from:
<https://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/>

ANNEXE 99

99.1. LETTRE DU 5 NOVEMBRE 2018 ADRESSÉE À L'AGENT DE L'ÉTAT PLURINATIONAL DE BOLIVIE PAR L'AGENT DE LA RÉPUBLIQUE DU CHILI

99.2. LETTRE DU 22 NOVEMBRE 2018 ADRESSÉE À L'AGENT DE LA RÉPUBLIQUE DU CHILI PAR L'AGENT DE L'ÉTAT PLURINATIONAL DE BOLIVIE

99.3. LETTRE DU 30 NOVEMBRE 2018 ADRESSÉE À L'AGENT DE L'ÉTAT PLURINATIONAL DE BOLIVIE PAR L'AGENT DE LA RÉPUBLIQUE DU CHILI

99.4. LETTRE DU 11 DÉCEMBRE 2018 ADRESSÉE À L'AGENT DE LA RÉPUBLIQUE DU CHILI PAR L'AGENT DE L'ÉTAT PLURINATIONAL DE BOLIVIE

99.5. LETTRE DU 21 DÉCEMBRE 2018 ADRESSÉE À L'AGENT DE L'ÉTAT PLURINATIONAL DE BOLIVIE PAR L'AGENT DE LA RÉPUBLIQUE DU CHILI

99.6. LETTRE DU 11 JANVIER 2019 ADRESSÉE À L'AGENT DE LA RÉPUBLIQUE DU CHILI PAR L'AGENT DE L'ÉTAT PLURINATIONAL DE BOLIVIE

99.7. LETTRE DU 7 FÉVRIER 2019 ADRESSÉE À L'AGENT DE LA RÉPUBLIQUE DU CHILI PAR L'AGENT DE L'ÉTAT PLURINATIONAL DE BOLIVIE

[Traduction du Greffe]

**Lettre en date du 5 novembre 2018 adressée à l'agent de l'Etat plurinational de Bolivie
par l'agent de la République du Chili**

Me référant à l'affaire relative au *Différend concernant le statut et l'utilisation des eaux du Silala (Chili c. Bolivie)*, j'ai l'honneur, au nom du Gouvernement de la République du Chili, de vous rappeler que celle-ci a annexé à son mémoire un CD-ROM contenant, à l'intention de votre gouvernement, l'ensemble des données et informations qui y étaient invoquées ou auxquelles il y était, d'une autre manière, fait référence.

A cet égard, j'ai l'honneur de demander au Gouvernement de l'Etat plurinational de Bolivie de bien vouloir en faire autant, en mettant à la disposition de mon gouvernement, dans un délai proposé de deux semaines, les données numériques utilisées par le Danish Hydraulic Institute (DHI) pour établir la modélisation conceptuelle et numérique sous-tendant le rapport et les conclusions contenus à l'annexe 17 du contre-mémoire de la Bolivie en date du 3 septembre 2018.

J'ai également l'honneur de demander que soient communiqués certains documents mentionnés aux annexes 17 et 18 dudit contre-mémoire, qui ne sont pas accessibles au public et n'ont pas été présentés par la Bolivie avec ses écritures. Mon gouvernement vous serait obligé de lui fournir, dans ce même délai suggéré de deux semaines, le texte original de ces documents ainsi que, lorsqu'elle existe, leur traduction anglaise.

Veillez trouver ci-joint la liste des données numériques et documents sollicités.

Veillez agréer, etc.

**Lettre en date du 22 novembre 2018 adressée à l'agent de la République du Chili
par l'agent de l'Etat plurinational de Bolivie**

J'ai l'honneur de me référer à votre lettre en date du 5 novembre 2018, transmise à la Bolivie par le greffier de la Cour internationale de Justice en l'affaire relative au *Différend concernant le statut et l'utilisation des eaux du Silala (Chili c. Bolivie)*, par laquelle vous demandez communication de données numériques et de documents mentionnés ou invoqués dans les annexes 17 et 18 du contre-mémoire de la Bolivie.

Je vous prie, à cet égard, de bien vouloir trouver ci-joint une clé USB contenant les documents sollicités, à l'exception des éléments suivants :

- données numériques utilisées par le Danish Hydraulic Institute (DHI) pour établir la modélisation conceptuelle et numérique contenue dans l'annexe 17 (demande actuellement à l'étude au DHI) ;
- documents mentionnés aux paragraphes 6.1, 6.2, 6.3 et 6.4 de l'annexe D du DHI (demande actuellement à l'étude au DHI) ;
- rapport du ministère des mines et de la métallurgie de Bolivie, «Estudio socio-económico integral del Altiplano Sur», cité à la page 13 du rapport Ramsar (demande actuellement à l'étude au ministère).

Veillez agréer, etc.

**Lettre en date du 30 novembre 2018 adressée à l'agent de l'Etat plurinational de Bolivie
par l'agent de la République du Chili**

Au nom du Gouvernement de la République du Chili, et me référant à l'affaire relative au *Différend concernant le statut et l'utilisation des eaux du Silala (Chili c. Bolivie)*, j'ai l'honneur d'accuser réception de votre lettre en date du 22 novembre 2018, transmise au Chili par le Greffe de la Cour internationale de Justice, ainsi que d'une clé USB contenant certains des documents mentionnés ou invoqués par la Bolivie dans les annexes 17 et 18 de son contre-mémoire, que le Chili avait, par lettre en date du 5 novembre 2018, demandé à obtenir.

S'agissant des documents communiqués sous le couvert de votre lettre susmentionnée, le Gouvernement du Chili note que les données numériques qui ont été employées par le Danish Hydraulic Institute (DHI) aux fins d'établir les modèles théoriques et numériques présentés à l'annexe 17 — et avaient été demandées — n'ont pas été fournies et que leur communication est «actuellement à l'étude au DHI», ainsi que l'a indiqué votre gouvernement dans ladite lettre. Or, ces données sont indispensables pour permettre aux experts du Chili de procéder à un examen adéquat du rapport du DHI, lequel devrait facilement y avoir accès sous forme numérique.

Le Gouvernement du Chili relève par ailleurs que l'étude SERGEOMIN 2001 (document 1.3) n'a pas été fournie, au motif qu'il s'agirait du même document que l'étude SERGEOMIN 2003 (document 1.4). Il fait toutefois observer que le rapport final du DHI les cite et mentionne comme deux rapports distincts. Il en va de même du rapport SERGEOTECMIN 2002 (document 8.4), présenté lui aussi comme étant inclus dans l'étude SERGEOMIN 2003 (document 1.4).

Le Gouvernement du Chili rappelle au Gouvernement de la Bolivie que, dans un communiqué de presse officiel bolivien en date du 26 février 2002 (annexe 49 du mémoire du Chili), l'étude SERGEOMIN 2001 était présentée comme un document final que le SERGEOMIN avait remis au ministère bolivien des affaires étrangères en octobre 2001. Dans ce même communiqué de presse, le Gouvernement de la Bolivie insistait sur le fait que les études SERGEOMIN 2001 mentionnées relevaient de la responsabilité exclusive du SERGEOMIN et «ne reflétaient pas le point de vue du ministère des affaires étrangères et du culte ni du gouvernement». Le Gouvernement du Chili observe en outre que l'étude SERGEOMIN 2003 (présentée en tant que document 1.4) est une version modifiée («Edition finale, juin 2003») du rapport initial SERGEOMIN 2001 et qu'il ne saurait, partant, s'agir du même document. Se fondant sur le principe de la bonne foi en matière procédurale, le Gouvernement du Chili réitère sa demande tendant à ce que lui soit communiqué le rapport SERGEOMIN 2001 dans son édition originale, ainsi que le rapport SERGEOTECMIN 2002, également dans son édition originale.

De plus, ainsi que cela est indiqué dans le tableau joint en annexe à la présente lettre, le Gouvernement du Chili a relevé plusieurs autres divergences entre les documents demandés et ceux qui ont été soumis et il saurait gré au Gouvernement de la Bolivie de bien vouloir clarifier la situation de façon définitive.

Le Gouvernement du Chili se permet par ailleurs de réitérer sa demande tendant à ce que lui soit communiquée la traduction anglaise des documents soumis telle qu'elle a été fournie au DHI, et ce, pour des raisons d'économie procédurale et afin de s'assurer que les experts des deux Etats aient accès aux mêmes traductions.

Enfin, le Gouvernement du Chili observe qu'il s'est écoulé près d'un mois depuis qu'il a sollicité ces documents et données numériques et que, entre-temps, la Cour a fixé au 15 février 2019 la date limite pour le dépôt de sa réplique. Etant donné la proximité de cette date et l'importance des

données numériques, documents, traductions et clarifications demandés, mon gouvernement suggère que la Bolivie lui communique tous ces éléments dans les plus brefs délais et, au plus tard, dans un délai de sept jours à compter de la réception de la présente lettre.

Veillez agréer, etc.

**Lettre en date du 11 décembre 2018 adressée à l'agent de la République du Chili
par l'agent de l'Etat plurinational de Bolivie**

J'ai l'honneur d'accuser réception de votre lettre datée du 30 novembre 2018, transmise à la Bolivie par le greffier de la Cour internationale de Justice dans le cadre de l'affaire relative au *Différend concernant le statut et l'utilisation des eaux du Silala (Chili c. Bolivie)*, par laquelle vous accusez réception de notre lettre du 22 novembre 2018 et faites une série de commentaires et d'observations au sujet de la clé USB remise par la Bolivie et contenant des documents relatifs aux annexes 17 et 18 de son contre-mémoire.

C'est dans ce contexte que je réponds par la présente et de la manière suivante à la lettre susvisée :

- 1) En ce qui concerne la demande portant sur les données numériques utilisées par le Danish Hydraulic Institute (DHI) aux fins d'établir ses modèles théoriques et numériques et sur les rapports préliminaires, je tiens à vous informer que, en réponse à la demande de la Bolivie, M. Roar Askaer Jensen, responsable de projet au DHI, nous a fait savoir (sa lettre est jointe à la présente en tant qu'annexe I) que le rapport final soumis par la Bolivie reprend l'ensemble des données numériques et du contenu des rapports préliminaires établis dans le cadre de l'étude menée par l'institut.
- 2) S'agissant des précisions sollicitées en ce qui concerne d'autres études soumises par la Bolivie, je vous prie de noter qu'il y est dûment répondu dans le tableau joint à cette lettre en tant qu'annexe II.
- 3) En ce qui concerne l'étude SERGEOMIN 2001, je tiens à vous informer que son contenu ne diffère pas de celui de la version finale de l'étude SERGEOMIN 2003, déjà transmise avec notre lettre du 22 novembre 2018. Je joins néanmoins à la présente, sous format électronique, l'étude SERGEOMIN 2001, dans sa seule version disponible. Je souhaite également préciser que le rapport intitulé «SERGEOTECCMIN 2005» est le même que le rapport «SERGEOTECCMIN 2006», cité à l'annexe E du rapport final de DHI ; il ne s'agit donc pas d'un document différent. Enfin, ces études ainsi que les traductions anglaises d'autres études qui ont été demandées ont été enregistrées sur la clé USB en tant qu'annexe III.

Veillez agréer, etc.

**Lettre en date du 3 décembre 2018 adressée à l'agent de l'Etat plurinational de Bolivie
par le responsable de projet au Danish Hydraulic Institute**

Il a été demandé au Danish Hydraulic Institute (DHI) de communiquer les rapports préliminaires et les données qui ont servi à l'étude du débit du bassin hydrographique des eaux du Silala consistant à quantifier l'écoulement superficiel et souterrain dans les conditions actuelles et dans les conditions naturelles, c'est-à-dire en l'absence de canaux, menée par le DHI et DIREMAR durant l'année 2017 et le début de 2018.

Les rapports préliminaires ne seront pas communiqués. Il s'agit de documents internes qui reflètent les travaux en cours et qui sont basés sur des informations et des analyses plus partielles que le rapport final. Ce dernier compile et résume les résultats de l'étude complète.

Les données utilisées dans les analyses et les modèles du DHI sont exposées et mentionnées dans le rapport final et ses annexes.

Veillez agréer, etc.

**Lettre en date du 21 décembre 2018 adressée à l'agent de l'Etat plurinational de Bolivie
par l'agent de la République du Chili**

Au nom du Gouvernement de la République du Chili, et me référant à l'affaire relative au *Différend concernant le statut et l'utilisation des eaux du Silala (Chili c. Bolivie)*, j'ai l'honneur d'accuser réception de votre lettre datée du 11 décembre 2018, transmise au Chili par le greffier de la Cour internationale de Justice, à laquelle étaient jointes une clé USB contenant (en tant qu'annexe III) certains des documents mentionnés ou invoqués dans les annexes 17 et 18 du contre-mémoire de la Bolivie dont le Chili avait sollicité la présentation, tout d'abord dans sa lettre du 5 novembre 2018 puis dans celle du 30 novembre 2018, avec les traductions anglaises demandées, ainsi que deux documents supplémentaires (annexes I et II).

S'agissant des données électroniques utilisées par le Danish Hydraulic Institute (DHI) pour sa modélisation conceptuelle et numérique figurant à l'annexe 17, des données dont le Chili a également demandé la présentation dans ses communications susmentionnées, le Gouvernement chilien note qu'elles n'ont pas été fournies et que, selon la lettre du 3 décembre 2018 de M. Roar Askaer Jensen, le responsable de projet au DHI, qui est jointe en tant qu'annexe I de votre lettre du 11 décembre 2018, elles sont intégralement reprises dans le rapport final du DHI que la Bolivie a produit.

Après consultation de son expert, M. Howard Wheeler, le Gouvernement chilien tient à faire savoir que, de l'avis dudit expert, les informations fournies dans le contre-mémoire de la Bolivie et dans ses annexes ne permettent de définir ni les modèles utilisés, ni le processus de modélisation suivi, et que le détail des résultats n'est pas non plus communiqué. En particulier, l'expert estime que, sans les données numériques de modélisation (sollicitées au point 1 de la demande tendant à obtenir communication de données numériques et de documents non accessibles au public, jointe par le Chili à sa lettre du 5 novembre 2018), le modèle conçu ne peut être pleinement compris ni soumis à une évaluation critique, de sorte que les résultats de la modélisation doivent être considérés comme un tissu de postulats sans fondement, faute d'éléments de preuve. Le texte intégral de la réponse de M. Wheeler est joint à la présente.

Le Gouvernement chilien prend également note du refus du DHI de communiquer ses rapports préliminaires, que ce dernier considère comme des documents internes reflétant des travaux en cours. Le Chili relève qu'il n'a sollicité que les rapports préliminaires (documents 6.1, 6.2, 6.3 et 6.4 dans sa demande) qui étaient expressément mentionnés à l'annexe F du rapport final du DHI et ne sont pas accessibles au public. Il prie la Bolivie de bien vouloir faire en sorte que ces documents soient soumis, conformément à sa demande.

Enfin, le Gouvernement chilien répète qu'il s'agit d'une demande urgente, notamment en ce qui concerne les informations de modélisation et les données numériques à l'appui, étant donné le peu de temps qui lui reste pour pouvoir déposer sa réplique le 15 février 2019.

Veillez agréer, etc.

Lettre en date du 19 décembre 2018 adressée à l'agent de la République du Chili
par M. Howard Wheeler

Je vous remercie de m'avoir fait tenir la lettre du 3 décembre 2018 de M. Roar Jensen, responsable de projet au Danish Hydraulic Institute (DHI), concernant la demande d'informations présentée à la Bolivie par le Chili. Cette demande visait notamment à obtenir des précisions sur la modélisation établie par le DHI, c'est-à-dire sur la configuration du modèle, les données d'entrée (y compris les conditions limites), les valeurs de paramétrage retenues et les données de sortie pour chacun des modèles utilisés par cet institut et mentionnés dans le contre-mémoire de la Bolivie de septembre 2018.

Je relève que les résultats obtenus par simulation à l'aide d'une série de modèles du DHI revêtent une importance cruciale pour l'argumentation de la Bolivie. Or, les informations fournies dans le contre-mémoire de celle-ci ne permettent de définir ni les modèles utilisés ni le processus de modélisation suivi, et le détail des résultats n'est pas non plus communiqué.

Les résultats de tout modèle hydrologique dépendent principalement des hypothèses émises par les auteurs de la modélisation. Ces hypothèses concernent entre autres :

- i) les éléments précis retenus pour la géométrie du système (notamment la représentation des chenaux et drains, leurs interactions avec les écoulements superficiels et souterrains, ainsi que la stratigraphie du sous-sol, qui revêtent une importance cruciale en l'espèce) ;
- ii) les propriétés matérielles utilisées pour représenter les sols et aquifères, ainsi que leur répartition ; et
- iii) les conditions aux limites retenues, qui déterminent les débits entrants et sortants.

Un modèle non linéaire complexe tel que celui utilisé par le DHI pose également des problèmes de stabilité numérique, qui tiennent par exemple aux pas d'espace et pas de temps itératifs retenus pour le modèle, ainsi qu'aux schémas numériques connexes et à leurs propriétés de convergence. En outre, au cours du processus de modélisation, on applique normalement une procédure itérative consistant à ajuster les paramètres du modèle de telle sorte que celui-ci satisfasse à différentes mesures de performance. L'ensemble de ces éléments fait partie de la méthode scientifique qui sous-tend l'élaboration et la mise en œuvre de tout modèle, et si les caractéristiques fondamentales relatives à la configuration, aux propriétés et aux procédures utilisées ne sont pas connues (sans parler des résultats détaillés), le modèle conçu ne peut être pleinement compris ou soumis à une évaluation critique.

Il y aurait donc lieu, selon moi, d'exhorter le DHI à reconsidérer sa décision de ne pas fournir le supplément d'informations sur la modélisation demandé par le Chili. Sans ces informations, les résultats de la modélisation doivent être considérés comme un tissu de postulats sans fondement, faute d'éléments de preuve. Ces informations de modélisation et les données à l'appui sont bien évidemment très volumineuses, et devraient être soumises sous forme numérique.

Veillez agréer, etc.

**Lettre en date du 11 janvier 2019 adressée à l'agent de la République du Chili
par l'agent de l'Etat plurinational de Bolivie**

J'ai l'honneur d'accuser réception de votre lettre en date du 21 décembre 2018, que le greffier de la Cour internationale de Justice a transmise à la Bolivie le 27 décembre 2018, et dans laquelle vous faites tenir une lettre exposant l'avis de l'expert du Gouvernement chilien, M. Howard Weather, et demandez que soient communiquées certaines informations supplémentaires utilisées par le Danish Hydraulic Institute (DHI) dans le cadre d'une étude des écoulements dans les zones humides et le système de sources du Silala, dont le rapport (2018) est produit par la Bolivie sous l'annexe 17 de son contre-mémoire en l'affaire relative au *Différend concernant le statut et l'utilisation des eaux du Silala (Chili c. Bolivie)*.

Le Gouvernement de l'Etat plurinational de Bolivie estime prématuré d'engager une controverse sur l'avis formulé par M. Weather sur l'étude hydrologique du DHI (annexe F de l'annexe 17 susmentionnée), dont les résultats sont exposés de façon exhaustive dans le rapport. Toutefois, à la suite de nouvelles consultations, le DHI a indiqué que les données numériques demandées pourront, malgré leur volume et leur complexité, être préparées en vue d'être remises au Chili d'ici le 6 février 2019[9].

Les rapports préliminaires du DHI qui ont été précédemment demandés et qui sont mentionnés dans le rapport final du DHI comme reflétant des travaux en cours seront également transmis d'ici cette date.

Veillez agréer, etc.

**Lettre du 7 février 2019 adressée à l'agent de la République du Chili
par l'agent de l'Etat plurinational de Bolivie**

Me référant à l'affaire relative au *Différend concernant le statut et l'utilisation des eaux du Silala (Chili c. Bolivie)* et faisant suite à ma lettre en date du 11 janvier 2019 relative à votre demande de communication de certaines informations supplémentaires utilisées par le Danish Hydraulic Institute (DHI) dans le cadre d'une étude des écoulements dans les zones humides et le système de sources du Silala dont le rapport (2018) est produit par la Bolivie sous l'annexe 17 de son contre-mémoire, je vous prie de bien vouloir trouver en pièce jointe à la présente une copie des données de modélisation auxquelles il est fait référence dans le rapport final du DHI et les annexes s'y rapportant.

Ces informations sont stockées sous forme numérique sur un disque dur d'un téraoctet (Transcend SN : E58741-0667) et ne peuvent être consultées qu'en utilisant l'interface graphique utilisateur du logiciel de modélisation MIKE SHE. Une version de démonstration de cet outil est jointe sur le disque dur, de même qu'une brève explication de l'organisation des données et de la manière d'y accéder, qui se trouve dans le dossier intitulé «Technical note Transfer of Modelling Data.docx.» situé dans le répertoire racine du disque.

Je joins en outre sous ce pli une clé USB contenant les rapports préliminaires du DHI sous forme de documents PDF, ainsi que l'ouvrage intitulé *Los Salares del Altiplano Boliviano*, de O. Ballivian et F. Risacher, qui est le rapport du ministère des mines et de la métallurgie demandé dans votre lettre en date du 5 novembre 2018.

Veillez agréer, etc.
