

Observation par télédétection de l'impact de la monoculture de l'avocat dans la province de Petorca, Chili.



Mémoire de certificat

Catalina González Jamett

Directeur de mémoire : Dr. Hy Dao

Juré : Dr. Gregory Giuliani

Genève, Août 2020

Table des matières

RÉSUMÉ	4
I. PROBLÉMATIQUE	5
II. CONTEXTUALISATION	7
A. LA PROBLÉMATIQUE DE L'EAU AU CHILI	7
LE CODE D'EAU CHILIEN	7
LA SITUATION HYDRIQUE CHILIENNE	8
PARTICULARITÉS HYDRIQUES DANS LA PROVINCE DE PETORCA	9
B. LA MODERNISATION CAPITALISTE ET L'AGROBUSINESS CHILIEN	10
C. LA PRODUCTION DES AVOCATS DANS LA PROVINCE DE PETORCA	11
D. LE MOUVEMENT POUR LA DÉFENSE DE L'ACCÈS À L'EAU, À LA TERRE ET À LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT	14
III. TÉLÉDÉTECTION ET DONNÉES UTILISÉES	15
IV. MÉTHODOLOGIE	18
V. ZONE D'ÉTUDE : BASSIN ET SOUS-BASSINS DE PETORCA	19
VI. TRAITEMENTS ET RÉSULTATS	24
A. COMBINAISON DE BANDES DANS LES IMAGES SATELLITES LANDSAT 5 ET 8	24
MÉTHODOLOGIE	24
PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	25
B. INDICE DE VÉGÉTATION PAR DIFFÉRENCE NORMALISÉ (NDVI)	29
MÉTHODOLOGIE	29
PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	30
C. INDICE DE TENEUR EN EAU PAR DIFFÉRENCE NORMALISÉE (NDWI)	34
MÉTHODOLOGIE	34
PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	35
D. ANALYSE TENDANCIELLE	39
PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	40
VII. DISCUSSION DES RÉSULTATS	45
VIII. LIMITES DU TRAVAIL	46
IX. RÉFLEXIONS FINALES	46
X. BIBLIOGRAPHIE	47

XI.	ANNEXES	50
A.	COMPOSITIONS FAUSSES COULEURS INFRAROUGES 4-3-2	50
B.	COMPOSITIONS FAUSSES COULEURS INFRAROUGES 5-4-3	56
C.	COMPOSITIONS FAUSSES COULEURS INFRAROUGES 4-3-2	61
D.	COMPOSITIONS FAUSSES COULEURS INFRAROUGES 5-4-3	62
E.	ZONE DE CHINCOLCO : COMPOSITIONS FAUSSES COULEURS INFRAROUGES 4-3-2	63
F.	ZONE DE CHINCOLCO : COMPOSITIONS FAUSSES COULEURS INFRAROUGES 5-4-3	64
G.	INDICE DE VÉGÉTATION PAR DIFFÉRENCE NORMALISÉ NDVI	65
H.	BASSIN HYDROGRAPHIQUE PETORCA (NDVI)	76
I.	NDVI ZONE DE CHINCOLCO	78
J.	INDICE DE TENEUR EN EAU PAR DIFFÉRENCE NORMALISÉE (NDWI)	80
K.	BASSIN HYDROGRAPHIQUE PETORCA (NDWI)	91
L.	NDWI ZONE DE CHINCOLCO	93
M.	HISTOGRAMMES NDWI	95
N.	MODEL BUILDER NDVI ET NDWI	97
M.	CLASSIFICATIONS DES IMAGES	98

Résumé

La présente analyse s'intéresse par le biais de la télédétection à la problématique socio-spatiale des impacts engendrés par la culture de l'avocat dans la province de Petorca au Chili. L'interprétation de l'évolution temporelle (1990-2019) de deux indices de végétation, le NDVI et le NDWI, ainsi que de statistiques des surfaces montrent que nonobstant la forte sécheresse et les difficultés d'accès à la ressource en eau prévalant dans la province de Petorca, la monoculture de l'avocat continue d'augmenter. De même, la répartition spatiale des cultures des avocats se localise à proximité des nouveaux stockages d'eau. Ainsi, l'appropriation de l'eau de la part des exportateurs des avocats a modifié le paysage de la zone verdoyant le coteau de la montagne et asséchant la vallée, tout en altérant la résilience du milieu.

Le contexte biophysique et social dans la province de Petorca montre une fracture socioécologique causée par la production et l'exportation des avocats. La pénurie d'eau dans la province est liée au changement climatique et à la variabilité climatique, mais également à des causes sociopolitiques et socioculturels. Les conflits autour de l'eau à Petorca sont le résultat d'une politique historique de dépossession qui s'est accélérée avec la mise en place du modèle d'agro-exportation initié sous la dictature et consolidée en démocratie. Le modèle de développement néolibéral chilien a privilégié historiquement la croissance économique dans un schéma de mondialisation, en engendrant un processus de dépossession des habitants du territoire. Les abus de la législation et les paradoxes du discours politique progressiste et néolibéral au Chili n'ont fait que renforcer un modèle de développement reposant sur l'exploitation des ressources (naturelles et humains) et l'exclusion au service du profit.

I. Problématique

Au cours des dernières années, le secteur agricole du Chili s'est fortement positionné sur les marchés internationaux en raison d'un processus de modernisation, diversification et consolidation de l'offre locale. Suivant le modèle de l'agrobusiness, le pays a commencé à accentuer le rôle du capital dans les différentes phases de la chaîne de production, en privilégiant l'exploitation des monocultures grâce à un secteur chimique et biotechnologique axée sur l'efficacité (Bengoa, 2017). Cependant, la littérature scientifique a prouvé très clairement qu'en dehors des bénéfices marchands, les pratiques de la monoculture sont tout à fait désastreuses d'un point de vue écologique et social (FAO, 2006¹ ; Altieri, 2009). Parmi les effets négatifs, on peut citer la perte de biodiversité, l'apparition de pestes, la sensibilité accrue aux agents pathogènes, l'épuisement des nutriments du sol, la disparition de l'agriculture à petite échelle, etc. Ainsi, il est estimé que l'exploitation agricole industrielle (reposant essentiellement sur la monoculture) consomme jusqu'à dix fois plus d'eau que l'agriculture biodiversifiée. Comme résultat d'une vision très instrumentalisée de l'eau, ce modèle néglige l'impact de la demande excessive de la ressource hydrique sur les écosystèmes et les petites communautés agricoles. La surexploitation et la pollution de l'eau sont considérées seulement comme des externalités négatives intrinsèques à la production.

Considérant les points évoqués, il est inévitable d'introduire une caractéristique institutionnelle chilienne unique au monde. Le Chili est le seul pays au monde où les services et les sources d'eau sont quasiment privatisés dans leur intégralité. Bien que l'eau soit définie comme un bien national à usage public, l'État chilien a historiquement cédé les droits sur l'eau à des parties privées, gratuitement et à perpétuité. Effectivement, l'article 19 n° 24 de la Constitution et du Code de l'eau² consent à l'État le transfert des droits sur la ressource sans restriction dans le temps et sans priorité d'utilisation. Les propriétaires des droits d'eau peuvent donc profiter librement d'un marché peu réglementé institutionnellement et qui a favorisé la concentration croissante de ces droits entre les mains de quelques grandes entreprises dans le secteur minier, forestier et agro-industriel (Bauer, 2003).

Dans ce contexte, la province de Petorca a été un pilier fondamental du prétendu miracle économique néolibéral chilien. Cette province est la plus étendue et aussi la plus septentrionale dans la région de Valparaíso (zone centrale du Chili). Historiquement, elle était liée à l'exploitation minière, néanmoins, son climat subtropical a favorisé la production industrielle des monocultures et des plantations forestières se développant autour des bassins hydrographiques du Petorca et de la Ligua. Ces bassins sont actuellement surexploités à la suite de l'utilisation intensive de l'eau pour la production de monocultures (notamment de l'avocat), de l'octroi excessif de droits d'eau et de l'extraction illégale de la ressource. Ces circonstances sont très adverses pour la biocénose et le biotope du territoire qui sont désormais exposés aux effets collatéraux du changement climatique.

Le Chili affronte depuis d'une décennie une crise hydrique sans précédent dans l'histoire du pays. En 2014, le ministère des Travaux publics au travers d'un décret ministériel a prononcé que la province de Petorca était une zone présentant une forte pénurie hydrique. Quelques années plus tard, le rapport national d'analyse des risques agroclimatiques signalait que les principaux cours d'eau dans la province restent à sec comme la plupart des puits du secteur, perturbant directement la disponibilité et l'accès à

¹ From subsistence farming to sugar-cane monoculture: impacts on agrobiodiversity, local knowledge and food security. Pour plus d'informations, voir : <http://www.fao.org/3/a-aj042e.pdf>

² Pour plus d'informations, voir : <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=5605> (en espagnol).

l'eau (INIA, 2017³). Face à cette problématique, le gouvernement a implémenté diverses mesures palliatives sans succès, comme l'intervention des cours naturels et les déclarations d'urgence agricole. Pourtant, les causes de cette sécheresse sont autant de nature anthropique que naturelle. Certes, Petorca subit les retombées directes des réformes politiques avantageant l'agro-industrie, la monoculture et l'octroi privilégiés de droits sur l'eau.

Les caractéristiques hydrogéologiques de la province combinées à l'exploitation des terres agricoles et à l'utilisation intensive de l'eau (tant légale qu'illégal) ont engendré une trame complexe ayant déclenché un conflit socio-environnemental à l'échelle territoriale. La production d'avocats dans la région de Valparaiso couvre le 60 % de la surface cultivée, une espèce exigeant des quantités exponentielles d'eau pour leur production (CIREN, 2017). Les habitants de Petorca accusent aux entreprises productrices et exportatrices d'avocats d'avoir aggravé, voire généré la pénurie d'eau dans la province. Les organisations environnementales dans le territoire ont signalé que les causes de la sécheresse à Petorca correspondent à deux motifs principaux. La première est relié au changement climatique dont l'agro-industrie exportatrice (liée à la monoculture des avocats et des agrumes) est génératrice des concentrations anormales de gaz à effet de serre. La deuxième associée au modèle économique extractif qui mène à l'effondrement des écosystèmes locaux avec un cadre politique et institutionnel qui le soutient.

La télédétection est de nos jours une source particulière de données supportant l'analyse de différents processus environnementaux à l'échelle locale et mondiale. Ces données ne permettent pas seulement la visualisation, la classification ou l'analyse d'un territoire déterminé, se présentant aussi comme des indicateurs de changement au fil du temps. Par conséquent, la télédétection peut être une source des données très utile à l'heure d'identifier et surveiller les phénomènes liés à l'agriculture. L'adoption de sa méthodologie peut permettre l'optimisation des certains processus liés à la couverture du sol, à la précision des analyses et à la réduction des coûts associés à certaines études agricoles dans le terrain (GSARS, 2017⁴). Les systèmes d'informations géographiques (SIG) combinés à des données mixtes peuvent s'avérer comme un outil puissant pour la contextualisation et la prise de décision liée aux complexités du monde agricole, politique et social.

Dans ce contexte, la présente analyse par le biais de la télédétection s'intéresse à la problématique socio-spatiale des impacts engendrés par la monoculture de l'avocat dans la province de Petorca au Chili. Au niveau national, cette province a été cataloguée comme l'épicentre de la violation du droit à l'eau, de l'abus de l'agrobusiness et de la négligence de l'État. Ces éléments historiques, symboliques et institutionnels configurés depuis plus de deux siècles font de la zone en question un espace extrapolable à d'autres régions du pays qui commencent actuellement à ressentir les effets indésirables du développement néolibéral basé sur l'exportation.

La finalité de cette recherche (à l'aide des traitements liés à la végétation et aux disponibilités des plans d'eau) est l'estimation de l'évolution et de la répartition des cultures des avocats dans le bassin hydrographique de Petorca. L'étude porte donc sur une analyse multi-temporelle de la période comprise entre 1990 et 2019. La justification de cet intervalle réside dans la dynamique sociohistorique du pays. Dans les années 1990 avec le retour de la démocratie, les hommes politiques et les élites ont commencé à développer l'industrie agricole exportatrice dans la région de Valparaiso notamment dans la province de Petorca. Ils ont acheté les couteaux des collines, détruit les forêts indigènes et détourné les cours d'eau pour la production de monocultures d'avocats, montrant l'héritage que la dictature néolibérale de

³ Résumé disponible sur (en espagnol) : <https://www.agromet.cl/sites/default/files/Bolet%C3%ADn%20INIA%20-%20nov%202017.pdf>

⁴ Manuel sur l'application de la télédétection aux statistiques agricoles (2017) Disponible sur : <http://gsars.org/wp-content/uploads/2018/10/GS-REMOTE-SENSING-HANDBOOK-FR.pdf>

Pinochet a laissé dans certains milieux fortement libéraux. Comme mentionné ci-dessus, ce scénario prometteur pour les grands producteurs allait se voir confronté à des complications majeures. Depuis 1997, une sécheresse a touché les bassins hydrographiques de la province en question, ce qui explique les raisons qui ont poussé à l'État chilien à imposer des restrictions sur l'utilisation et la vente des droits d'eau. Malheureusement, les contraintes climatiques et gouvernementales n'ont pas réussi à arrêter la production et l'exportation de l'or vert. Cette situation est occasionnée en grande partie par une logique économique qui se nourrit de la dépossession et de la déprédation des ressources naturelles, au profit des élites complètement désintéressées par les pressions que leurs activités économiques engendrent sur les systèmes socio-écologiques (Lagadeuc & Chenorkian, 2009).

II. Contextualisation

A. La problématique de l'eau au Chili

Le code d'eau chilien

Dans une logique mercantile, l'eau est considérée une ressource rare, économiquement valorisable, y essentiel pour certaines fonctions écologiques et sociales. Elle est considérée généralement comme un bien public, accessible au travers des droits d'utilisation accordés aux particuliers (CEPAL, 1999). Ces droits sont souvent prévus par des dispositions constitutionnelles dans le but de promouvoir l'investissement privé. Cependant, l'octroi de ces droits exige l'efficacité et la consécution des objectifs sociaux et écologiques. L'infraction de cette obligation devrait entraîner la révocation immédiate des droits en eau (CEPAL, 1999). Nonobstant, le code de l'eau chilien constitue une exception malheureuse à la règle générale.

La Constitution chilienne de 1980 définit dans son article 19 n° 24 la détermination des droits d'utilisation de l'eau. La loi stipule que l'octroi des droits a particulières est uniquement répréhensible si : 1) l'eau n'est pas disponible ; 2) si le bénéfice affecte directement les droits des tiers. En 1981, le dictateur Augusto Pinochet a introduit deux significatives modifications au code de l'eau, en ouvrant la porte au processus national de marchandisation de l'eau. La première consistait en la séparation de la propriété de la terre et de l'eau, désormais considérée comme deux biens séparés. La deuxième c'était l'attribution de la répartition des droits d'eau à l'État, qui étaient gratuits et à perpétuité. Néanmoins, une partie substantielle des inscriptions et octrois ont été effectués dans des conditions d'illégalité par les élites chiliennes et ses laquais au travers de l'utilisation d'information privilégiée.

Le code de l'eau chilien n'exige pas aux requérants la justification de l'emploi futur ni de l'utilisation efficace (CEPAL, 1999). Il en résulte que l'appétit des acteurs économiques a subordonné l'intérêt public. Ce qui a donné lieu, à une série de problèmes relatifs à: la spéculation, le monopole, la concurrence déloyale et la non-utilisation des droits d'eau. Par ailleurs, la législation chilienne réduisait le contrôle de l'État sur les droits d'eau, marquant une étape majeure dans la trajectoire du néolibéralisme chilien. Cette situation a favorisé la dépossession de la ressource, au nom d'un logique marchande et d'une définition sociale très ambiguë des biens d'usage public (Bauer, 2003). En effet, la marchandisation de l'eau a entraîné un dynamisme économique fondé sur le capital économique en accentuant la concentration des droits et de privilèges. L'accumulation des droits à faveur du secteur productif a entraîné la surexploitation des bassins hydrographiques notamment dans le centre nord du pays. Dans ces territoires, les conditions de vulnérabilité et de pauvreté se sont aggravées pour les acteurs exclus du processus de marchandisation hydrique.

La précarisation et les iniquités relatives à l'accès à l'eau se sont progressivement implantées dans les préoccupations politiques nationales. Ce n'était pas exclusivement de la bonne gouvernance, mais plutôt une réaction de défense aux différents reportages étrangers dévoilant les paradoxes du modèle de développement néolibéral soutenu par le pays. Il est manifeste que la législation et les pratiques productivistes se sont imbriquées au cœur de la logique marchande et néolibérale, qui ne considère pas l'eau comme support à la vie ou comme élément clé pour la sécurité alimentaire. Ceci explique l'altération des flux écologiques et le dépassement de la capacité de régénération des nombreux bassins versants du pays. La problématique de l'eau au Chili est fondamentalement un mal auto-infligé, expliqué par un modèle de développement reposant sur l'exploitation des ressources (naturelles et humains) et l'exclusion au service du profit.

La situation hydrique chilienne

Le Chili figure parmi les 30 pays au monde ayant le plus grand risque en matière hydrique d'ici au 2025. La situation est si complexe qu'elle ressemblera à la réalité des pays africains tels que la Namibie ou le Botswana (WRI, 2015⁵). Actuellement, le 76 % de la superficie du territoire est touché par la sécheresse, la désertification et/ou la dégradation des sols (INIA, 2013). Selon les informations fournies dans le texte national des politiques hydriques, le pays a un déficit en eau de 82,6 m³/s qui augmentera à 149 m³/s⁶, d'ici 2030.

La sécheresse hydrologique fait référence à une déficience dans le débit ou le volume des eaux de surface ou souterraine. Nonobstant, il ne s'agit pas exclusivement du niveau d'eau disponible dans les réservoirs naturels ou artificiels, sinon également de la capacité logistique/institutionnelle à administrer la ressource. En ce sens, Linsley et al (1975) offrent une définition plus intégrale: "*période pendant laquelle les débits s'avèrent insuffisants quant à la satisfaction des usages établis, dans le cadre d'un système de gestion des eaux défini* ». Cette spécification ouvre la porte à une vision socio-économique de la sécheresse. En d'autres termes, une pression anthropique assidue sur la ressource hydrique peut engendrer des problèmes, non seulement de disponibilité, mais aussi du développement économique et/ou social. La vulnérabilité s'incorpore donc comme un vecteur potentiellement catastrophique et presque incontournable dans la problématique de la sécheresse.

Compte tenu de cette approche, deux définitions concernant l'état de la ressource hydrique deviennent donc pertinentes ; la rareté et le stress hydrique. La première correspond à l'écart entre l'offre disponible et l'offre exprimée d'eau douce dans un territoire déterminé, tout en considérant le cadre des dispositions institutionnelles et des conditions d'infrastructure existantes⁷ (Steduto et al., 2012). Elle se manifeste donc par une demande non satisfaite, pouvant générer des tensions et de la concurrence entre les utilisateurs. La politique économique ainsi que les modèles de planification et de gestion hydrique jouent un rôle non négligeable. En effet, la rareté de l'eau peut être le résultat des politiques à court terme telles que l'expansion des zones irriguées avec des prix réduits ou l'attribution excessive des droits à des particuliers. Il est important de remarquer que les différentes possibles causes de la rareté de l'eau⁸ sont toujours liées aux facteurs anthropiques dans le cycle de l'eau (Steduto et al., 2012).

Le stress hydrique est un terme général décrivant les symptômes de la pénurie d'eau, comme la détérioration de la qualité et de la fiabilité des services. Au Chili, les conditions d'approvisionnement de l'eau sont particulièrement inégales, en certaines régions par exemple, l'extraction dépasse les flux disponibles. Il est important de noter qu'il s'agit de la disponibilité technique (existence physique et

⁵ World resources institute: <https://www.wri.org/blog/2015/08/ranking-world-s-most-water-stressed-countries-2040>

⁶ Ce calcul est effectué conformément à la comparaison de la disponibilité de la ressource avec les projections de croissance économique.

⁷ Y compris la "tarification" de la ressource ainsi que les coûts convenus pour le consommateur.

⁸ Ainsi, ce phénomène dynamique peut vectoriser la surexploitation des eaux souterraines, diminuant les flux vers les milieux naturels.

dûment vérifiée de la ressource), et non de la disponibilité légale (absence d'interdictions légales ou de droits antérieurs) (INIA, 2013).

Il existe un indicateur reconnu au niveau mondial offrant la possibilité de distinguer les différents niveaux de stress hydrique (Falkenmark and Widstrand, 1992). Il est basé sur la quantité d'eau douce annuelle renouvelable par habitant au travers des valeurs seuils qui oscillent entre 500 et 17000 (m³/hab/an). Selon ce critère, un pays ou une région est considéré comme étant confronté à un certain niveau de stress hydrique en fonction de la disponibilité des ressources en eau renouvelables (ONU-WATER, 2006⁹). Les indicateurs sont faits sur des estimations basés sur le nombre de personnes pouvant vivre raisonnablement avec une unité donnée de ressources en eau déterminée (Falkenmark, 1984). AQUASTAT¹⁰ de la FAO considère ces valeurs comme des indicateurs de base, puisqu'ils peuvent être calculés sans grandes difficultés et de façon annuelle, grâce aux données nationales sur l'eau et la population. Pour le Chili, les ressources totales en eau renouvelables par habitant équivalaient en 2017 à 51.127 m³/hab/an, le positionnant dans un niveau de stress hydrique de nature localisé ou occasionnel.

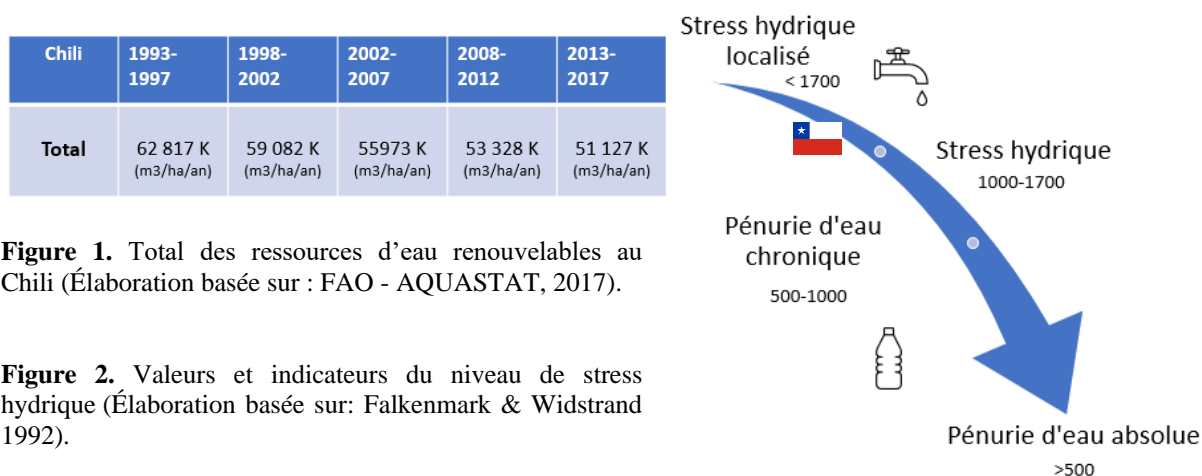


Figure 1. Total des ressources d'eau renouvelables au Chili (Élaboration basée sur : FAO - AQUASTAT, 2017).

Figure 2. Valeurs et indicateurs du niveau de stress hydrique (Élaboration basée sur: Falkenmark & Widstrand 1992).

Particularités hydriques dans la province de Petorca

Soumise aux aléas du changement climatique, la sécheresse est devenue présente dans différentes zones du territoire national. En mars 2015, un total de 194 communes, voire le 56 % du pays a été déclarées en état d'urgence agricole en raison de la sécheresse. Dans la région V de Valparaiso, le total des ressources en eau renouvelables par habitant se rapproche de la fourchette de 500 et 1 000 m³/an/habitant pour une période de 25 ans. Cela indique que le niveau de stress hydrique se traduira par des pénuries d'eau chroniques d'ici 2025. Cette mesure avantageuse simplifie la situation, toutefois, elle ignore les conditions climatiques et les facteurs locaux, les conditions d'accès et les droits sur l'eau ainsi que l'exclusion sociale et territoriale, entre autres éléments. La province de Petorca n'échappe pas à cette tendance. En effet, elle a ressenti les effets du changement climatique par une évolution du climat local en faveur d'une augmentation des températures moyennes et des précipitations moins abondantes (en 2014, il était déjà à 60%¹¹). Cette situation, conjuguée à une sécheresse prolongée pendant 7 ans, a entraîné une diminution de l'emploi dans les activités agricoles et d'élevage, qui s'élevait déjà à 21,75 % en 2006 et à 16,3 % en 2010.

Depuis deux décennies, les deux rivières qui alimentent la province se sont asséchées et ne transportent de l'eau que pendant quelques jours en hiver. La rivière Petorca a été déclarée épuisée en 1997 et le

⁹ Water, a Shared Responsibility: <https://www.unwater.org/publications/water-shared-responsibility/>

¹⁰ Pour plus d'informations, voir : <http://www.fao.org/aquastat/en/>

¹¹ Bulletin national d'analyse des risques agroclimatiques pour les principales espèces et cultures fruitières. Disponible : http://www.chilenu.com/infonut/02_2013/docs/BOLETIN_AGROMETEOROLOGICO.pdf

fleuve Ligua est entré dans le même état en 2004. Bien que les rivières de la région soient sous pression depuis les années 1990, la DGA a continué à accorder des droits sur la base d'un bilan hydrique publié en mai 2002. Ce bilan a été remis en question par certaines universités du pays en raison de la méthodologie appliquée. Selon une étude de la « Fundación Chile » (2014)¹², dans le cas de la rivière la Ligua, les droits d'eau ont été accordés avec un excédent de 29 %. La rivière Petorca est sous pression parce que près de 90 % des droits d'eau disponibles ont été octroyés, sans considéré un canal écologique minimum, en comprenant un risque de raréfaction de la nappe phréatique.

Une autre recherche menée par le Centre pour l'étude des ressources naturelles (CIREN) montre qu'une grande partie des plantations d'avocats sont situées dans des sols non adaptés à la culture agricole, en augmentant le risque de dégradation¹³. Selon une étude de l'université de Valparaíso, publiée par Ciper Chile¹⁴, la major partie des droits sur l'eau dans la province est concentrée dans seulement quatre familles qui ont droit à plus de 2 323,32 litres/seconde.

Ce n'est que lorsque la presse européenne aborde la question de l'usurpation d'eau dans la province de Petorca, qu'il y a eu une revitalisation du processus d'inspection. Au moment d'une mission d'inspection de la DGA à Petorca en juin 2018, 27 situations irrégulières ont été détectées dans 54 puits¹⁵. Les violations du droit à l'eau sont actuellement examinées par la DGA et par des commissions parlementaires. L'Institut national des droits de l'homme est retourné dans la province en juillet 2018 avec une autre mission d'observation pour actualiser le diagnostic et vérifier que l'utilisation de l'eau par l'homme est prioritaire dans la province. En résumé, il existe des preuves fiables et abondantes que la population rurale de la province de Petorca, à nouveau déclarée zone de pénurie d'eau le 5 juillet 2018, souffre effectivement de transgressions du droit à l'eau.

B. La modernisation capitaliste et l'agrobusiness chilien

Pendant le régime dictatorial infligé par le militaire Augusto Pinochet (1973-1990), un processus de modernisation de l'agriculture chilienne a été encouragé en vue d'intégrer les dynamiques des marchés internationaux. Les premières politiques néolibérales dans le pays ont été orientées en faveur de l'industrie forestière et d'exportation, par le biais des incitations économiques. Cependant, le développement de ces industries a significativement perturbé les conditions socio-environnementales et, en particulier, la disponibilité d'eau dans les zones rurales (Murray, 2006).

La politique agricole menée par la dictature s'est déroulée progressivement. Dans la première période, une orthodoxie néolibérale s'est manifestée par l'instauration d'une contre-réforme agraire (à celle établie par Allende en 1970¹⁶) ouvrant la voie au processus de marchandisation des terres. Les surfaces disponibles ont été divisées en trois sections : a) une partie de terrains expropriés a été rendue aux anciens propriétaires, b) l'autre partie était vendue aux enchères et, c) la dernière partie a été attribuée à des paysans sans relations antérieurs avec les mouvements de gauche (Murray, 2006). Simultanément, un processus de consolidation de la privatisation de l'eau a été entrepris, la reconnaissant, désormais, comme un bien économique négociable sur le marché. Ce processus mercantiliste a été accompagné d'un programme de libéralisation des prix des denrées alimentaires avec une réduction des barrières tarifaires sur les importations (Bengoa, 2017).

En réponse à la crise économique de 1982, l'État a adopté une politique de pragmatisme néolibéral centré dans l'intervention de l'économie et le soutien au secteur de l'exportation par des mécanismes de

¹² Radiographie de l'eau, voir : <https://fch.cl/recurso/alimentos-y-acuicultura/resumen-radiografia-del-agua/>

¹³ Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 2007. Estudio Agrológico V Región, Santiago, Chile, pp. 366.

¹⁴ Pour plus d'informations, voir : La <https://ciperchile.cl/2018/04/27/la-naturaleza-politica-de-la-sequia-en-petorca/>

¹⁵ Pour plus d'informations, voir : <https://www.emol.com/noticias/Nacional/2018/07/09/912709/DGA-detecta-27-presuntas-irregularidades-en-53-pozos-de-agua-fiscalizados-en-Petorca.html>

¹⁶ Pour plus d'informations, voir : La réforme agraire (1962-1973) : <http://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-articulo-3536.html>

protection financière et des incitations fiscales (Murray, 2006). Ainsi, la loi de promotion à l'investissement privé dans les travaux d'irrigation et de drainage (N°18.450¹⁷) a alloué des fonds pour les investissements privés dans les ouvrages d'irrigation destinés aux surfaces agricoles. Grâce à ces dispositions, les exportations agricoles ont connu leur premier boom économique. Les gouvernements post-dictatoriaux ont conservé les bases de la politique agricole néolibérale impulsées par Pinochet¹⁸, en adoptant des mesures visant le renforcement du soutien technique aux agriculteurs et la promotion des exportations agricoles (Bengoa, 2017). Ce scénario a été renforcé par les accords de libre-échange initiés dans les années 1990. Les dispositifs implémentés visaient également l'intégration des petits agriculteurs dans le processus de modernisation et d'internationalisation de la production par le biais de l'assistance technique et de l'accès au crédit.

La restructuration de l'agriculture chilienne a créé un scénario profondément contradictoire. Pendant que les indicateurs macroéconomiques témoignent du succès des exportations agricoles, la paysannerie a connu un processus de prolétarianisation et de re-concentration de la propriété foncière (Valdés, 2017). En effet, une partie des petits agriculteurs ont été intégrés de manière précaire et subordonnée dans la chaîne de production dominée par les grands propriétaires fonciers et les spéculateurs de l'agro-business, tandis que les restants faisaient partie du prolétariat rural servant de main-d'œuvre disponible (Valdés, 2017).

Comme indiqué précédemment, l'un des piliers du boom économique agricole a été l'encouragement des exportations agricoles non traditionnelles. La production de fruits frais est ressortie comme un débouché prometteur dans le marché agricole mondialisé. Ainsi, les conditions climatiques du pays et le caractère contre saisonnier de la production (par rapport aux pays capitalistes centraux) a signifié un avantage comparative considérable (Murray, 2006). Les données nationales disponibles témoignent l'intensification des cultures fruitières au fil des ans. En trois décennies, la quantité des arbres fruitiers plantés dans le pays a augmenté de 364 % (INE, 2008). Ce processus de consolidation de l'agriculture chilienne sur le marché international a élargi les relations de production, de circulation et de commercialisation du marché aux zones rurales, en modifiant les structures sociales et du pouvoir territorial.

C. La production des avocats dans la province de Petorca

Les nouvelles configurations de la consommation alimentaire représentent des formes contemporaines de domination coloniale, comportant de forts impacts socio-environnementaux pour les pays producteurs. Par exemple, les classes moyennes (+supérieures) des pays industrialisés possèdent des régimes alimentaires insoutenables, caractérisées par l'adoption d'une consommation de légumes et de fruits sans restriction saisonnière, des aliments spéciaux (exclusivité, facteurs nutritionnels) ou de denrées appréciées culturellement, qui sont principalement produits dans des zones "exotiques" (McMichael, 2009). L'avocat ou l'or doré comme l'on appelle est un exemple frappant de cette tendance. Il est de plus en plus courant de voir dans le monde entier des restaurants qui basent leur offre exclusivement sur cette marchandise. Comme on peut s'y attendre, la demande et les importations de ce fruit ont explosé dans les dernières décennies (figure 3). Cependant, ces nouvelles revendications génèrent une pression constante sur les flux d'énergie et les ressources des pays exportateurs dont le bénéfice est fait au dépit des biens naturels et des populations historiquement marginalisées.

Selon le ministère américain de l'Agriculture (USDA)¹⁹ les plus grandes zones de culture des avocats se trouvent au Mexique (94 000 hectares), suivies des États-Unis (26 400 hectares) et du Chili (21 900

¹⁷ Pour plus d'informations, voir : <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=29855>

¹⁸ Après l'explosion sociale du 18 octobre, les forces politiques du pays ont signé un accord pour organiser un référendum afin de décider s'il faut modifier ou maintenir la Constitution de 1980, héritée de l'époque de la dictature. La consultation peut également constituer une étape vers la justice transitionnelle.

¹⁹ Pour plus d'informations, voir : <https://www.ams.usda.gov/rules-regulations/section8e/avocados>

hectares). Sans le commerce international, les principaux exportateurs sont donc le Mexique, le Chili, l'Afrique du Sud ainsi que l'Espagne et l'Israël.

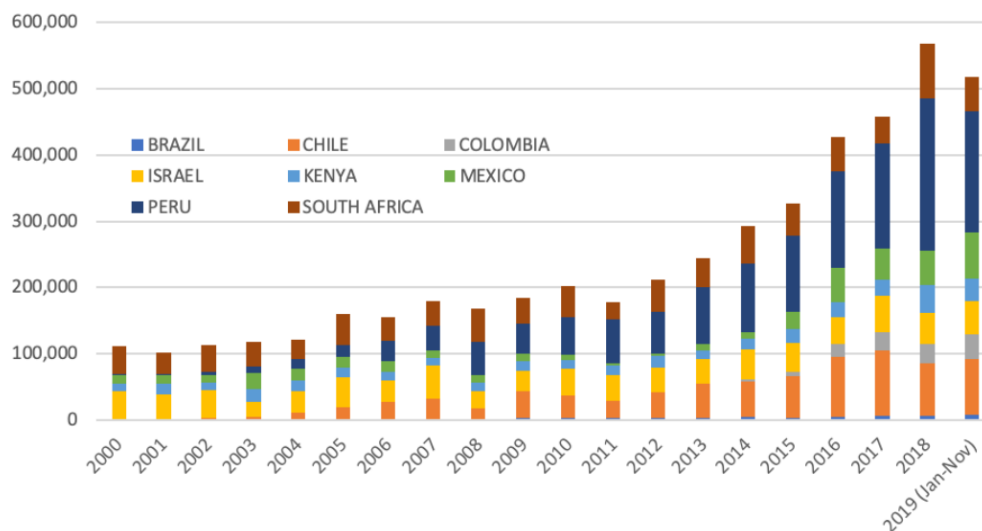


Figure 3. Croissance des importations mensuelles d'avocats en Europe (MT).
(Source: Bloomberg/USDA/ UE Commission²⁰)

Un facteur essentiel à considérer avant d'établir un verger d'avocats est la disponibilité de la ressource en eau. En effet, il est important de tenir compte des besoins en eau de l'espèce pour leur production, qui fluctue entre 8 000 et 10 000 m³ par hectare. Plus particulièrement, au Chili comme la culture s'est étendue à la zone nord ou plus près de la chaîne de montagnes, ces besoins peuvent atteindre jusqu'à 18 000 m³ par 4 hectares par an. Au cours des dernières décennies, l'étendue plantée avec des avocatiers dans le pays est passée de 8 190 (ha) en 1990 à plus de 21 800 (ha) en 2002. En 2007, la surface commerciale (supérieure à 0,5 ha) destinée aux avocatiers était déjà de 29 289 (INIA,2017). Ainsi, en 10 ans, l'augmentation des volumes des importations a été de 55,9 % tonnes. Dans la même période, la valeur des exportations a haussé de 102 % (figure 4).


	Année	Volume (tonnes)	Valeur (\$)
	2008	84.998	145.727
	2018	132.525	294.829
	Var %	55,9%	102%

Figure 4. Augmentation du volume et de la valeur des exportations d'avocats 2008-2018
(Élaboration basée sur les données de l'INIA 2019)

L'empreinte hydrique est un indicateur concernant l'utilisation de l'eau dans les activités de la vie quotidienne, que ce soit dans la production alimentaire, les processus industriels ou la production énergétique. Cet indicateur permet de connaître la quantité d'eau utilisée au niveau individuel, communautaire, régional, national et également mondial. Il applique uniquement à l'eau douce et se compose de quatre éléments de base, à savoir la classification de l'eau, le volume, le lieu d'origine et le moment de l'extraction. Les données sur l'empreinte hydrique à Petorca indiquent que 389,5 litres d'eau sont requis afin de produire un kilo de ce produit dans la région (INIA, 2013).

²⁰ Pour plus d'informations, voir : <https://www.bloomberg.com/quote/0242416Z:US>

Par ailleurs, le concept d'eau virtuelle est défini comme la quantité d'eau consommée dans le processus de production d'un produit agricole ou industriel, en considérant les impacts tout au long du cycle de vie (Hoekstra et Hung, 2002). En multipliant l'empreinte hydrique de l'avocat par la dernière production déclarée par AGROPETORCA s'élevant à 25 000 tonnes l'on obtient une valeur de 9 737 500 m³ (9,73 gigalitres) correspondant à la quantité d'eau virtuelle qui accompagne la production d'avocats dans la province (Molina, 2018).

$$389,5 \cdot 25.000 = 9.737.500 \text{ m}^3$$

Actuellement, il n'y a pas des chiffres officiels concernant la quantité de l'eau virtuelle exportée annuellement au niveau régional (Région V de Valparaiso). Cependant, si l'on considère la production informée d'avocats 184 467,3 tonnes dont l'exportation correspond à la valeur de 65,4 % (CIREN, 2017) on estime un volume de 46 991 227,5 m³ d'eau virtuelle exportée chaque année.

$$389,5 \cdot 120.642 = 46.991.228 \text{ m}^3$$

La province de Petorca compte un total de 64 604 habitants (INE, 2017). La norme minimale de consommation d'eau définie par l'Organisation mondiale de la santé est de 100 litres par jour et par personne, ce qui représenterait une valeur de 2,35 giga litres d'eau. Cette valeur de l'usage humaine d'eau au cours d'une année symboliserait moins d'un quart de l'eau virtuelle calculée pour la production d'avocats.

En raison des conditions climatiques défavorables et de la variabilité de la production d'avocats, la récolte de ce fruit a connu des fluctuations en non-conformité avec les projections de productivité (basée sur l'augmentation des plantations au cours des dernières saisons), en diminuant le volume de bénéfice attendu par les grands exportateurs chiliens. Toutefois, ce ne sont pas seulement les exportateurs qui sont touchés dans leurs projections économiques et de vie. Les habitants de la province de Petorca (région de Valparaiso) font face à un panorama bien plus décourageant lié à la production des avocats. Privés de l'accès à l'eau pour les emplois quotidiens le plus basique (comme s'hydrater, se laver ou faire à manger) ils observent depuis leurs fenêtres, un panorama tristement paradoxal. Les habitants s'inscrivent, en effet, dans un paysage composé par les cadavres de bovins déshydratés, de cultures familiales complètement sèches et des milliers d'hectares couverts d'avocatières (Figure 5). Indifférentes à la sécheresse qui frappe la région, les grandes sociétés d'exportation ont maintenu leur activité extractive au travers de la surutilisation des ressources hydriques disponibles et au détriment de la communauté qui doit attendre des camions citernes pour leur fourniture journalière d'eau. Les acteurs économiques, loin d'assumer ou de partager les dommages environnementaux et sociaux produits, préfèrent s'appuyer sur une image d'entrepreneurs nécessaire au développement économique du pays. Leurs stratégies communicationnelles s'appuient sur trois points principaux. Le premier, est basé sur la diffamation des défenseurs du droit à l'eau, qualifiée d'éco terroristes ou d'extrémistes idéologiques de gauche, cherchant nuancer le pays et les principes néolibéraux promulgués par celui-ci (Danwatch, 2017²¹). La seconde est la minimisation de leur responsabilité dans la pénurie d'eau. Pour eux, les principaux vecteurs de ce phénomène sont le changement climatique ainsi que la mauvaise gestion de la DGA²² et de l'entreprise sanitaire de la région (ESVAL) (Danwatch, 2017). Et la troisième est la disqualification, tant des membres de MODATIMA²³ (catalogués comme une source de données peu

²¹ Rapport disponible sur : <https://old.danwatch.dk/wp-content/uploads/2017/05/Paltas-y-agua-robada.pdf>

²² La Direction générale de l'eau, Ministère des travaux publics. Pour plus d'informations, voir : <https://dga.mop.gob.cl/Paginas/default.aspx>

²³ Le Mouvement pour la défense de l'accès à l'eau, à la terre et à la protection de l'environnement. Pour plus d'informations, voir : <http://modatima.cl/quienes-somos/>

fiables, ainsi que de la presse européenne accusée de surestimer l’empreinte hydrique de la culture de l’avocat, diffusant de fausses informations sur la scène internationale (Danwatch, 2017). Ces stratégies sont devenues évidentes en 2018 lorsqu’une délégation du lobby de l’avocat a effectué une tournée en Europe cherchant à démentir les informations diffusées par les médias européens sur la situation des droits de l’homme et la crise de l’eau dans la province de Petorca. Ils ont insisté sur le fait que cette pénurie est le résultat du changement climatique, tout en niant la coresponsabilité des grands producteurs dans l’instabilité socio-environnementale qui traverse actuellement le territoire.



Figure 5. Contraste de la sécheresse à Petorca
(Source : Sputniknews²⁴, 2020)

D. Le mouvement pour la défense de l’accès à l’eau, à la terre et à la protection de l’environnement

L’agriculture en tant qu’activité économique est généralement moins contestée sur le plan territorial que d’autres activités extractives (comme l’industrie minière ou forestière). Cela peut s’expliquer par le fait que les impacts socio-écologiques engendrés ne sont pas observables à court terme, que ce soit par la modification du paysage ou l’altération de la disponibilité des ressources naturelles. De même, la production agricole se développe sur la base d’imaginaires institutionnellement justifiés liés à la croissance économique en matière de production et d’emploi (Murray, 2006). Cependant, la production agroalimentaire a été progressivement subordonnée aux mécanismes de marchandisation de l’activité agricole, ayant pour objectif ultime la génération de bénéfice tout au long du processus de production et de circulation conformément à la logique capitaliste. L’augmentation de ces flux a entraîné de complexes conséquences environnementales pour la biosphère, tels que la dégradation accélérée des sols, la perte de la biodiversité ou l’augmentation des émissions de gaz à effet de serre.

En 2009, le militant écologiste et agronome chilien Rodrigo Mundaca²⁵ a fondé en collaboration avec un groupe d’agriculteurs et de paysans de la province de Petorca le mouvement pour la défense de l’accès à l’eau, à la terre et à la protection de l’environnement (MODATIMA). Déjà en 2012, ils ont dénoncé publiquement le vol d’eau et plus précisément l’usurpation de cette ressource par des drains illégaux, construits par des hommes d’affaires sans scrupules ni considération pour les restrictions à l’extraction d’eau déclarées depuis les années 1990 autour des bassins versants de Petorca et la Ligua.

²⁴ Pour plus des images, voir : <https://mundo.sputniknews.com/america-latina/202001311090319725-vivir-con-sed-santiago-a-punto-de-racionar-agua-como-ya-lo-hacen-1-millon-de-chilenos--fotos/>

²⁵ Prix Danielle Mitterrand France (2018) et prix international des droits de l’homme de Nuremberg (2019).

Le mouvement territorial et communautaire MOTADIMA est une expression organisée de la résistance aux pillages de la ressource hydrique dans la région. Il cherche à provoquer un débat de société sur la nécessité de reconsidérer cet élément comme un bien commun et non comme une marchandise commercialisable. Cette organisation vise à révéler le modèle d'appropriation de l'eau chilienne inscrite dans la Constitution dictatoriale de 1980. Ces dénonciations politiques ont été accompagnées d'une mobilisation sociale dans les rues de la province dont une partie substantielle des habitants a exigé la fin du vol d'eau, tout en demandant aux autorités chiliennes des mesures concrètes pour faire face à la crise hydrique (Bolados, 2016).

Les membres de MODATIMA ont subi différentes formes de harcèlement à la suite des premiers rapports européens publiés au sujet de l'impact socio écologique des cultures d'avocats à Petorca. Un exemple qui parle de lui-même est les multiples poursuites judiciaires que les grands exportateurs ont mises en place contre les adhérents du mouvement pour les intimider. Entre juillet 2012 et août 2014, le porte-parole du mouvement Rodrigo Mundaca a comparu 24 fois devant 4 tribunaux différents. Ainsi, en 2014, il a été condamné à 61 jours de prison pour diffamation présumée, malgré les résultats des études démontrant l'existence des drainages illégaux par le biais de la télédétection²⁶. La peine a ensuite été commuée en une signature mensuelle devant le tribunal et l'amende a été payée en pièces d'un peso (0.0012 CHF) grâce à la campagne « débarrassez-vous d'un peso », une action de solidarité menée dans tout le pays. Bien que Rodrigo Mundaca ait payé l'amende, les mesures dictées par les tribunaux chiliens à l'encontre des exportateurs d'avocats ne sont toujours pas appliquées.

En 2017, Amnesty International a lancé une action urgente pour protéger la vie des activistes²⁷ et d'autres membres du mouvement qui avaient reçu des menaces de mort pour avoir dénoncé dans les médias internationaux les prélèvements illégaux d'eau dans la province. L'intensité du conflit a réussi à transcender l'échelle locale en formant un mouvement remettant en question la réalité de Petorca, tout en critiquant le modèle d'agro-exportation et la privatisation de la ressource hydrique dans le pays. Cette situation a plus précisément donné lieu à une demande d'abrogation du code de l'eau et de l'actuelle Constitution politique. Maintenant que le contexte dans lequel les problèmes de la monoculture d'avocats et de la sécheresse dans la province de Petorca sont connus, il est possible de poursuivre l'analyse méthodologique et les techniques de télédétection appliquées à notre étude de cas.

III. Télédétection et données utilisées

La télédétection est la technique permettant de recueillir des informations sur des objets à distance, c'est-à-dire, sans contact matériel entre l'instrument utilisé et l'objet analysé (Sobrino, 2000). Cette technique englobe tous les processus liés à la captation et l'enregistrement de l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi (CCT, 2019²⁸). Ainsi, elle incorpore le traitement et l'analyse de l'information en vue de répondre à une problématique particulière. La télédétection appliquée à l'étude de l'environnement présente différentes potentialités liées à la détection des phénomènes naturels et anthropiques comme la discrimination de différentes couvertures végétales, des plans d'eau, l'utilisation des sols, grâce aux différentes bandes multispectrales des satellites.

Plus précisément, le spectre électromagnétique (Figure 6) est le classement des rayonnements électromagnétiques basé sur la fréquence et longueur d'onde. Il comprend des rayons gamma de

²⁶ Informe de identificación de aguas subterráneas y estructuras de derivación de aguas en la zona La ligua-Petorca, mediante técnicas de teledetección aeroespacial (DGA, 2011)

²⁷ Pour plus d'informations, voir : <https://www.amnesty.org/en/get-involved/take-action/protect-chile-human-rights-defender-rodrigo-mundaca-and-modatima-members/>

²⁸ Centre canadien de télédétection : <https://www.rmcan.gc.ca/science-et-donnees/centres-de-recherche-et-laboratoires/canmetenergie-centres-de-recherche/centre-canadien-teledetection/21750>

courtes longueurs d'onde aux ondes radio d'une longueur pouvant atteindre des kilomètres (CCT, 2019). Ces régions sont appelées bandes et ils ont leurs propres fréquences mesurées en Hertz et des longueurs d'onde allant du micromètre au kilomètre. Ainsi, les bandes sont distribuées dans les images satellites par le biais de trois canaux : rouge, vert et bleu. Le passage de chaque bande par ces canaux fournira différentes nuances des éléments en fonction de leur réponse aux différentes longueurs d'onde. Les données recueillies par les satellites de télédétection sont enregistrées dans différentes bandes du spectre électromagnétique. Cela génère une image monochrome qui peut être visualisée en échelle de gris avec une palette de 256 tons pour les images Landsat 5 et 7. Par conséquent, chaque pixel de l'image peut contenir une valeur allant du noir, valeur 0, au blanc, valeur 256 (CCT, 2019). Cependant, cette information varie selon les capteurs, car les images Landsat 8 sont codées en 16 bits permettant le stockage de 65536 niveaux.

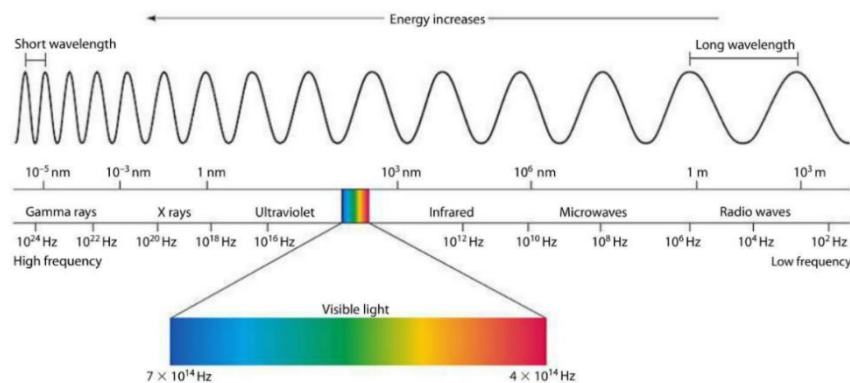


Figure 6. Représentation du spectre électromagnétique
Source : Miniphysics²⁹, 2016)

Landsat et Sentinel sont les deux satellites les plus importants, fournissant des images pour des différentes analyses géomatiques qui peuvent être téléchargées gratuitement à partir de différentes plateformes. Le programme américain Landsat est un projet conjoint entre la NASA et l'USGS (U.S. Geological Survey) offrant le plus vaste catalogue d'observations de la terre au monde. Depuis sa création en 1975 jusqu'à aujourd'hui, il continue à servir de source d'images scientifiquement valables de notre planète. Ces satellites ont capturé des images de la terre depuis 1972, ce qui fait que Landsat dispose d'archives historiques sans précédent quant à la qualité, les détails, la couverture et la durée.

Le Landsat 5 a été lancé depuis la base aérienne de Vandenberg en Californie le 1er mars 1984. Comme le Landsat 4, il portait un scanner multispectral (MSS) et des instruments *thematic Mapper* (TM). La largeur de la scène était d'environ 180 km² ayant 7 bandes spectrales (Figure 7). Landsat 5 a fourni des données d'imagerie de la Terre pendant près de 29 ans, détenant un record mondial Guinness pour être « le satellite d'observation de la terre le plus long en fonctionnement », avant d'être mis hors service le 5 juin 2013 (USGS³⁰).

²⁹ Pour plus d'informations, voir : https://www.miniphysics.com/electromagnetic-spectrum_25.html

³⁰ Pour plus d'informations, voir : <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-satellite-missions>

Band	Wavelength	Useful for mapping
Band 1: blue	0.45 - 0.52	Bathymetric mapping, distinguishing soil from vegetation and deciduous from coniferous vegetation
Band 2: green	0.52 - 0.60	Emphasizes peak vegetation, which is useful for assessing plant vigor
Band 3: red	0.63 - 0.69	Discriminates vegetation slopes
Band 4: Near Infrared	0.77 - 0.90	Emphasizes biomass content and shorelines
Band 5: Short-wave Infrared	1.55 - 1.75	Discriminates moisture content of soil and vegetation; penetrates thin clouds
Band 6: Thermal Infrared	10.40 - 12.50	Thermal mapping and estimated soil moisture
Band 7: Short-wave Infrared	2.09 - 2.35	Hydrothermally altered rocks associated with mineral deposits
Band 8: Panchromatic (Landsat 7 only)	0.52 - 0.90	15 meter resolution, sharper image definition

Figure 7. Bandes spectrales du Landsat 5 et leur application
(Source : Fourie and Johnson, 2007)

Le Landsat 8 (d'abord connu sous le nom de Landsat Data Continuity Mission) a été lancé le 11 février 2013 depuis la base aérienne de Vandenberg, en Californie, sur une fusée Atlas-V. Le satellite est équipé du *Operational Land Imager* (OLI) et du *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) (USGS). Landsat 8 acquiert environ 740 scènes par jour sur le système de trajectoire de référence 2 (WRS-2), avec un chevauchement de fauchée (ou *sidelap*) variant de 7 % à l'équateur à un maximum d'environ 85 % aux latitudes extrêmes. La taille de la scène est de 185 km x 180 km (114 mi x 112 mi). Il contient neuf bandes spectrales, dont une bande panoramique (Figure 8).

Band	Wavelength	Useful for mapping
Band 1 – coastal aerosol	0.43-0.45	coastal and aerosol studies
Band 2 – blue	0.45-0.51	Bathymetric mapping, distinguishing soil from vegetation and deciduous from coniferous vegetation
Band 3 - green	0.53-0.59	Emphasizes peak vegetation, which is useful for assessing plant vigor
Band 4 - red	0.64-0.67	Discriminates vegetation slopes
Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85-0.88	Emphasizes biomass content and shorelines
Band 6 - Short-wave Infrared (SWIR) 1	1.57-1.65	Discriminates moisture content of soil and vegetation; penetrates thin clouds
Band 7 - Short-wave Infrared (SWIR) 2	2.11-2.29	Improved moisture content of soil and vegetation and thin cloud penetration
Band 8 - Panchromatic	.50-.68	15 meter resolution, sharper image definition
Band 9 – Cirrus	1.36 -1.38	Improved detection of cirrus cloud contamination

Figure 8. Bandes spectrales du Landsat 8 et leur application³¹
(Source : USGS, 2017)

Les données utilisées dans ce travail de recherche ont été récoltées sur le site du US Geological Survey³² et ils correspondent à des images du Landsat 5 et 8. L'objectif principal de cette analyse est de montrer visuellement et quantitativement l'impact de la monoculture de l'avocat dans l'occupation du sol et la distribution de l'eau dans la province de Petorca au Chili. Dans cet ordre des idées, ce travail est fondé sur trois hypothèses centrales:

³¹ Pour plus d'informations, voir : https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-8?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con

³² www.usgs.gov

- a) Nonobstant la forte sécheresse et les difficultés d'accès à la ressource en eau prévalant dans la province de Petorca, la monoculture de l'avocat continue d'augmenter.
- b) La répartition spatiale des cultures des avocats se localise à proximité des nouveaux stockages d'eau.
- c) L'appropriation de la ressource eau de la part des exportateurs des avocats modifie le paysage de la zone, verdoyant le coteau de la montagne et asséchant la vallée, tout en altérant la résilience du milieu.

IV. Méthodologie

Ce travail a été réalisé en suivant les lignes directrices d'une méthodologie mixte renforcée par des analyses de télédétection. Dans un premier temps, une revue bibliographique de la littérature a été réalisée, accompagnée de l'analyse de sources secondaires concernant l'impact de la monoculture d'avocats et les conditions climatiques et environnementales de la province de Petorca. Dans un deuxième temps, nous avons utilisé le logiciel Arcgis 10.7.1³³ pour les traitements des images. Ceci est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques (ESRI, 2020³⁴). Les traitements effectués (comme indiqué dans la figure 9 ci-dessous) correspondent à des compositions des couleurs, aux indices NDVI ainsi que NDWI, à l'analyse des tendances et aux mises en classes. Les traitements seront plus précisément détaillés dans les chapitres suivants.

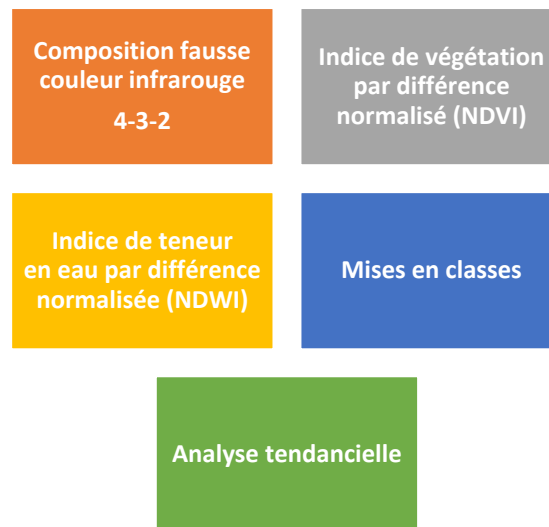


Figure 9 : Schéma général des traitements

Pour compléter l'étude de terrain, et plus particulièrement l'analyse hydrologique, les données de la région V (Valparaiso) au Chili ont été utilisées. Une représentation visuelle a été réalisée avec eux pour montrer les décrets hydrologiques et les zones de restriction grâce au géoréférencement des données. Ils sont disponibles sur les pages gouvernementales de l'IDE (infrastructure de données géospatiales ; <http://www.ide.cl>) et en format Excel sur le site de la Direction générale de l'eau (DGA ; <https://dga.mop.gob.cl/>).

³³ Ce logiciel est considéré comme la principale plateforme des systèmes d'informations géographiques (SIG) au monde.

³⁴ Pour plus d'informations, voir : <https://resources.arcgis.com/fr/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>

V. Zone d'étude : Bassin et sous-bassins de Petorca

La province rurale de Petorca (carte I) est située géographiquement entre 32° 02' et 33° 57' de latitude sud et entre 70°00' et 72°00' de longitude ouest. Elle est la plus grande et la plus septentrionale de la région de Valparaíso avec une superficie de 4 589 km². Ainsi, elle est limitrophe au nord avec la province de Choapa et au sud avec la province de Valparaíso et Quillota. Elle rencontre la province de San Felipe d'Aconcagua à l'est et l'océan Pacifique à l'ouest.

La zone d'étude correspond à une région centrale du pays profondément touchée par une sécheresse de plus de deux siècles. La saisonnalité marquée des précipitations, aggravée par de longues phases de sécheresse et d'excès d'humidité, souligne la nécessité de rechercher divers outils pour évaluer et surveiller l'état du système hydrique dans différentes périodes. En ce sens, la disponibilité croissante des technologies satellitaires modernes et le progrès des technologies de l'information permettent d'avoir des résultats pratiquement en temps réel de certaines variables environnementales.

Nous avons délimité la zone d'étude par rapport au bassin hydrographique de la rivière Petorca (CLIP) en cohérence avec la problématique de la sécheresse dans la région. Le bassin de Petorca a une superficie de 1988 km² et traverse la commune de La Ligua et Petorca. Son lit principal est le fleuve Petorca, qui s'étend sur 101 132 m. Ce fleuve est formé par l'union des rivières le Sobrante et le Pedernal. Les deux lacs existants correspondant aux lagunes de Sobrante et de Maitenes, dont les surfaces ne dépassent pas le km². Il n'y a pas de barrages dans le bassin. L'aquifère de Petorca est divisé en 5 SHAC - Rio Pedernal - Estero Las Palmas - Rio del Sobrante - Petorca Poniente - Petorca Oriente. Contrairement à d'autres bassins qui sont alimentés par l'eau des glaciers andins, le bassin de Petorca dépend exclusivement des pluies et de la neige hivernale, qui ont considérablement diminué ces dernières années.

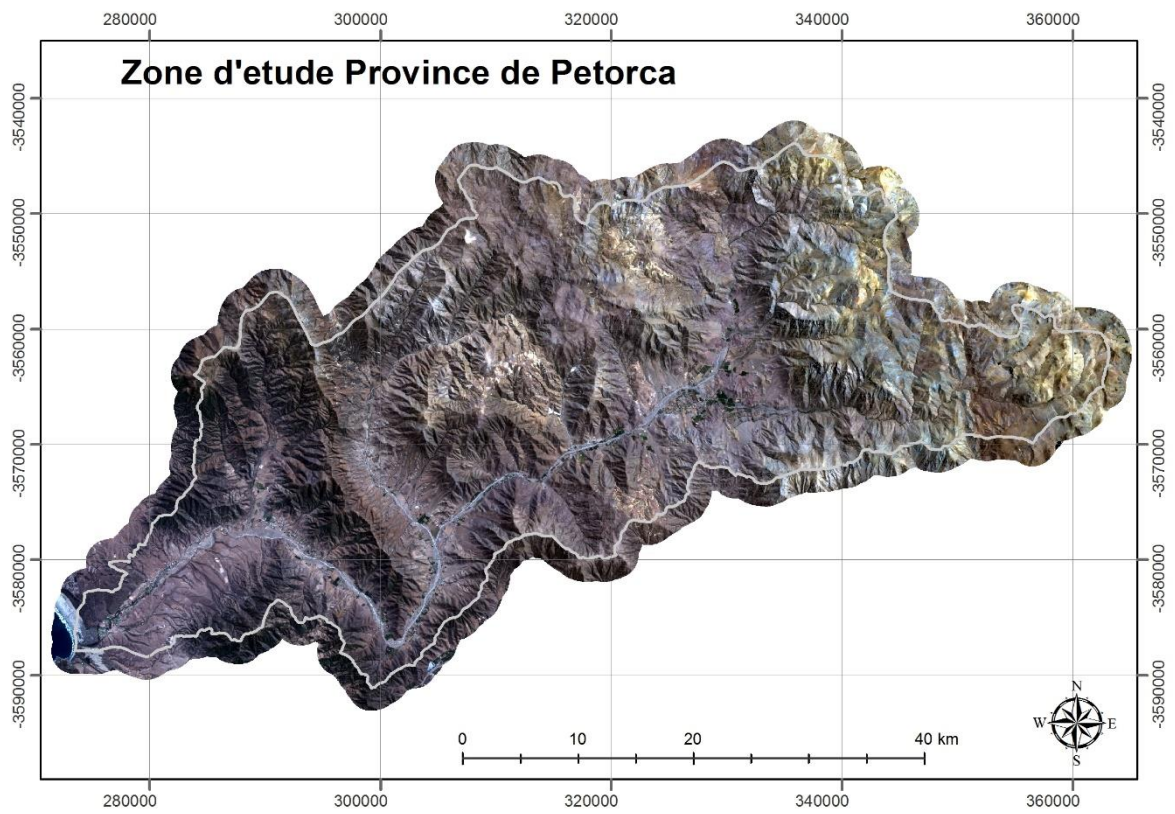
Ainsi, après d'une première analyse visuelle grâce au géoréférencement des images de cultures des avocats de l'Institut national agricole, nous avons décidé de travailler dans la zone de Chincolco (32°13'46"S 70°51'16"O) comme unité représentative de la province. Ce choix est justifié par l'extension des cultures d'avocats et par la similitude ou la transversalité des conditions climatiques à Petorca.

Le bassin versant de la Petorca a été déclaré zone de restriction en avril 1997. En 2014 ce décret a été modifié quand les niveaux de débit des rivières étaient inférieurs à leur minimum historique. En 2018, après une réévaluation de la disponibilité de la ressource, de nouvelles zones de restriction ont été déclarées, notamment pour l'exploitation des eaux souterraines dans les secteurs hydrogéologiques d'usage commun du bassin. Actuellement, la demande souscrite dépasse la disponibilité hydrique déterminée par la Direction générale de l'eau (DGA) pour la constitution de droits d'usage, tant définitifs comme provisoires. Pour une représentation visuelle et après d'avoir nettoyé la table de droits d'utilisation de l'eau de la DGA, nous avons spatialisé certaines catégories notamment les zones d'interdiction, les zones de restriction et les puits d'extraction, comme l'on observe sur la carte II ci-dessous.

Carte du Chili

Région V de Valparaíso





Carte I : Province de Petorca et localité de Chicolco, 2019

Combinaisons RVB (4,3,2)

L'un des principaux problèmes liés à la gestion de l'eau au Chili est qu'elle est sous le contrôle et la supervision des institutions de l'État. Comme précédemment, le bassin de Petorca a été déclaré épuisé en 1997, mais ce n'est qu'en 2008 que la DGA a commencé à contrôler l'extraction d'eau par les particuliers. En 2014, celle-ci a été limitée et en juillet 2018, elle a été déclarée zone interdite, car les niveaux d'extraction dépassaient l'approvisionnement à long terme donc durable. Malgré cela, entre 2008 et 2018, la DGA a reçu 241 plaintes officielles pour extraction illégale, en plus des recours en protection déposés par les familles de la région en raison de l'impossibilité d'accéder à l'eau potable. Les camions citernes gérés par l'État fournissaient moins de 100 litres par personne et par jour, un chiffre inférieur à celui recommandé par l'Organisation mondiale de la santé.

Les conflits liés à l'eau sont fréquents dans la province de Petorca, où la plupart des avocatiens chiliens sont produits pour l'exportation. Les rivières se sont asséchées et les droits à l'eau des résidents sont violés. En effet, comme le montre la figure 10, l'eau dans la région est principalement employée pour l'irrigation et l'agro-industrie (80%), qui sont préférées à l'usage domestique. Il est substantiel de noter que la catégorie la plus élevée correspond aux données qui ne sont pas enregistrées. Cela a un sens, lorsque la situation d'irrégularité dans la zone est connue, en ce qui concerne l'utilisation et les droits de l'eau.

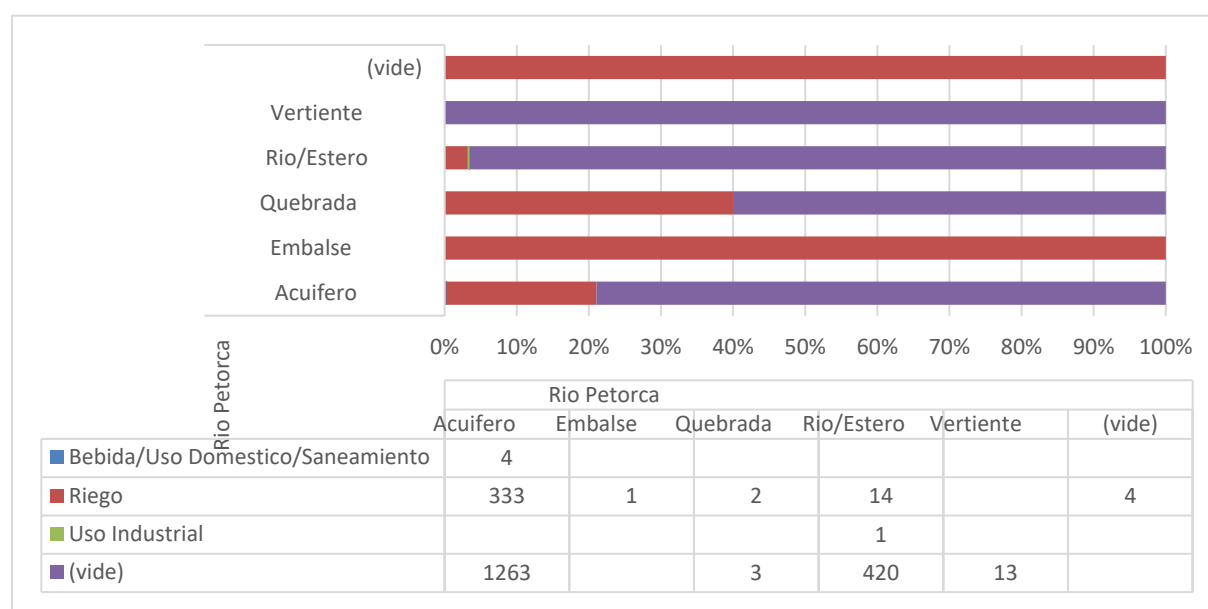
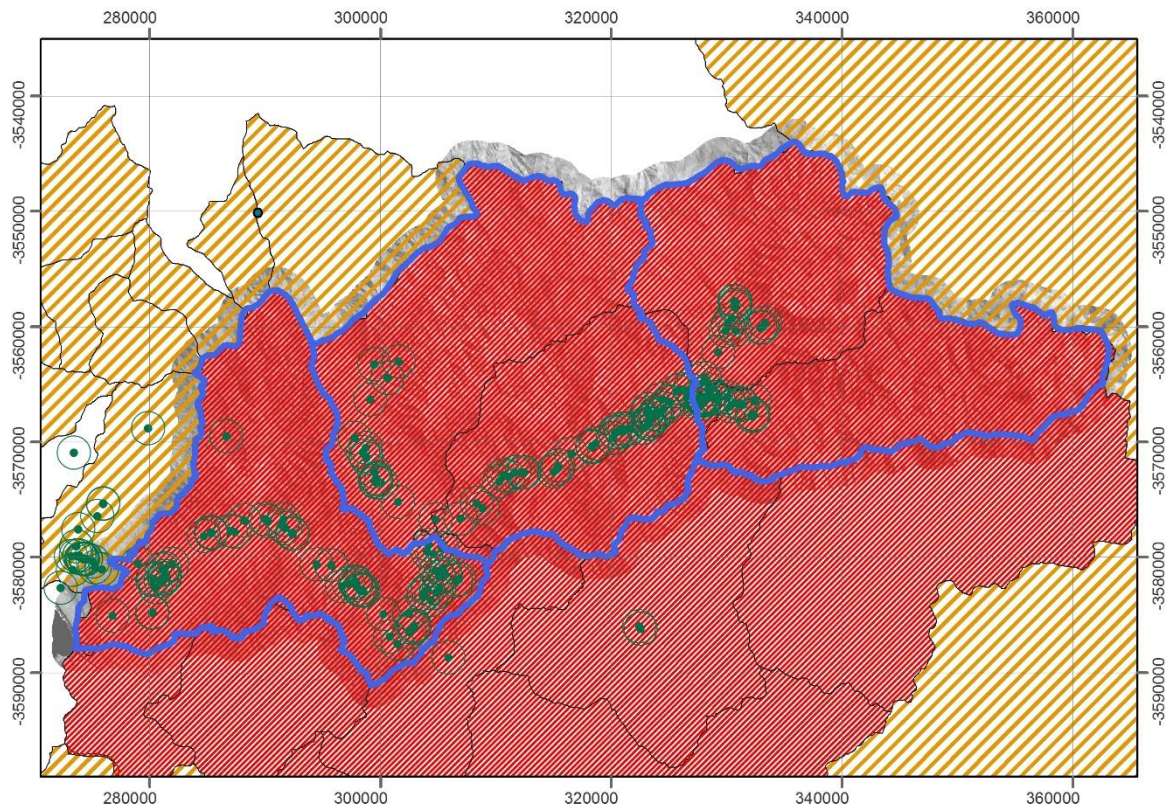
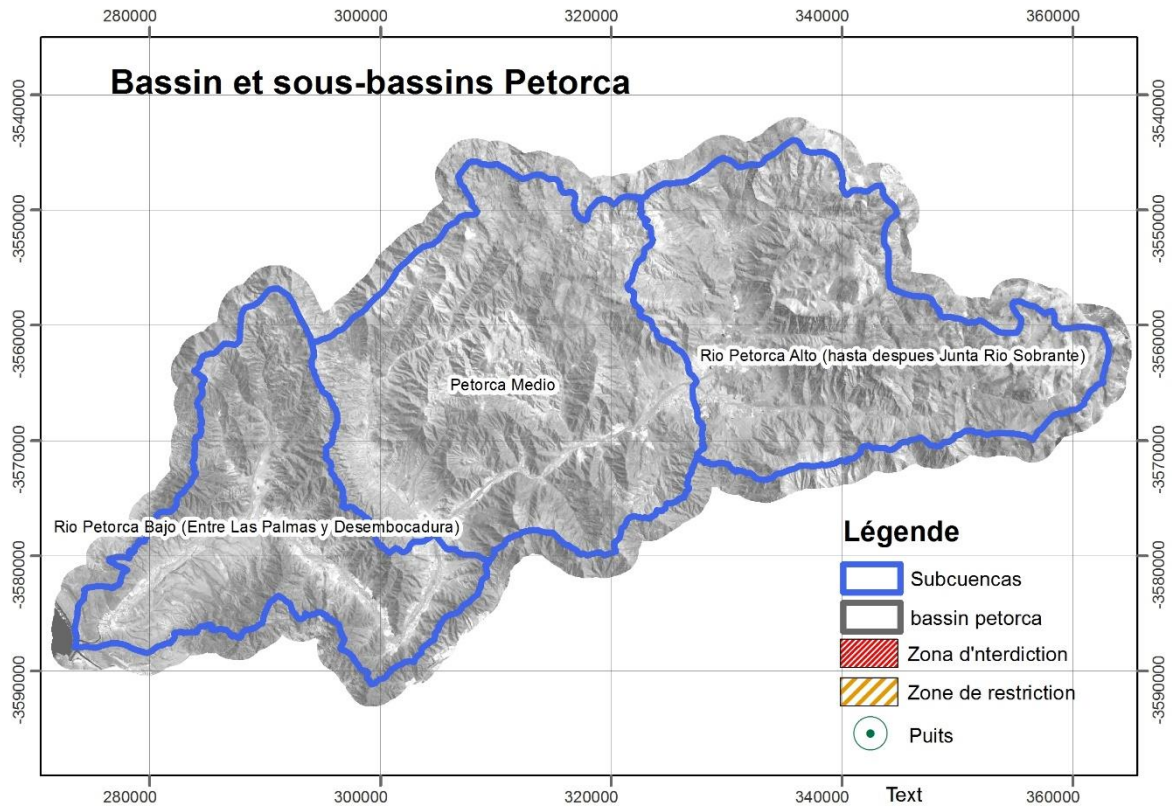


Figure 10 : Utilisation de l'eau, bassin de Petorca. Élaboration propre avec les données de la DGA



Carte II : Bassin, sous-bassin et décrets d'eau à Petorca

VI. Traitements et résultats

A. Combinaison de bandes dans les images satellites Landsat 5 et 8

Méthodologie

L'affichage d'une image capturée par un satellite est plus représentatif lorsqu'il est fait avec une composition de couleurs, car l'œil humain perçoit mieux les différences de couleurs que les différences de niveaux ou de teintes de gris. Les bandes des images satellites sont distribuées en considérant 3 canaux, correspondant aux couleurs : rouge, bleu et vert. Le passage de la bande par ces canaux donne différentes nuances aux éléments en fonction de la réaction de ces derniers aux longueurs d'onde. Les 256 niveaux numériques de chaque bande peuvent être représentée sous la forme monochromatique se combinant pour former une autre image avec différents couleurs. Ces couleurs et tons sont utilisés pour l'interprétation visuelle des images de manière à donner une première approche du contenu de l'image.

Pour afficher les images de télédétection en couleur, il est nécessaire de faire une combinaison de trois bandes, appelée image couleur composite (Composition RVB). D'abord, nous avons créé une zone tampon autour des bassins hydrographiques de Petorca à l'aide de la commande « Buffer » dans le « Editor toolbar », en délimitant la zone d'étude grâce aux « Clip ». Ce traitement a été fait en vue d'améliorer la performance et l'évolutivité des jeux des données. Ensuite, et pour automatiser les processus de création des composites, nous avons décidé d'utiliser l'outil « ModelBuilder³⁵ » (Figure 10). Ceci est une application utilisée pour établir, éditer et gérer des modèles. Ces derniers sont des flux de travail qui relient des séquences d'outils de géotraitement et fournissent des sorties d'un outil à un autre comme de nouvelles entrées. Dans le « ModelBuilder » nous avons inclus le « bouffer », le « clip » et l'outil « Composite Bands > Raster Processing » pour réaliser des compositions infrarouges 4-3-2 pour les images correspondant à la période allant de 1990 à 2011 (Landsat 5) et 5-4-3 pour les images entre 2014 et 2019 (Landsat 8).

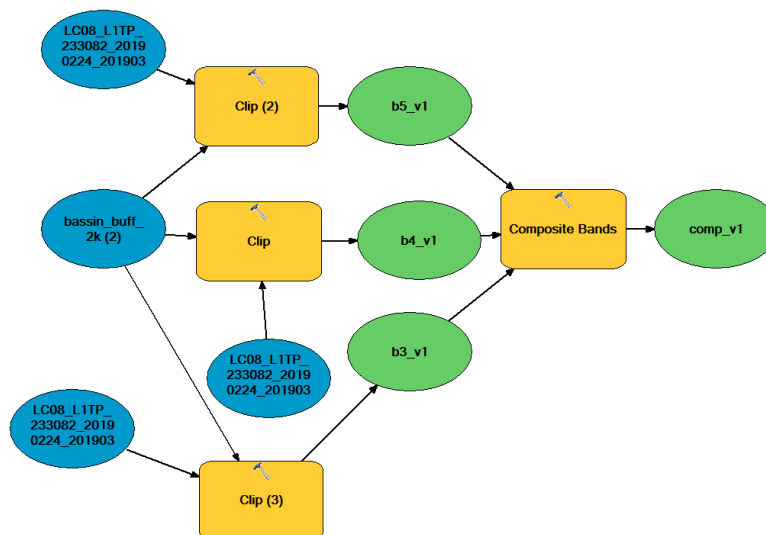


Figure 12 : « ModelBuilder » composites en ArcGIS.

³⁵ ModelBuilder peut également être considéré comme un langage de programmation visuel pour l'élaboration de flux de travail.

En raison de leur sensibilité à la chlorophylle, nous avons travaillé avec une combinaison de bandes infrarouges, exposant clairement l'emplacement des cultures d'avocats dans la région de Petorca. Grâce à l'outil des « Effects toolbar » nous avons amélioré la luminosité et le contraste de la couche. Ainsi, cette combinaison a permis par le biais de la réflectivité dans l'infrarouge et du faible niveau dans le visible, de représenter visuellement l'évolution des avocats dans la province de Petorca depuis les années 90 jusqu'à présent. La combinaison des bandes permet de mettre en évidence les variations de couleur, de texture, de tonalité et différencier les différents types de couvertures qui existent dans la province de Petorca. En effet, grâce à cette combinaison il est possible de distinguer certains aspects géologiques, la végétation et indirectement l'utilisation du sol.

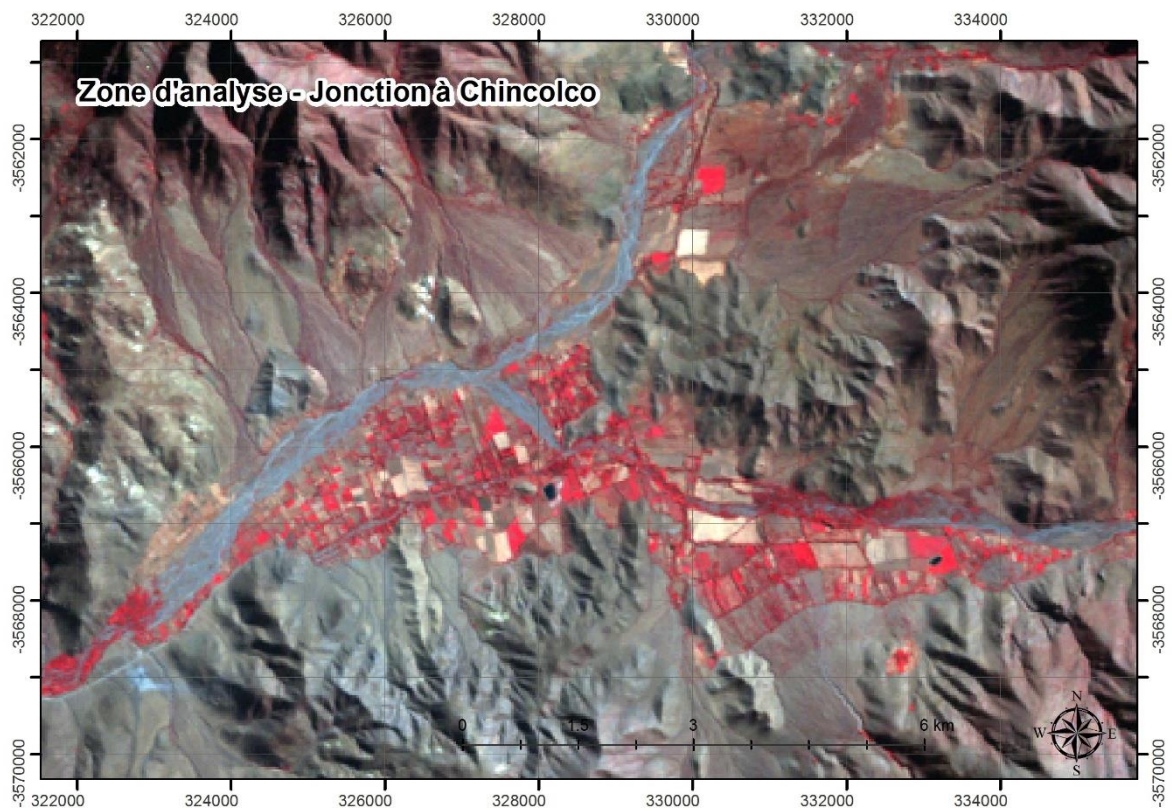
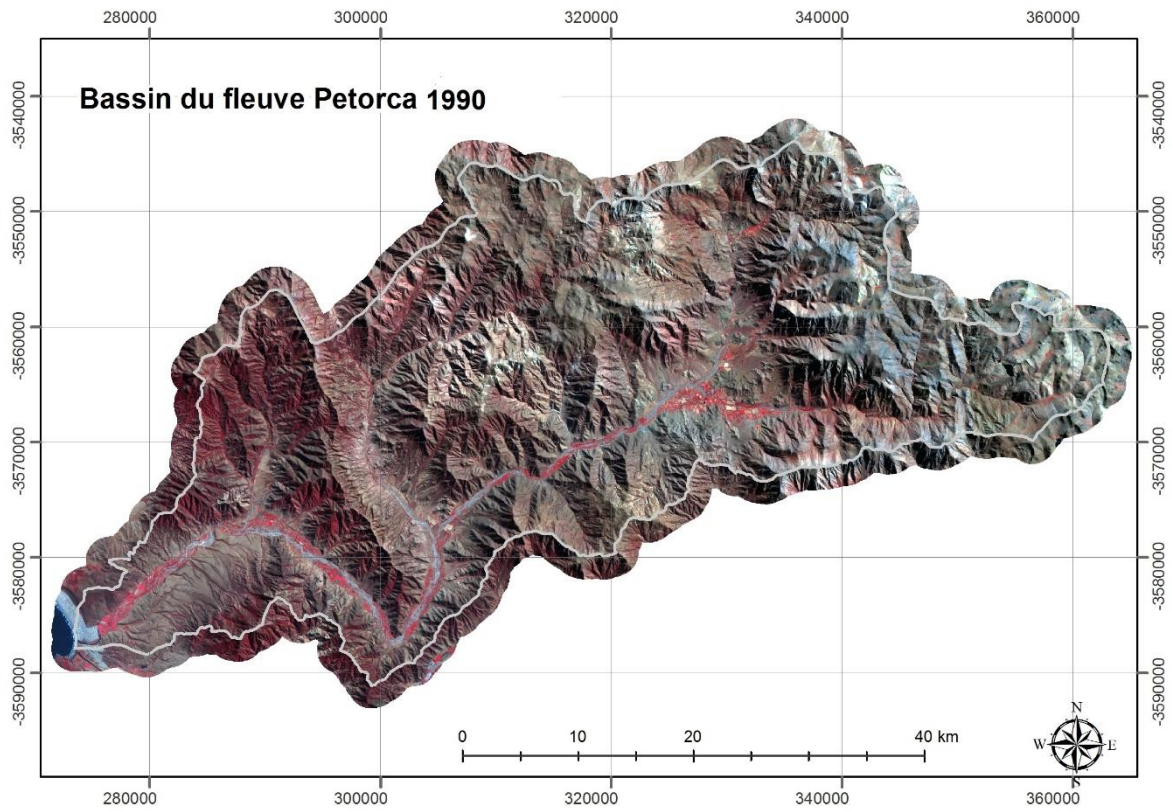
En respectant les éléments nécessaires à une cartographie, des cartes ont été réalisées, en incluant le nord, l'échelle et les coordonnées. Ces éléments ont été traités grâce aux multiples alternatives permises par la conception dans ArcGis et la modification des propriétés de sortie. Nous avons décidé d'accorder une importance non négligeable à la présentation des résultats, puisqu'il s'agit d'un principe fondamental de toute analyse SIG. La matérialisation des résultats de la recherche doit supporter une compréhension facile, rapide et intuitive des données sans discrimination entre les utilisateurs.

Présentation des résultats

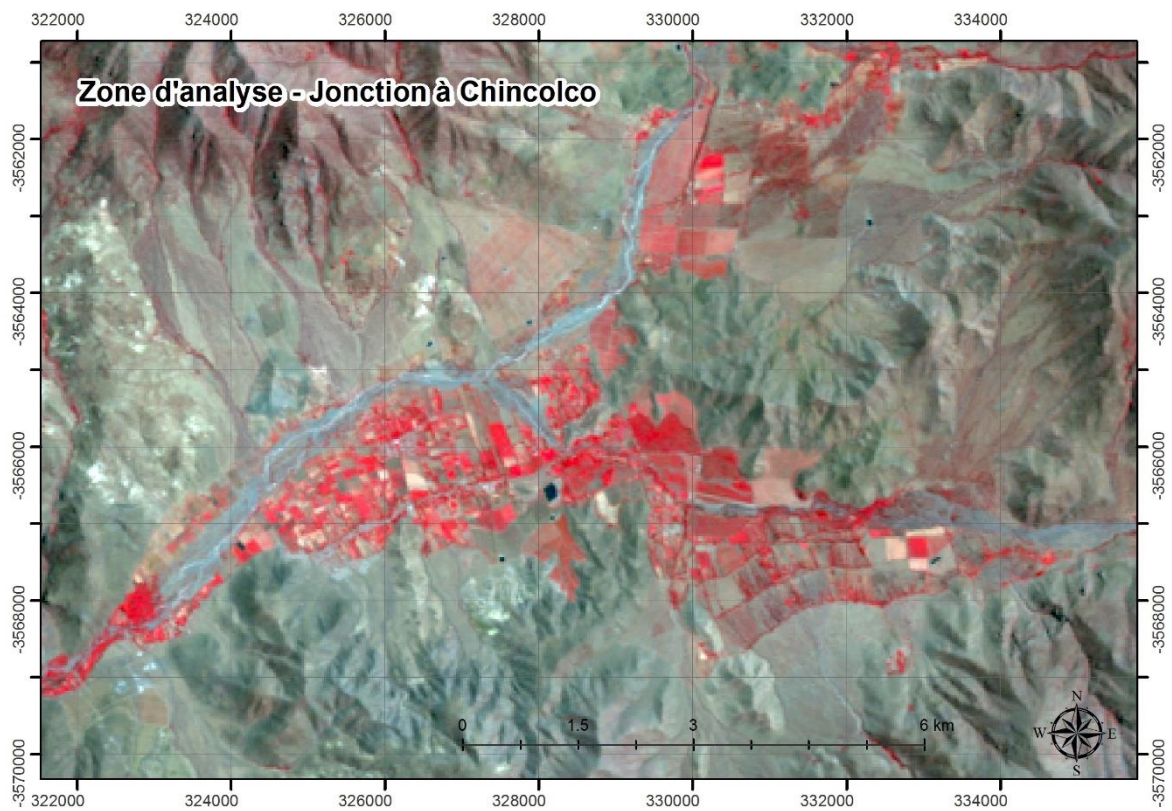
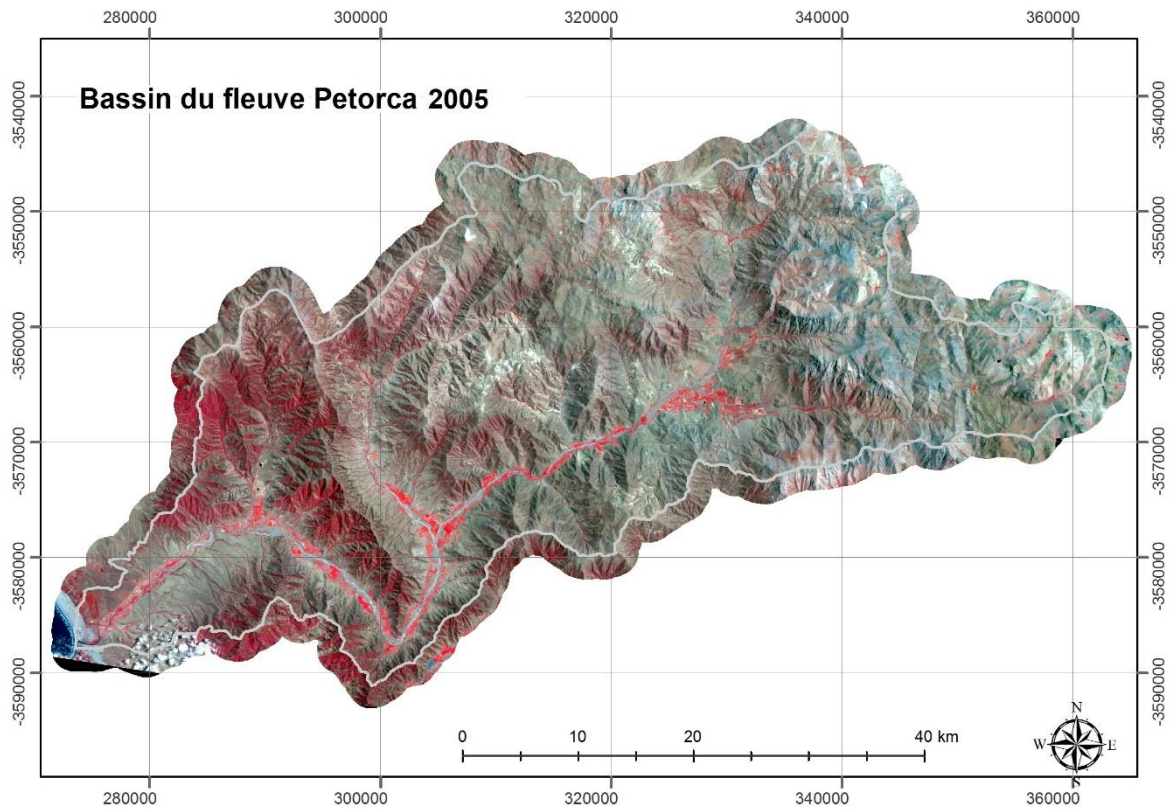
Historiquement, les petits agriculteurs de la région ont été impliqués dans la culture de denrées alimentaires pour l'autosubsistance et la commercialisation sur les marchés locaux, ainsi que dans l'élevage d'animaux. Comme l'on observe dans les cartes III, IV et V, depuis 1900 jusqu'à 2019, les grandes cultures d'avocats ont remplacé progressivement l'agriculture paysanne à petite échelle. Le vol, l'usurpation et l'accaparement d'eau par les entrepreneurs de la région ont privé aux petits agriculteurs et les habitants des quantités nécessaires à la culture familiale et à la vie. Par exemple, les droits sur les eaux de surface sont gérés par la Société de « Canalistas » (société de droit privé), qui favorise les grands hommes d'affaires monopolisant les actions. Pour survivre, le paysan est devenu un travailleur saisonnier ou un salarié agro-industriel. Malheureusement, la ville de Chincolco a été progressivement abandonnée par ses habitants, en raison de ces conditions inhospitalières.

En ce qui concerne la sécheresse dans la région, la disparition du fleuve Petorca et la Ligua ne sont pas clairement visibles. En revanche, nous observons une augmentation des énormes bassins de collecte d'eau situés près des grandes plantations commerciales d'avocats malgré le fait que les bassins des fleuves Petorca et Ligua ont été déclarés épuisés. Comme l'indique l'Institut national des droits de l'homme (INDH, 2014), malgré l'épuisement des bassins, la DGA a accordé 1362 droits d'eau dans la province, la plupart d'entre eux étant de nature souterraine. Par ailleurs, certains entrepreneurs agricoles sans scrupules ont commencé à extraire la ressource hydrique illégalement en raison du manque d'eau dans les bassins. Les allégations contre de puits et de drains illégaux dans les grandes exploitations agricoles fonctionnant avec de l'eau volée ont augmenté substantiellement, comme cela a été découvert en 2011 avec le cas de Perez Yoma et compagnie³⁶. Des plaintes répétées à la DGA ont entraîné l'exécution par cette institution de 447 dossiers pour extraction illégale d'eau entre 2010 et 2014 (INDH, 2014).

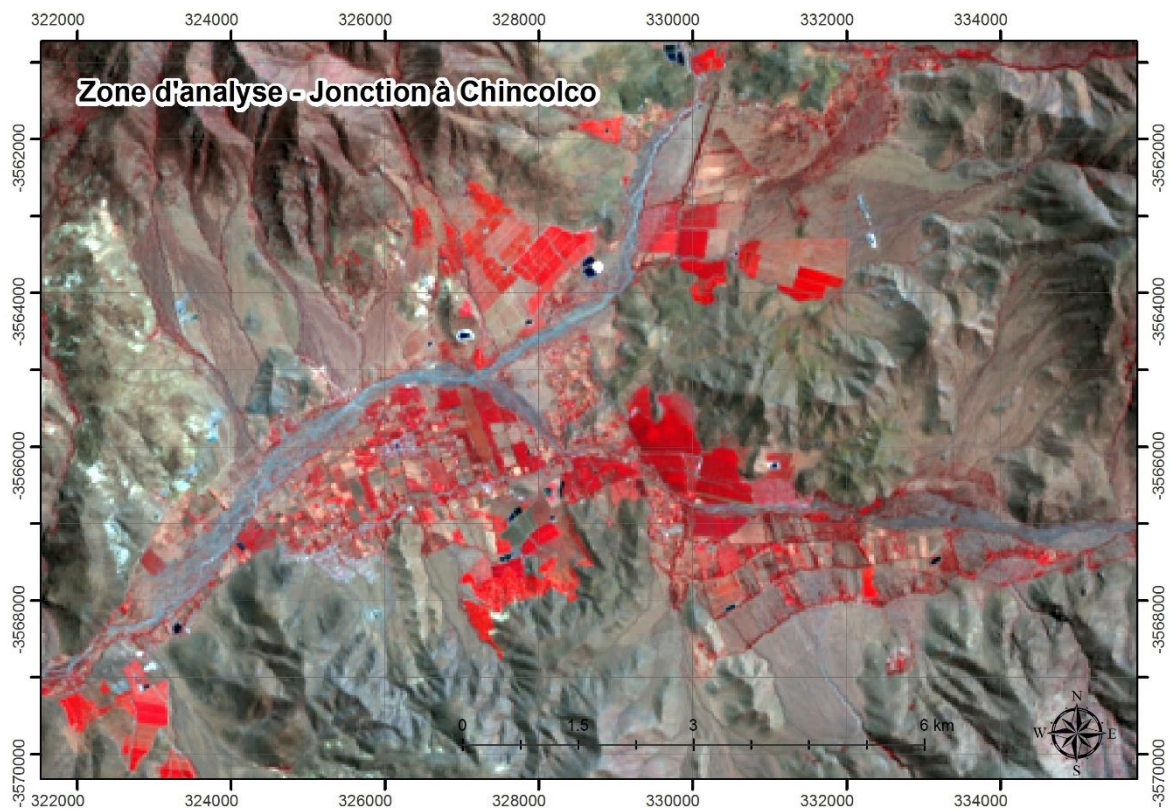
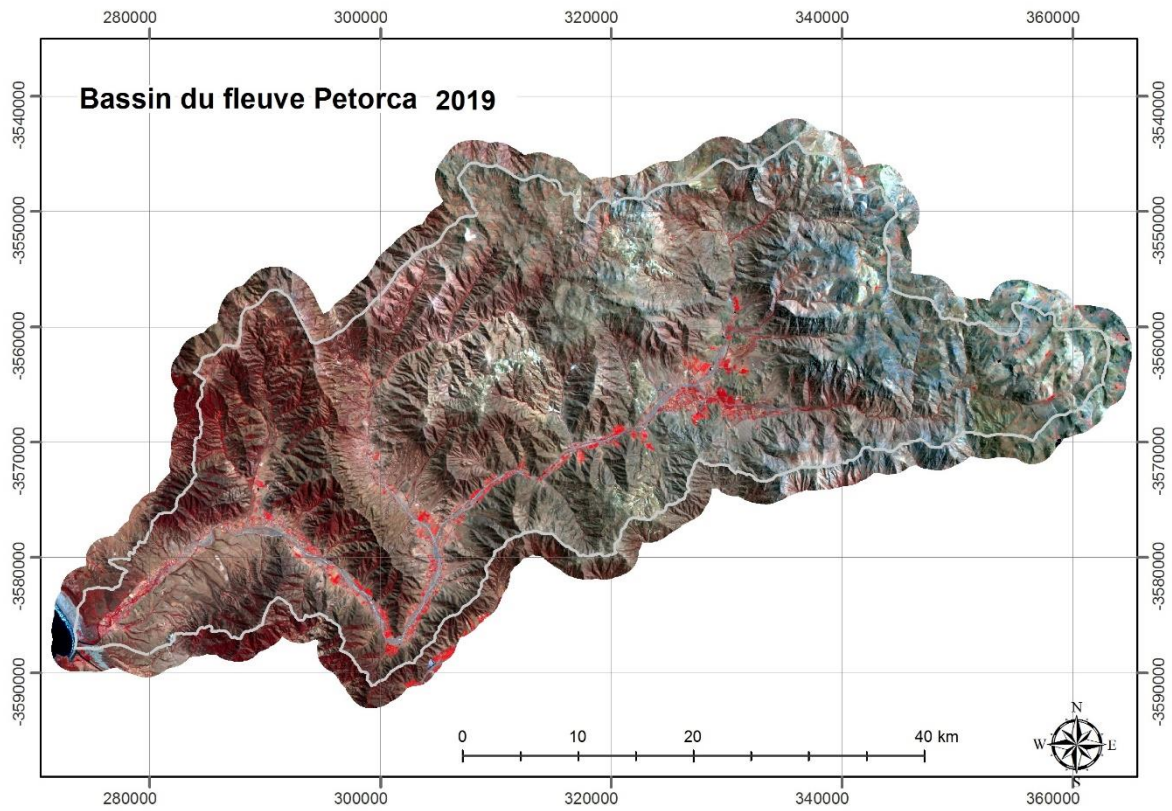
³⁶ Edmundo Pérez Yoma, ancien ministre de l'intérieur et de la défense. Pour plus d'information voir : <https://www.latercera.com/la-tercera-pm/noticia/edmundo-perez-yoma-tengo-pocos-derechos-de-agua-y-de-un-rio-que-no-corre/504283/>



Carte III : Composition fausse couleur infrarouge 4-3-2, 1990



Carte VI : Composition fausse couleur infrarouge 4-3-2, 2005



Carte V : Composition fausse couleur infrarouge 5-3-4, 2019.

B. Indice de végétation par différence normalisé (NDVI)

Méthodologie

Selon Gilabert et al (1997) un indice de végétation est un paramètre particulièrement sensible au couvert végétal et calculé à partir des valeurs de la réflectance à différentes longueurs d'onde. De ce fait, l'utilisation de ces types d'indices est basée sur le comportement radiométrique spécifique de la végétation. Une couverture végétale saine a une signature spectrale caractérisée par le contraste entre la bande rouge (entre 0,6 et 0,7 μm) principalement absorbée par les feuilles, et le proche infrarouge (entre 0,7 et 1,1 μm .) généralement réfléchi. Cette caractéristique de la végétation se traduit par une valorisation qualitative de celle-ci.

L'indice de végétation différentiel normalisé (NDVI) est calculé à l'aide de l'expression suivante :

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{IRC}-\text{R})}{(\text{IRC}+\text{R})}^{37}$$

Les valeurs des réflexions spectrales se situent entre 0 et 1, puisque la réflectivité dans le proche infrarouge et dans le rouge sont des quotients du rayonnement réfléchi par le rayonnement entrant dans chaque bande spectrale. En raison de ces fourchettes de valeurs, le NDVI oscille entre -1 et 1. Selon Monteith (1981), le NDVI tel que mentionné ci-dessus à une grande valeur en termes écologique, puisqu'il est un bon estimateur de la fraction du rayonnement photo- synthétiquement actif intercepté par la végétation. Des valeurs NDVI élevées correspondent à des zones qui réfléchissent davantage dans le spectre de l'infrarouge proche. Une réflectance du NIR plus élevée correspond à une végétation plus dense et plus saine (GU, 2019³⁸).

Dans le calcul du NDVI, les images de Landsat 8 ont été travaillées avec les bandes 4 et 5, tandis que celles obtenues par le Landsat 5 avec les bandes 3 et 4 considérées respectivement comme hautement et faiblement réfléchissantes. Par conséquent, plus la différence entre les deux bandes est importante, plus le pourcentage de couverture végétale est élevé, ce qui a permis d'identifier les cultures d'avocats. En divisant l'indice par la somme de ces deux réflectivités, on compense à la fois l'effet de luminosité et l'effet de l'atmosphère.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}} \quad \text{NDVI} = \frac{\text{Banda 4} - \text{Banda 3}}{\text{Banda 4} + \text{Banda 3}}$$

Comme dans le cas du composite, nous avons travaillé avec l'outil « ModelBuilder » (Annexes n), en incluant le « buffer », le « clip » et l'outil « Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator ». Nous avons ensuite adapté les bandes selon l'année et le Landsat correspondant. Pour mieux distinguer le NDVI, nous l'avons reclassé en 10 catégories en choisissant une échelle de couleur rouge-vert pour une meilleure représentation de la végétation.

Le NDVI est un indice normalisé, qui varie donc de -1 à +1. Les valeurs proches de 1 indiquent une végétation vigoureuse. Les valeurs positives proches de 0 représentent les zones rocheuses et nues qui peuvent acquérir une certaine végétation jusqu'à ce que des valeurs proches de 0,3 soient atteintes. Les valeurs proches de -1 correspondent au sol nu, à la neige ou à l'eau. Plus précisément, des prairies ou de la végétation éparses auront un indice entre 0.2 et 0.4. Un indice entre 0.4 et 0.6 indique une végétation modérée et plus de 0.6 représentera une végétation plutôt dense dans notre cas des avocatsiers ou bien

³⁷ IRC est la réflectivité dans le proche infrarouge et R est la réflectivité dans le rouge.

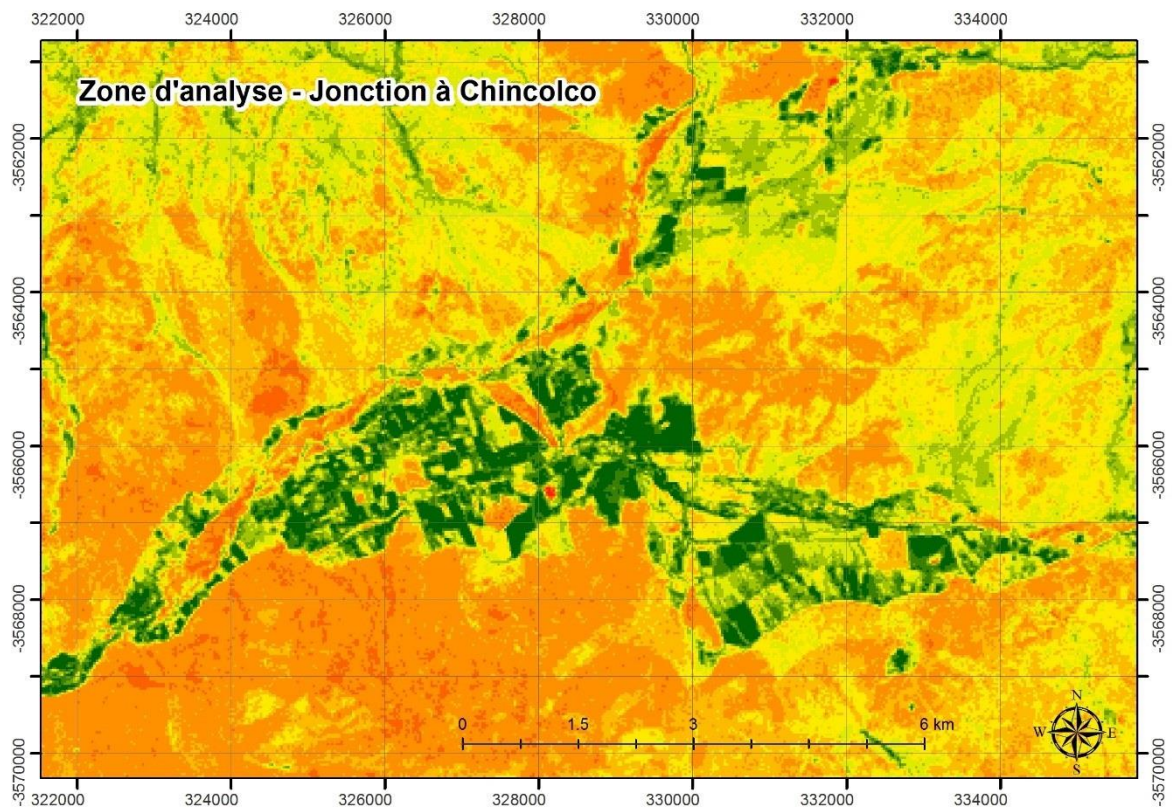
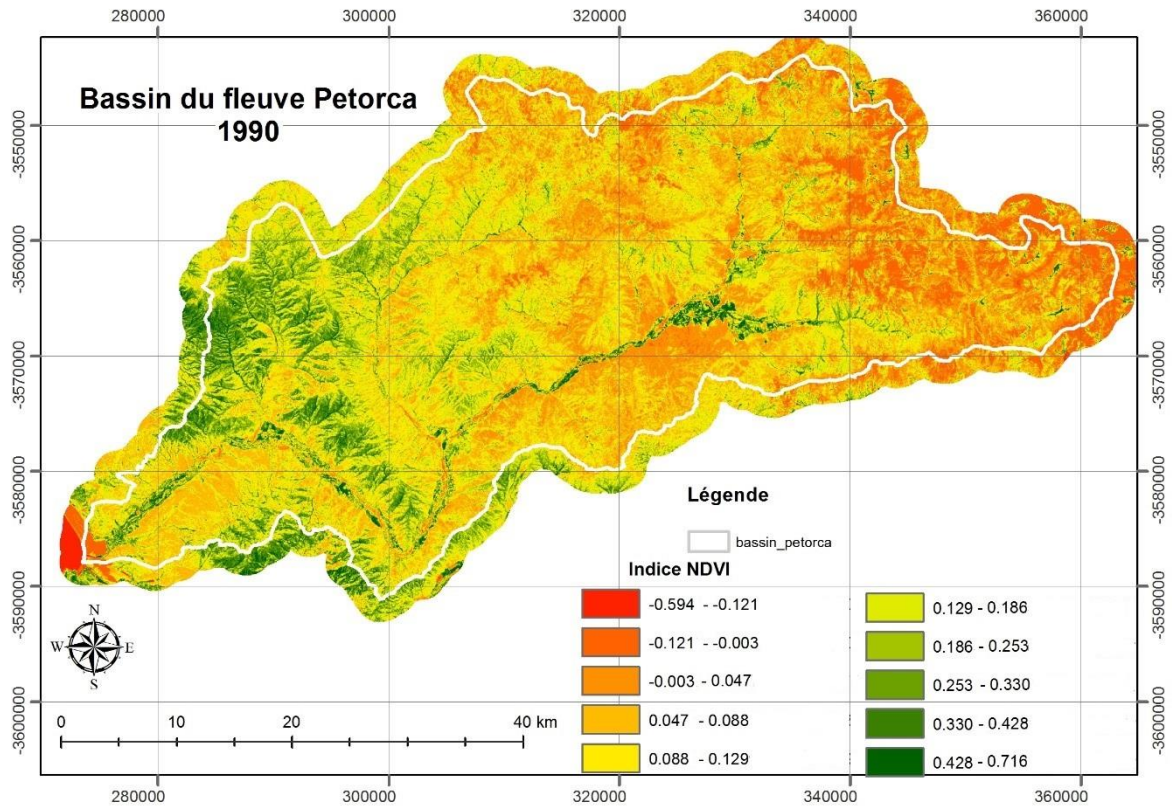
³⁸ Pour plus d'information voir : <https://www.geo.university/pages/spectral-indices-with-multispectral-satellite-data>

des forêts. Ces indices peuvent être appréciés visuellement et ils sont comparables avec d'autres analyses comme une carte en vraies couleurs ou sur le terrain, car les seuils d'indices sont indicatifs et peuvent légèrement varier selon la période végétative ou le type de couverture végétale de la zone d'étude. En effet, il est important de souligner que la floraison, l'existence d'un sol exposé, la présence de masses d'eau ou la perte de feuilles peuvent fortement influencer les valeurs NDVI.

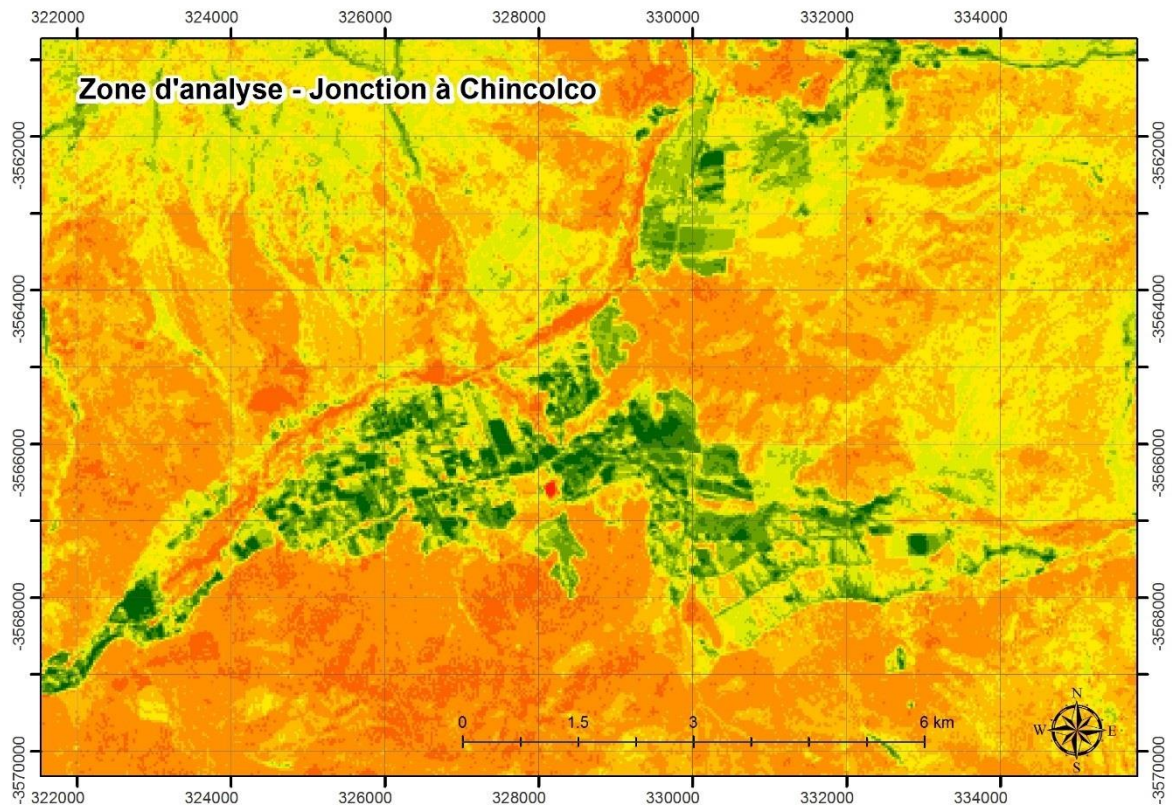
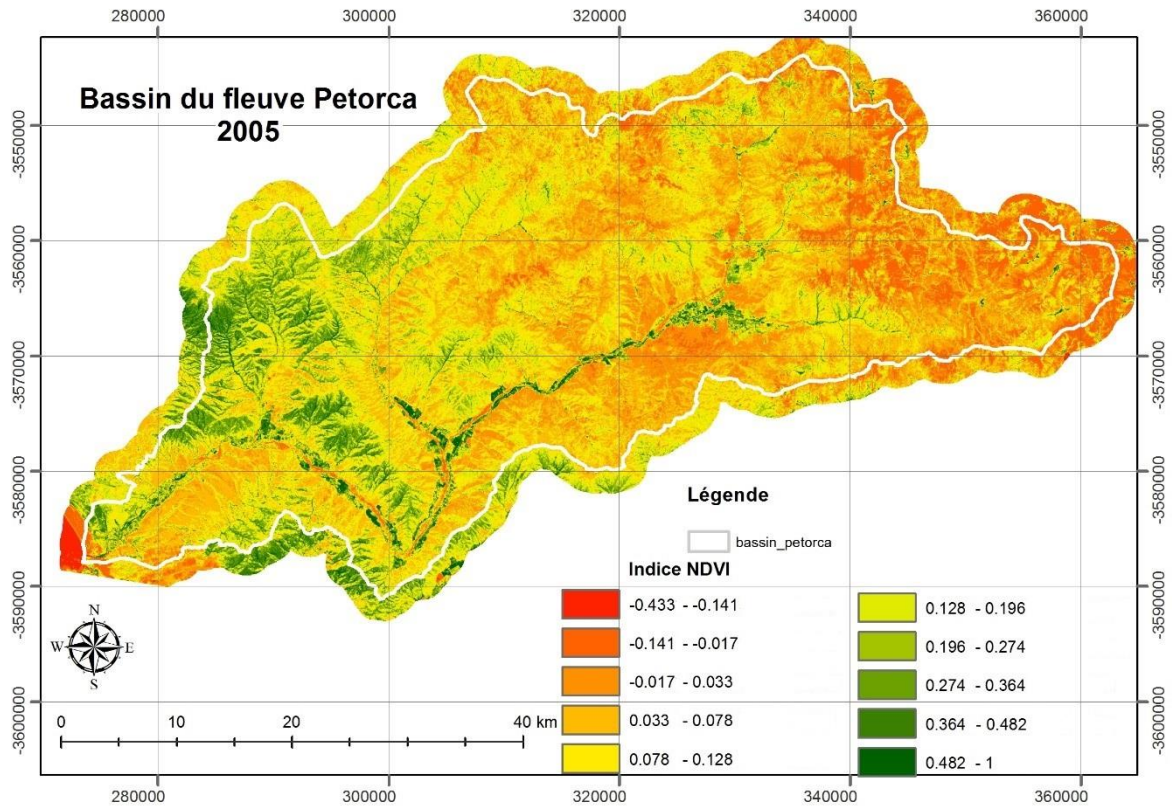
Présentation des résultats

Au travers de l'indice de végétation NDVI il est possible de voir, l'augmentation des terrains nus et de la végétation éparse, ceci s'explique pour la sécheresse qui affecte la province depuis les années 1990. Il est intéressant à noter que les catégories de végétation dense n'ont pas énormément fluctué depuis les années 90. Cela est très inquiétant, car cette année correspond à une période de surexploitation ou bien de « boom agricole » et 2019 à une année marquée pour la sécheresse que finalement représente au peu près des valeurs similaires. Nous observons dans la carte des nouvelles grandes extensions des cultures des avocats dans la zone. Comme mentionné précédemment ce phénomène est dû à une utilisation peu scrupuleuse de la ressource hydrique et à un régime institutionnel de type néolibéral et entrepreneurial qui soutient l'exploitation des monocultures pour l'exportation.

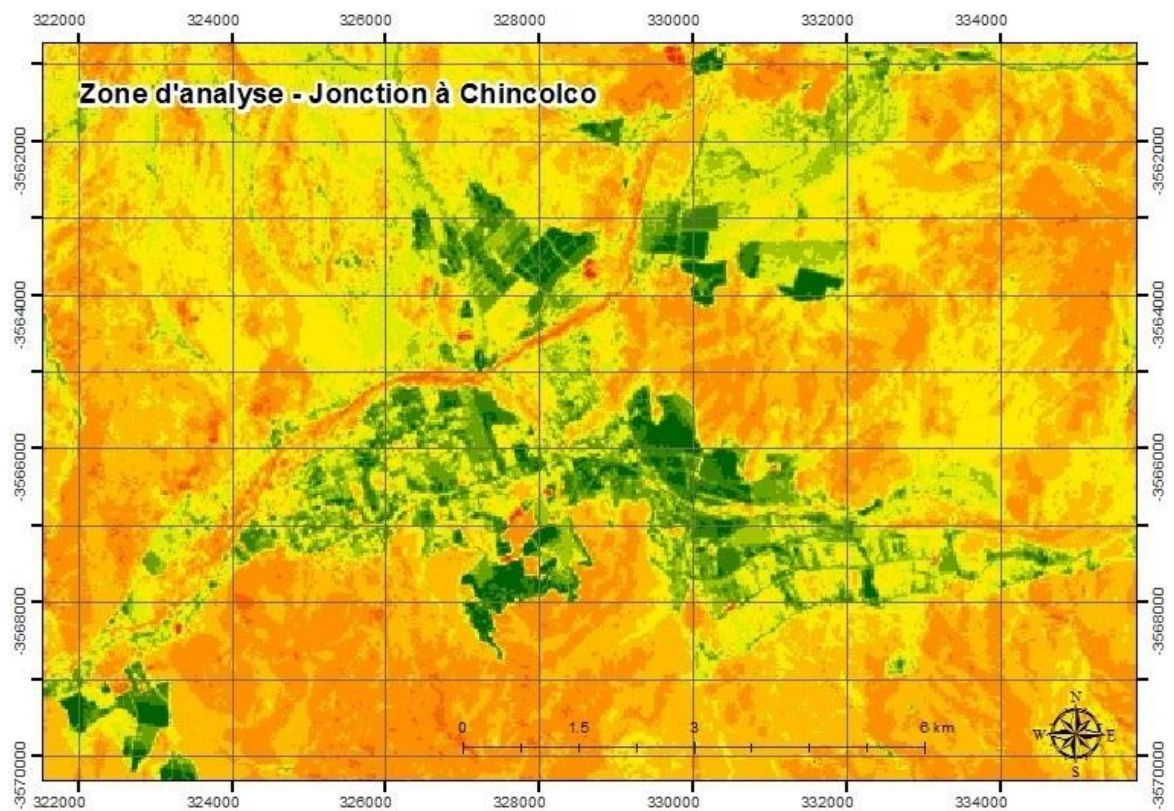
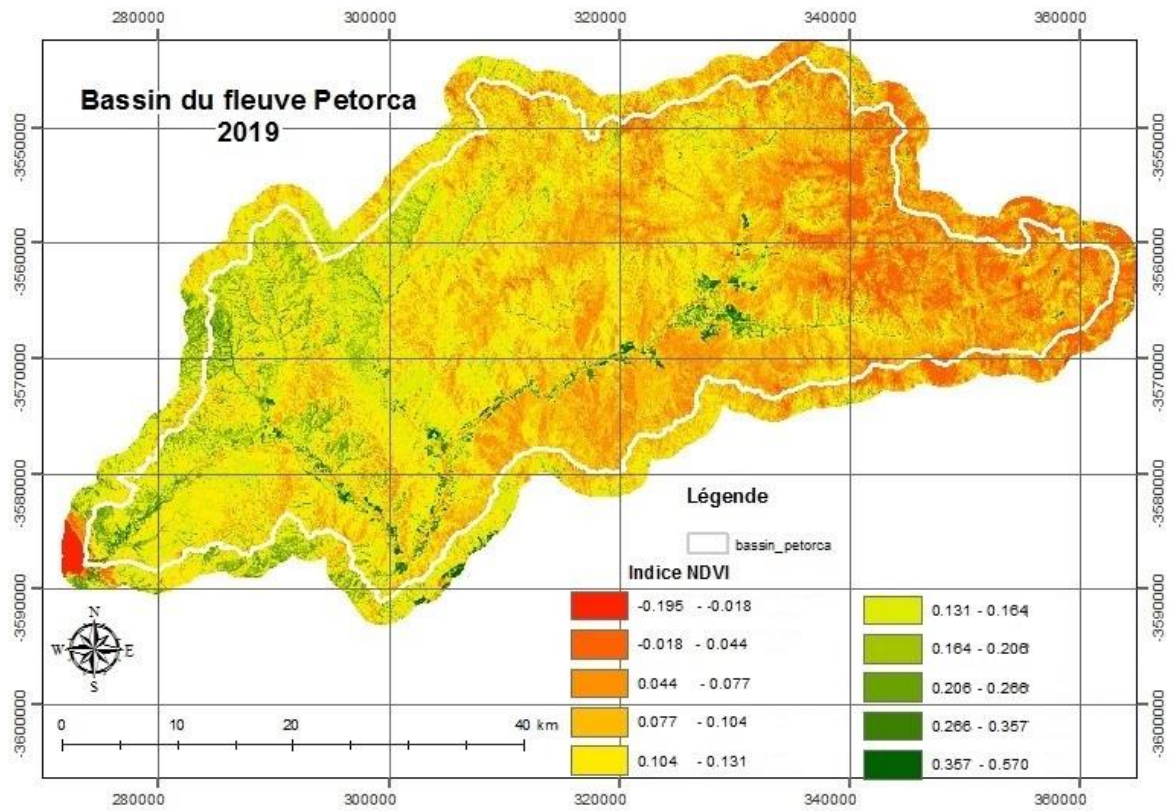
Si l'on compare la superficie des avocatiers entre 1990 et 2019 dans la province de Petorca, il est possible de constater une redistribution spatiale des avocatiers sur les pentes du bassin hydrographique de Petorca, des zones considérées comme marginales pour l'exploitation fruitière. Les plantations fruitières à flanc de coteau se sont de plus en plus développées dans les différentes vallées agricoles du pays, introduisant des changements dans l'utilisation des terres et des écosystèmes très fragiles, tant par l'équilibre entre les facteurs topographiques, la végétation et le sol (CIREN, 2017). Cette situation s'explique par l'utilisation de nouvelles technologies telles que l'irrigation technique et aux changements dans la gestion agronomique, entre autres facteurs. Ces nouveaux systèmes n'étaient généralement pas utilisés par les petits agriculteurs, car il était impossible d'irriguer ces terres avec des méthodes abordables pour les petits paysans. Les grands agriculteurs cependant ont pu exploiter ces terres en raison du capital économique disponible pour l'acquisition des nouvelles technologies et du soutien de l'État, par le biais de projets d'amélioration de l'irrigation. Toutefois, l'avocatier s'est développé aussi de manière sectorielle, par exemple, sur les sols plats. Cela peut s'expliquer par la forte rentabilité des avocats et sa demande croissante dans les marchés internationaux.



Carte VI : Indice de végétation par différence normalisé, 1990



Carte VII : Indice de végétation par différence normalisé, 2005



Carte VIII : Indice de végétation par différence normalisé, 2019

C. Indice de teneur en eau par différence normalisée (NDWI)

Méthodologie

L'indice de teneur en eau par différence normalisée est basé sur la télédétection et sensible à la variation du pourcentage en eau des feuilles (Gao, 1996). Il permet d'analyser les masses d'eau grâce aux canaux proches infrarouge (NIR) et infrarouge à ondes courtes (SWIR). La réflectance SWIR reflète les changements dans la teneur en eau de la végétation et dans la structure mésophylle spongieux des couverts végétaux, alors que la réflectance NIR est affectée par la configuration interne des feuilles et la teneur en matière sèche des feuilles (European Commission³⁹).

La combinaison du NIR et du SWIR élimine les variations induites par la structure interne des feuilles et la teneur en matière sèche des feuilles, en améliorant ainsi la précision de la récupération de la teneur en eau de la végétation (Ceccato et al. 2001). La quantité d'eau disponible dans la structure interne des feuilles contrôle la réflectance spectrale dans l'intervalle SWIR du spectre électromagnétique. La réflectance SWIR est donc négativement liée à la teneur en eau des feuilles (Tucker 1980).

Le NDWI peut améliorer efficacement l'information sur l'eau dans la plupart des cas. Il est sensible à l'accumulation de sol et entraîne une surestimation des masses d'eau. Les produits NDWI peuvent être utilisés en conjonction avec les produits de changement NDVI pour évaluer le contexte des zones de changement apparent (Bahadur, 2018⁴⁰). L'équation pour le NDWI est la suivante:

$$NDWI_t = \frac{NIR_t - SWIR_t}{NIR_t + SWIR_t}$$

$$NDWI \text{ (Landsat 8)} = (B3 - B5) / (B3 + B5)$$

$$NDWI \text{ (Landsat 5)} = (B2 - B4) / (B2 + B4)$$

Comme dans le cas du composite, nous avons travaillé avec l'outil « ModelBuilder » (Annexes n), en incluant le « buffer », le « clip » et l'outil « Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator ». Nous avons ensuite adapté les bandes selon l'année et le LandSat correspondant. Pour mieux distinguer le NDWI, nous l'avons reclassé en 10 catégories en choisissant une échelle de couleur rouge-bleu pour une meilleure représentation des corp d'eau. Pour la carte, nous avons modifié l'esthétique de la légende, à travers le dégroupage des éléments et en changeant la police.

L'interprétation de la NDWI permet de différencier les zones ayant des problèmes de stress hydrique dans la province de Petorca. Les valeurs de l'indice NDWI varient entre -1 et 1. Il n'est pas possible d'établir des valeurs d'interprétation spécifiques de cet indice pour chaque type de sol et de culture, car ces valeurs peuvent fluctuer (Vargas, 2017⁴¹). Les valeurs élevées de l'indice NDWI (en bleu)

³⁹ Pour plus d'information voir : https://edo.jrc.ec.europa.eu/documents/factsheets/factsheet_ndwi.pdf

⁴⁰ Pour plus d'information voir : <https://www.linkedin.com/pulse/ndvi-ndbi-ndwi-calculation-using-landsat-7-8-tek-bahadur-kshetri/>

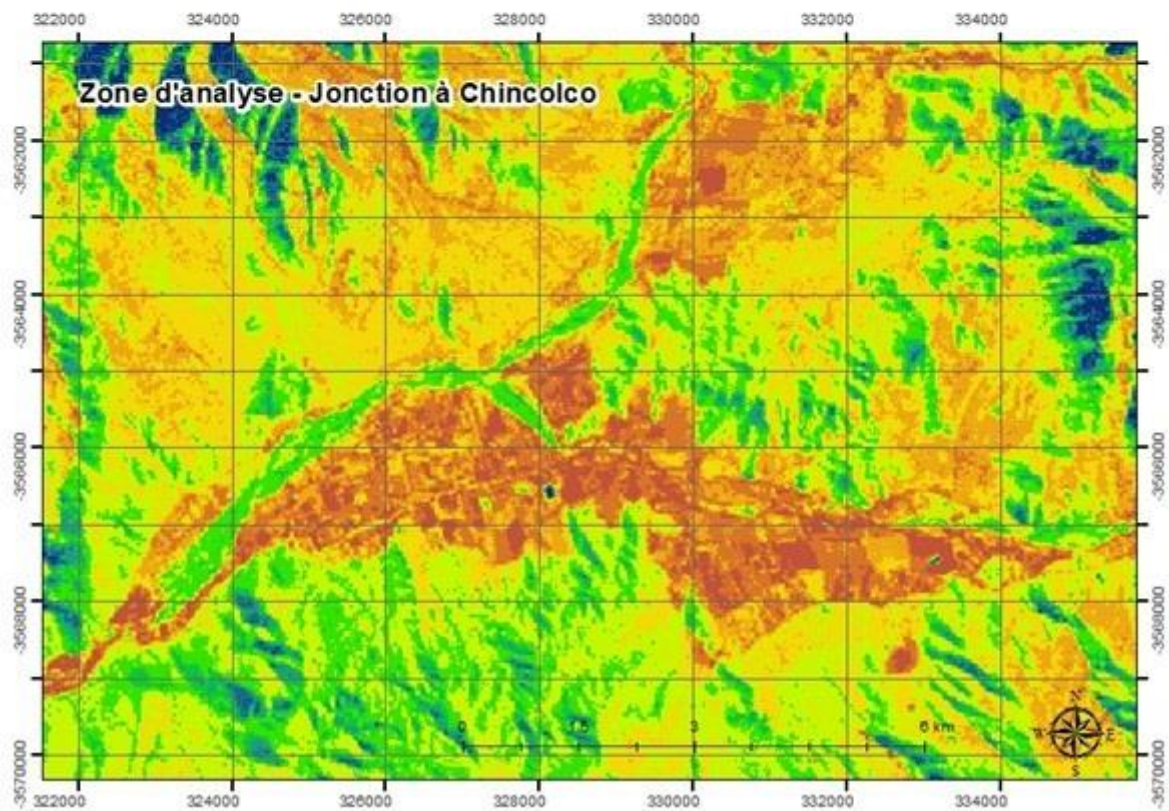
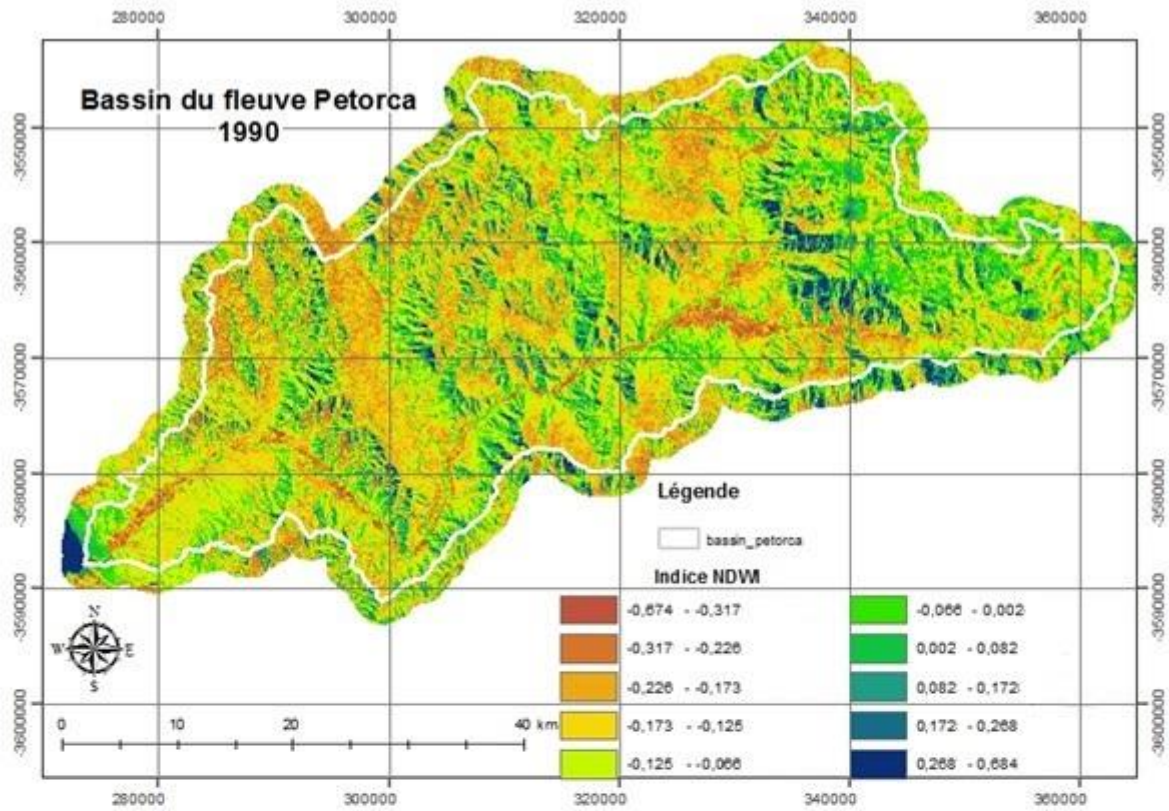
⁴¹ Vargas, N. H. (2017). Implementación de bio-modelos estimativos de la calidad ecosistémica en el nevado del cocuy al año 2030 producto del retroceso glaciar. Bogota D.C.

correspondent à une teneur en eau accrue dans la plante. Pendant les périodes de stress hydrique, la valeur de cet indice diminue.

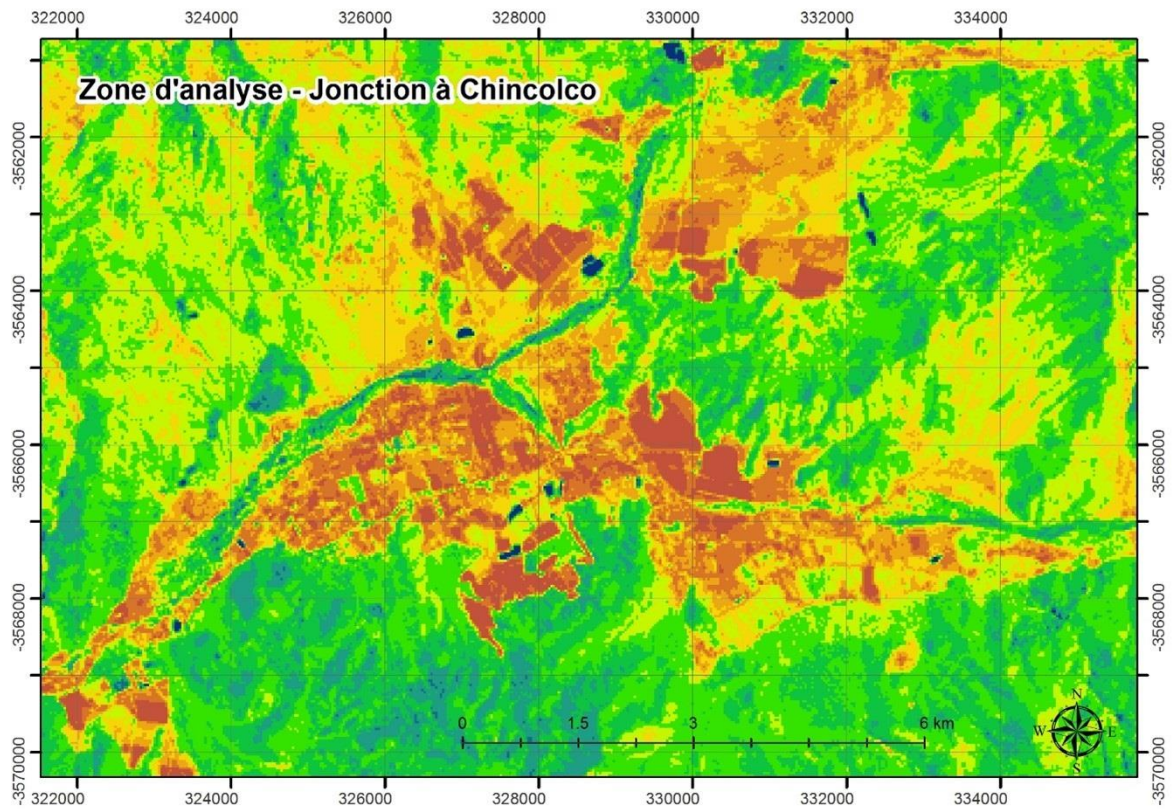
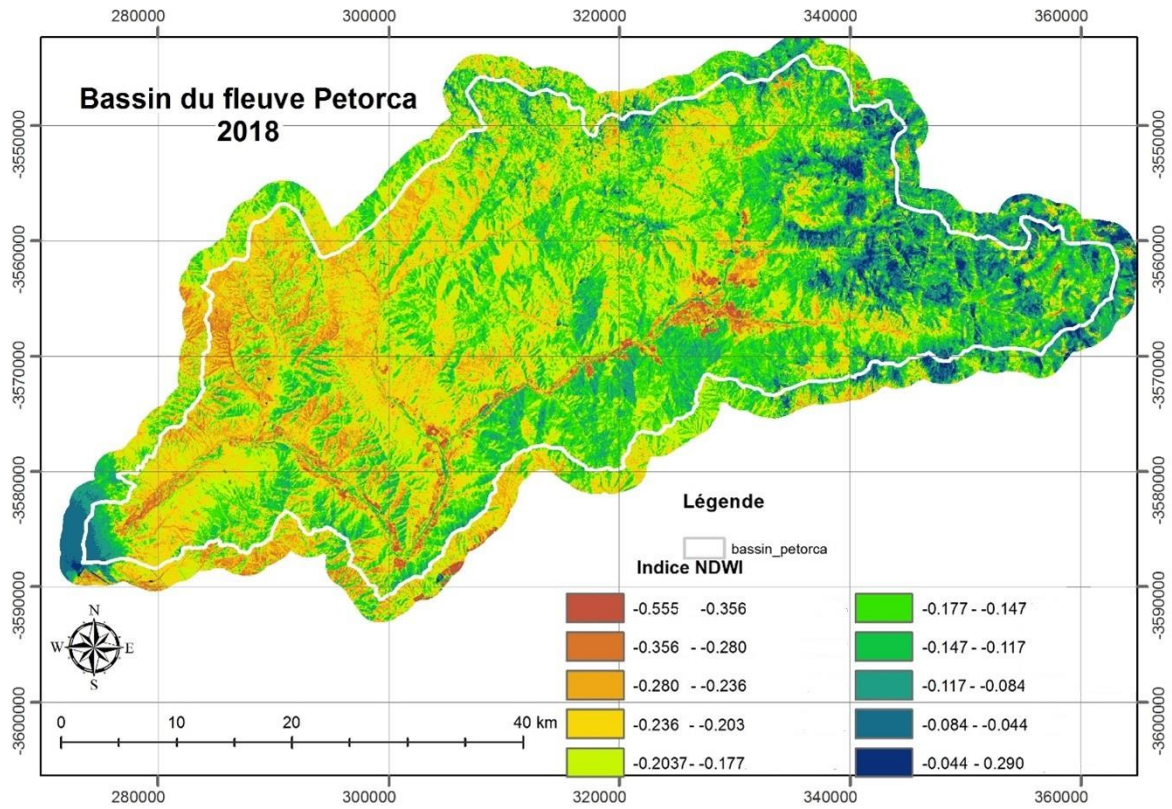
Présentation des résultats

Au travers du NDWI, nous observons que depuis 1900 jusqu'à présent les valeurs de l'indice ont diminué régulièrement, représentant des cultures souffrant du stress hydrique dans une zone de sécheresse. Cependant, certaines catégories associées au corps d'eau ont augmenté. Ceux-ci correspondent aux bassins de collecte d'eau des agro-industries pour la culture de l'avocat et des agrumes. Sur la carte de 2018, les bassins de collecte d'eau près des vastes plantations d'avocats sont clairement visibles, mais en 2019, on les voit en moins grande quantité. Cela s'explique par le scandale international et national concernant l'octroi de droits et l'utilisation de l'eau dans la province de Petorca pour la production d'avocats. La plupart de ces bassins de récolte étaient complètement hors la loi, et après des inspections publiques, ils ont dû être vidés.

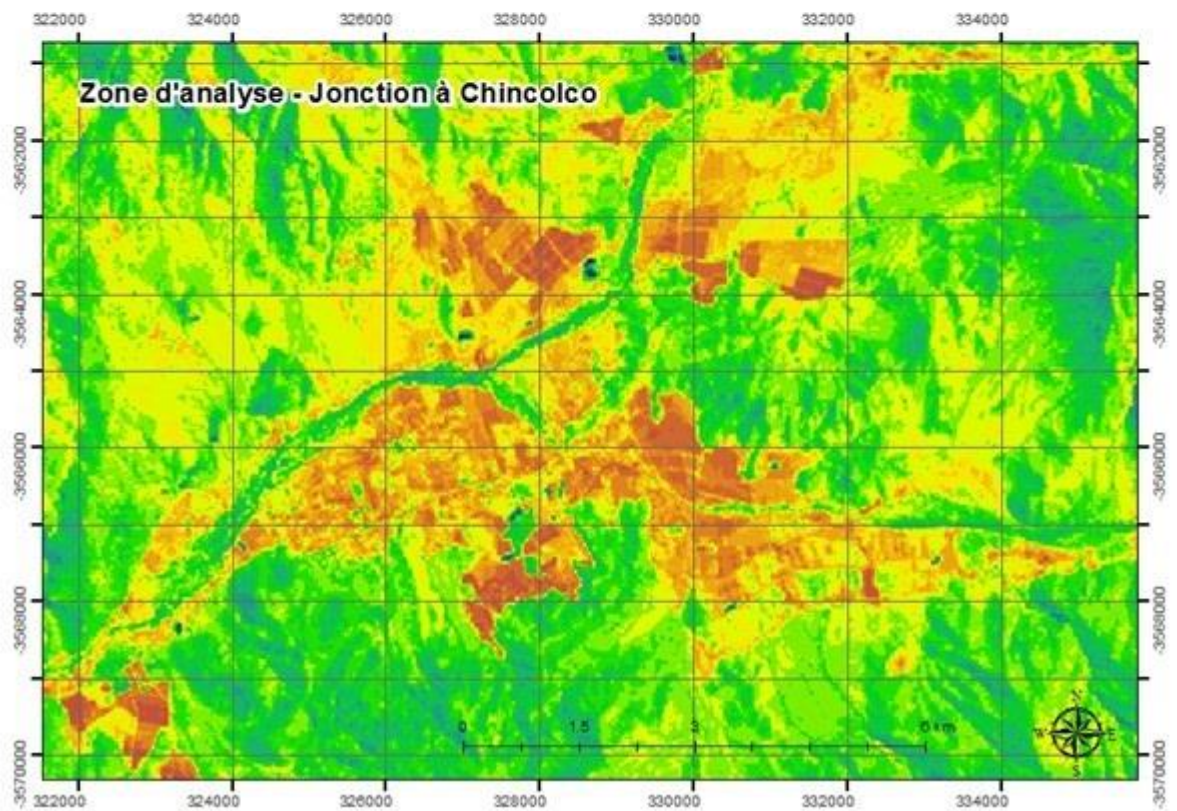
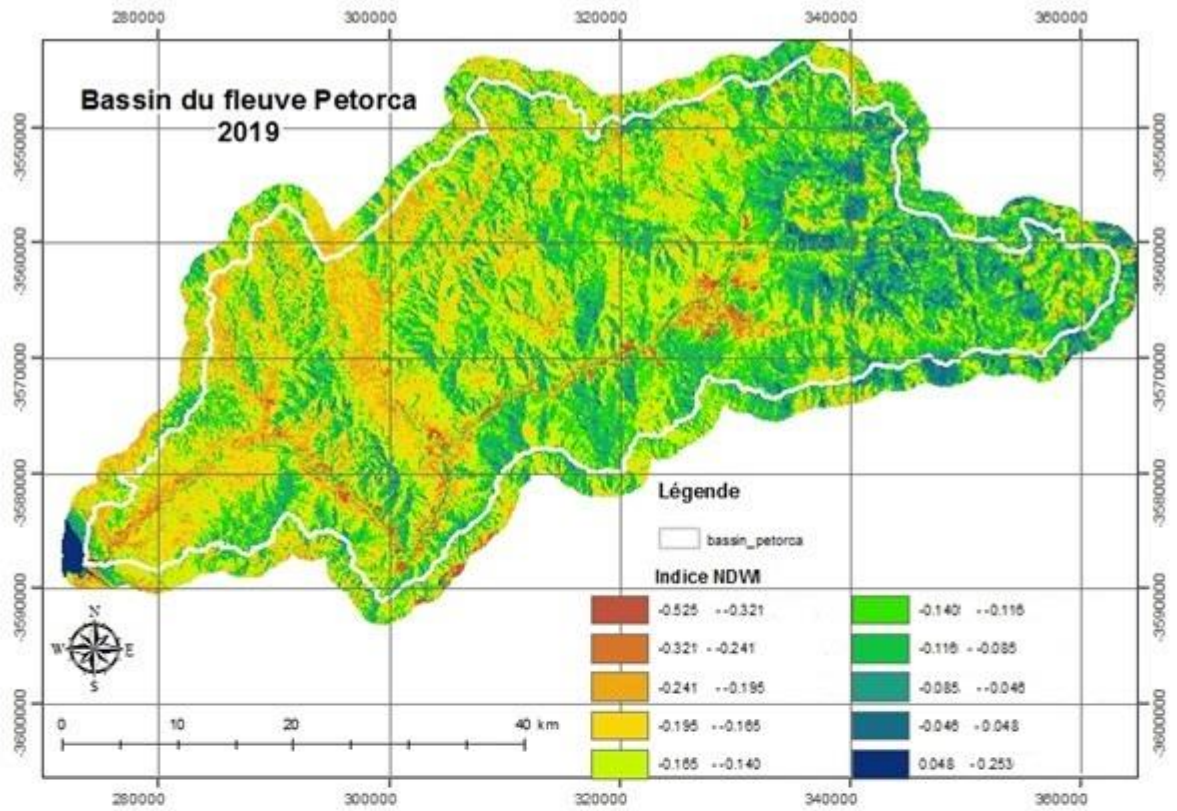
Il existe également une variation des masses d'eau de surface située dans les zones supérieures, moyenne et inférieure du bassin. Contrairement à la légère fluctuation du volume d'eau dans la zone supérieure du bassin, une diminution est observée dans les zones centrale et inférieure. Cela serait lié aux droits de consommation d'eau accordés dans le bassin, qui, dans les zones basses et moyennes, ont commencé en 1987, ont doublé en 2000 et ont augmenté de 1200% en 2018. À ce jour, un volume similaire à 15 % des précipitations moyennes annuelles dans le bassin est accordé comme droit de consommation pour les eaux de surface, et un pourcentage similaire est accordé comme droit de consommation pour les eaux souterraines. Ces prélèvements se superposent aux déficits pluviométriques enregistrés au cours de la dernière décennie, aggravant les effets des conditions météorologiques.



Carte IX : Indice de teneur en eau par différence normalisée, 1990



Carte XI : Indice de teneur en eau par différence normalisée, 2018



Carte XI : Indice de teneur en eau par différence normalisée, 2019

D. Analyse tendancielle

Afin d'obtenir une estimation quantitative de l'évolution des cultures d'avocats dans la province de Petorca, l'indice NDVI a été reclassifié. L'analyse des sols dans la province de Petorca n'est pas une tâche facile, car la zone centrale et septentrionale du Chili comporte des zones hétérogènes qui sont difficiles à différencier (figure 13). Cette situation est la conséquence de changements brusques dans les gradients environnementaux (tels que l'altitude ou la température) et aussi a de facteurs anthropiques. Il est important de remarquer que la zone d'étude possède une structure spatiale du paysage complexe, présentant une grande variabilité des schémas spatiaux et fortement fragmentés.



Figure 13 : Différents types de sols à Petorca

Subséquentement d'avoir fait une classification supervisée qui ne correspondait pas précisément aux catégories de végétation créées, le choix s'est porté sur une méthodologie alternative à la classification supervisée et non supervisée. Dans un premier temps, un databasefile a été créée et les coordonnées correspondant au territoire d'étude ont été ajoutées (WGS 1984 19 S). Ensuite, comme le montre la figure 12, le NDVI a été reclassé en 15 catégories à l'aide de l'outil " reclassify spatial 3D ". Ensuite, nous l'avons transformé en polygone « raster to polygon », et nous avons exporté les données.

Pour réduire le nombre d'entités de la couche, nous avons fait une sélection par attributs en langage SQL. Nous avons adapté à notre cas d'étude la classification proposée par Carvacho et Sánchez (2010). Les catégories sélectionnées correspondent donc à : forêt humide, forêt sèche, buisson sec, buisson humide, terres agricoles, autres cultures et cultures d'avocats. Dans cette nouvelle catégorie de données, la surface a été ajoutée et leur géométrie en km a été calculée. Enfin, une somme de ces valeurs a été faite. Un tableau avec les valeurs a été exporté, qui a été par la suite travaillé en Excel pour pouvoir faire une analyse de tendance des surfaces et des cultures à Petorca depuis les années 90 jusqu'à 2019.

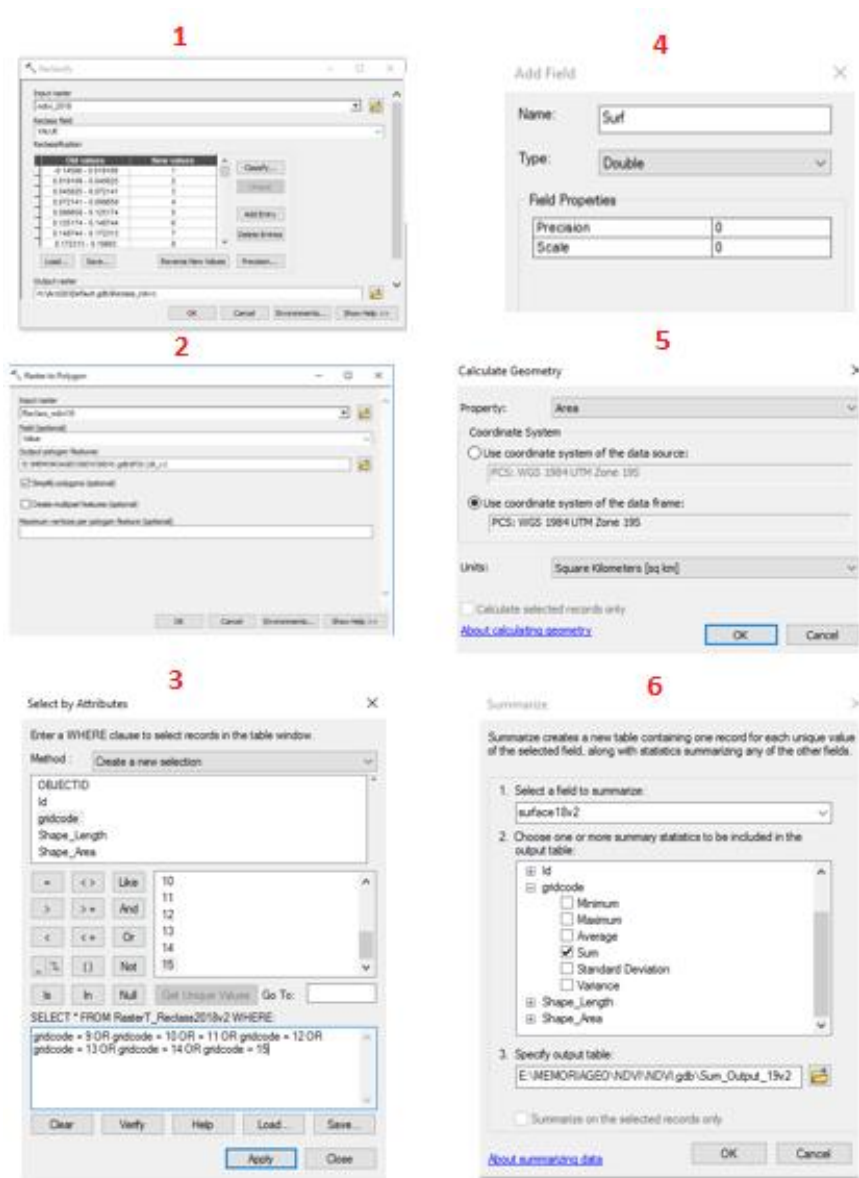
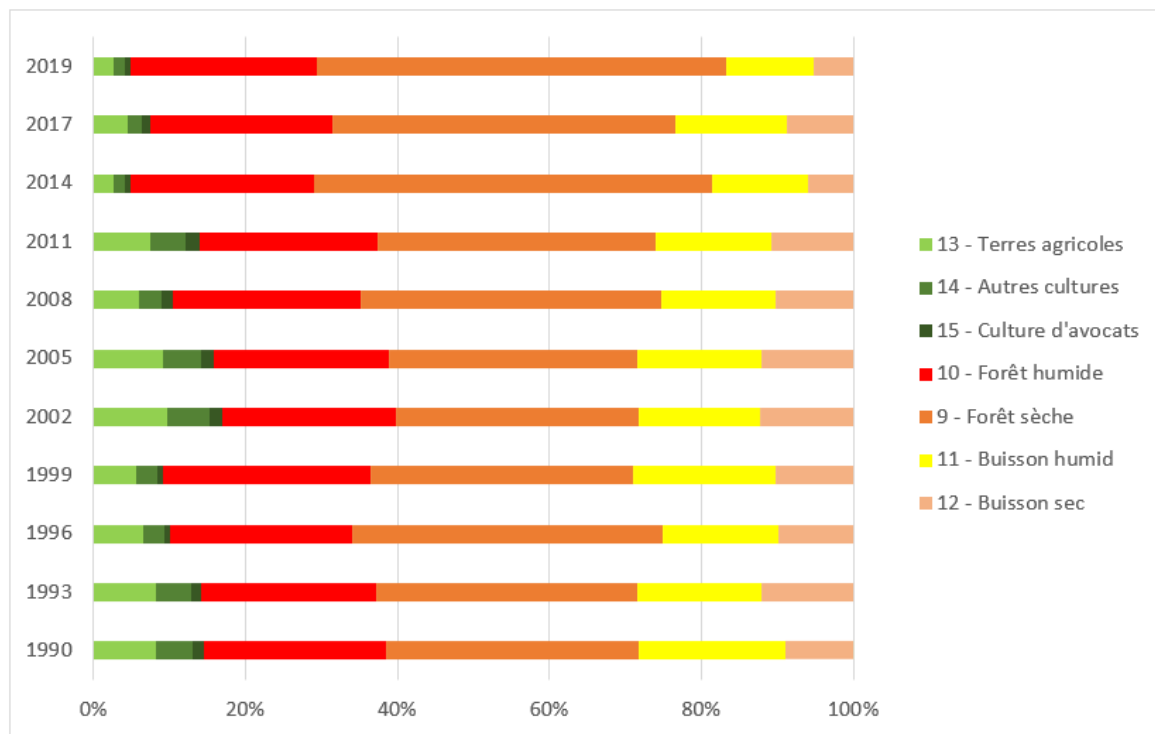


Figure 14: Processus reclassification NDVI

Présentation des résultats

Il est intéressant de constater que visuellement (carte XII et XIII), l'on pourrait penser que la quantité de surfaces cultivées en avocatier est moins prédominante que dans les années 90. Cependant, comme cela a été expliqué précédemment, on a assisté à un décroissement progressif des cultures familiales qui ont été remplacées par de grandes cultures industrielles d'avocats, d'agrumes et, actuellement, de noyers destinés à l'exportation. Cette augmentation est principalement due aux inégalités dans l'accès à l'eau. Les grandes entreprises ont progressivement concentré l'activité agricole, en rachetant les actions liées à l'eau, laissant des hectares dépourvus de la ressource et, par conséquent, impossibilités d'effectuer le moindre travail agricole. En effet, la persistance des cultures d'avocats s'explique, entre autres facteurs, par le fait que les droits d'exploitation sont généralement des eaux souterraines, de sorte que les entreprises d'avocateurs placent des drains illégaux. Le manque de disponibilité des eaux de surface a conduit à une extraction intensive des eaux souterraines. Une étude de la Commission nationale de l'irrigation détermine que le bilan des eaux souterraines du bassin montre une réduction significative des

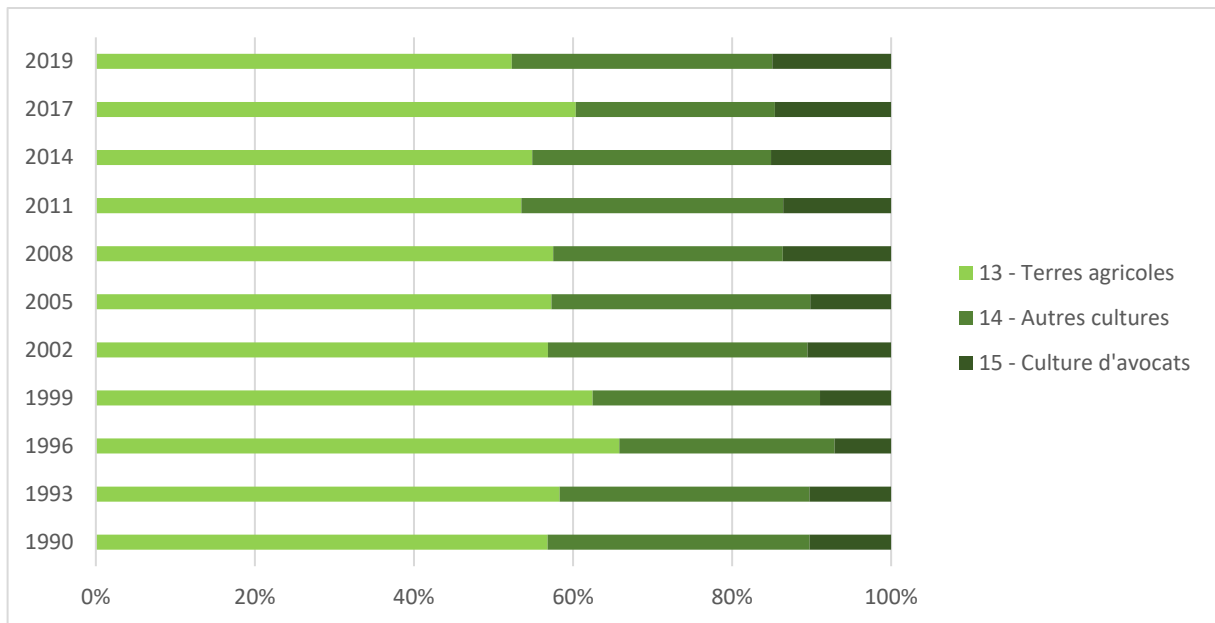
rejets d'eau dans la mer entre 1950 et 2010, estimant à 91 millions de mètres cubes la baisse moyenne du volume stocké pendant cette période (CNR, 2011). Dans cette même étude, il est avancé que les bassins sont en situation de déséquilibre, car l'extraction annuelle des eaux souterraines atteint en moyenne 1 600 l/s, tandis que la recharge n'étant que de 870 l/s (CNR, 2011). Il existe un déficit annuel moyen de 730 l/s, entraînant une diminution progressive de la nappe phréatique des bassins.



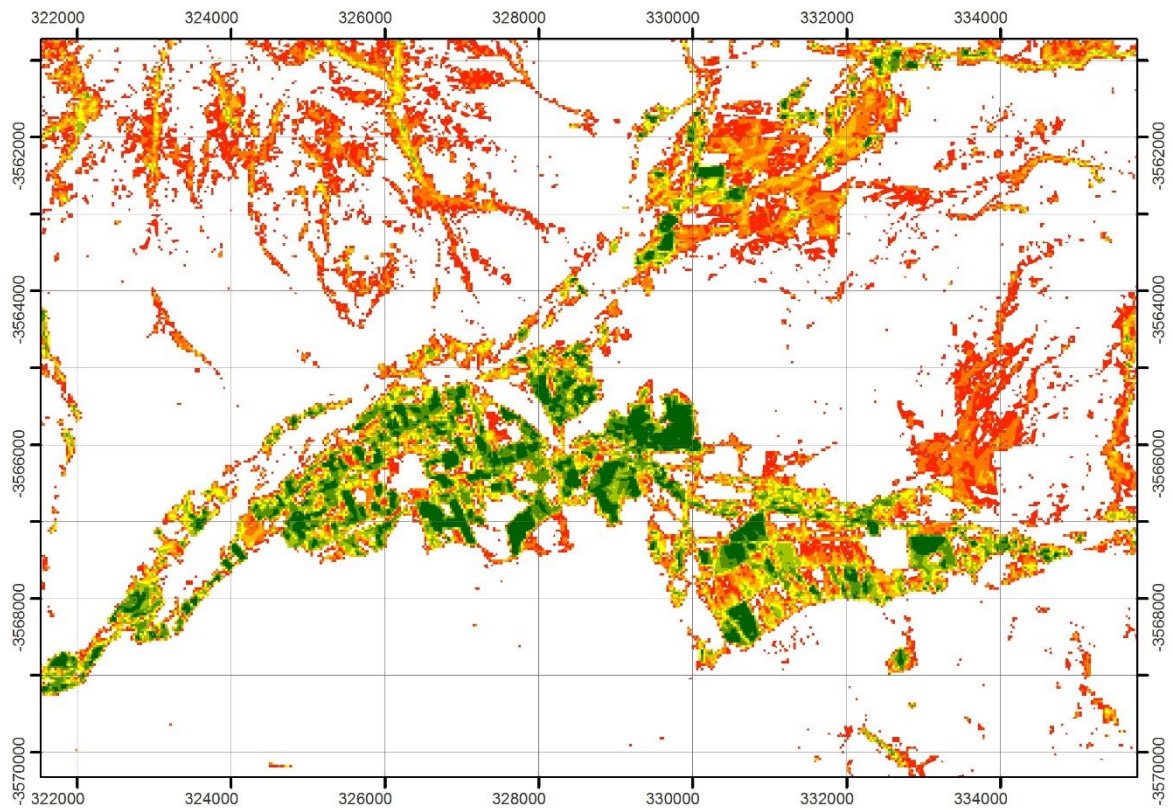
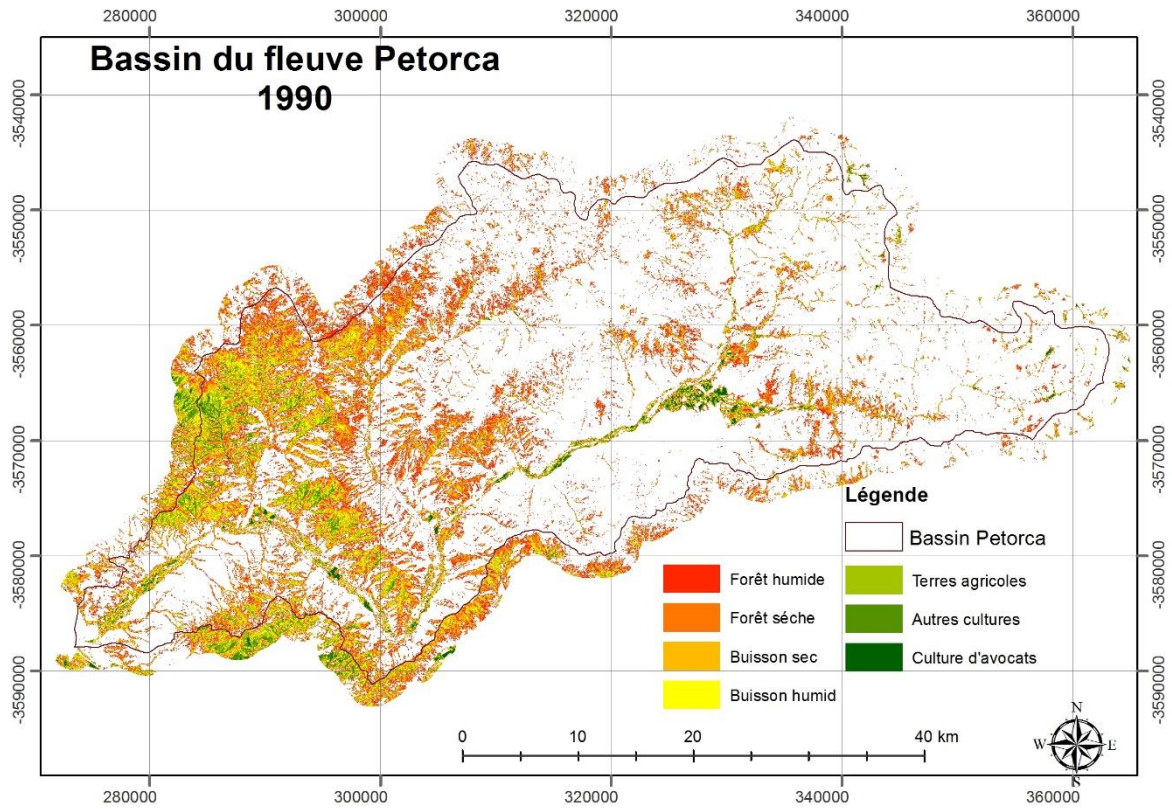
Graphique I : Analyse tendancielle des surfaces à Petorca

Les résultats du graphique I sont cohérents avec le diagnostic réalisé dans la province de Petorca. L'on observe une augmentation de la forêt sèche qui s'explique par la sécheresse que subit la région. Les catégories de zones humides sont stables, car la plupart des arbres indigènes de la région sont adaptés à la morphologie de la région et grâce à l'altitude, ils ont l'humidité nécessaire pour survivre. La persistance des buissons humides s'interprète en partie par leur proximité à des avocatiers, ils peuvent indirectement bénéficier de l'irrigation technique.

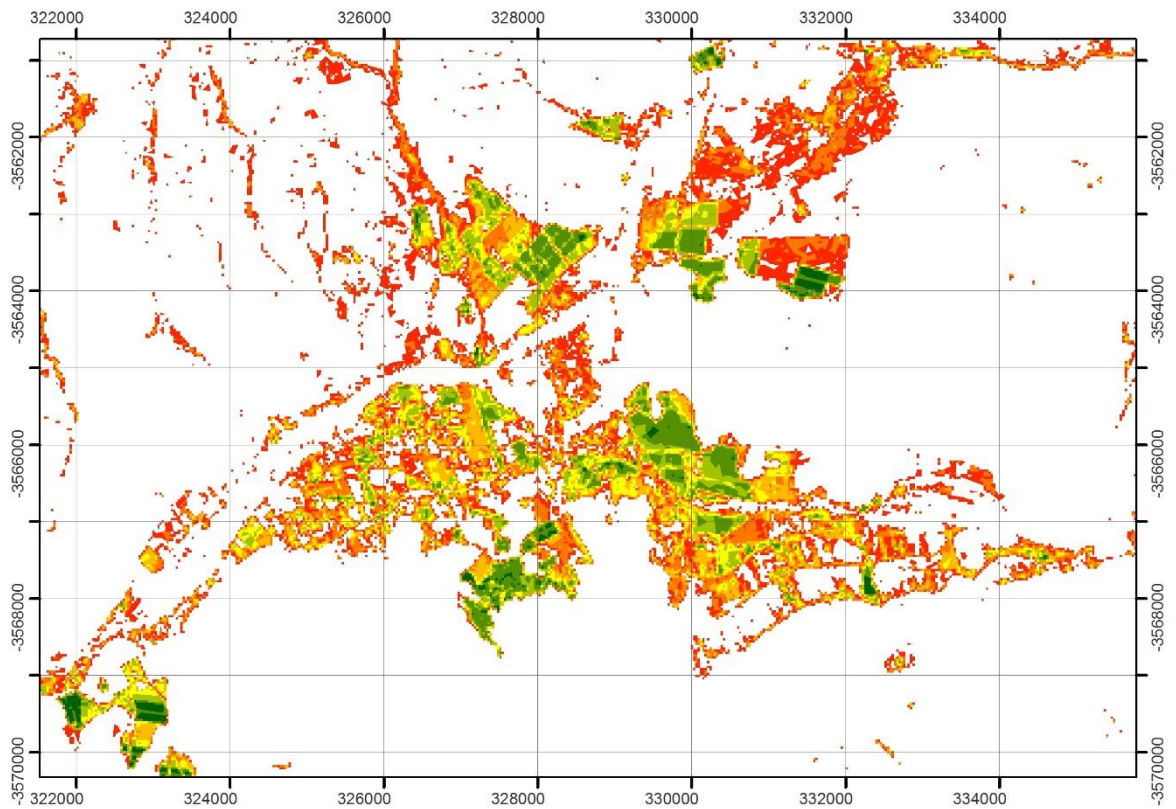
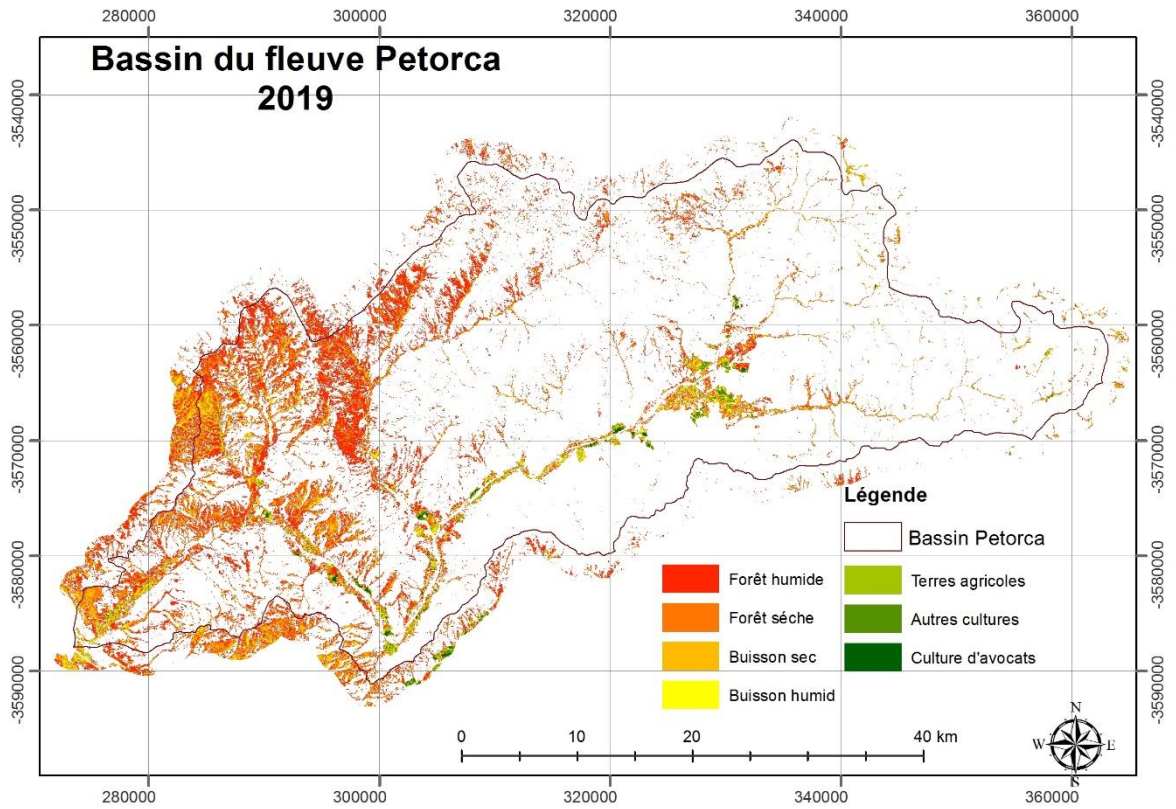
Le graphique II montre une expansion des cultures d'avocats d'environ 7% et la persistance d'autres cultures sans grande variation. Cela même après que les bassins fluviaux ont été déclarés comme épuisés ou restreints en raison de l'affaiblissement de leur débit. Ainsi, les terres agricoles ont légèrement diminué. Les inégalités dans l'accès à l'eau dans la province de Petorca a rendu non viables les formes de vie paysanne préexistantes, en raison du manque de ressources en eau pour l'élevage et la production de cultures destinées à l'autosuffisance. Le déclin en 2002 et 2008 s'explique par les crises économiques mondiales. La première correspond à la crise sud-américaine et la seconde à la crise financière internationale. Petorca est l'une des provinces du Chili qui décrit parfaitement les conséquences d'une expansion cultivatrice qui n'a pas pris en compte une distribution équitable de l'eau, et qui se nourrit au détriment des petits agriculteurs, des individus et des écosystèmes.



Graphique II : Analyse tendancielle des cultures et terres agricoles à Petorca



Carte XII: utilisation des sols à Petorca



Carte XIII: utilisation des sols à Petorca, 2019

VII. Discussion des résultats

Dans une perspective d'écologie politique, les conflits autour de l'eau à Petorca sont le résultat d'une politique historique de dépossession qui s'est accélérée avec la mise en place du modèle d'agro-exportation qui a débuté sous la dictature et s'est consolidé en démocratie. Il est intéressant de noter, que la politique économique d'agro-exportation promue dans les territoires semi-arides comme Petorca a utilisé le discours de la rareté, de la sécheresse et du changement climatique pour rendre invisible la sur allocation de l'eau, en particulier des eaux souterraines, toute en exposant les lacunes administratives de la direction générale de l'eau (DGA).

Les analyses visuelles et quantitatives effectuées montrent que la province de Petorca subit les effets d'une institutionnalisation environnementale qui a favorisé la monopolisation de l'eau par les élites pour la production des monocultures d'avocats, tout en modifiant les variables environnementales de la province de Petorca. Cette situation trouve son origine dans le Code de l'eau, qui est né pendant la dictature et qui a accordé ces droits sans discrimination et à perpétuité, en changeant non seulement la propriété historique de la ressource, mais aussi en métamorphosant l'identité culturelle des peuples concernés et du territoire. Dans les cartes d'occupation des sols, on peut voir des pentes de collines vertes utilisées pour la culture des avocats et des agrumes et, en revanche, des vallées et de petites parcelles agricoles sèches. Dans la Province de Petorca nous avons quantifié une augmentation d'environ 7% depuis le boom des années 90 jusqu'à aujourd'hui. Cela pourrait paraître un chiffre sans importance mais, cette situation est complètement insensé et absurde pour une région qui souffre d'une sécheresse de plus de deux décennies et qui on catalogue désormais comme une méga-sécheresse.

Il faut tenir compte du fait que la diminution des précipitations dépasse 80 % dans la partie centre-nord du pays et qu'il existe de vastes zones où la ressource au niveau est épuisée et au niveau des aquifères sur le point de l'être. Le gouvernement a établi des zones de restriction ou d'interdiction de nouveaux droits d'utilisation de l'eau, et travaille dans l'amélioration du système d'eau potable de la région. Cependant, comme le montrent les diverses analyses de cette recherche, il semble que l'activité d'agro-exportation soit plus importante que la vie de ses citoyens et la qualité de ses écosystèmes du pays.

La politisation du conflit sur l'eau dans la province de Petorca a généré divers questionnements sur le modèle agricole extractif chilien qui a favorisé un processus de dépossession de ses habitants ruraux. De manière spécifique, il est possible d'observer une critique collective contre la rationalité instrumentale qui domine les formes actuelles d'appropriation et utilisation de la ressource hydrique dans le pays. La situation prévalant à Petorca a conduit des organisations techniques telles que l'agence pour la recherche scientifique du gouvernement fédéral australien (CSIRO) à avertir que « si l'eau n'est pas gérée à l'avance, elle risque de se raréfier dans un avenir proche, entraînant une escalade des conflits sociaux, une dégradation environnementale des écosystèmes et d'importantes inefficacités économiques ».

Les conflits autour de l'eau à Petorca sont le résultat d'une politique historique de dépossession qui s'est accélérée avec la mise en place du modèle d'agro-exportation initié sous la dictature et consolidée en démocratie. Ce discours est incompatible avec les aspirations de la durabilité renforcée notamment par une vision unidirectionnelle et unidimensionnelle de la ressource hydrique, laquelle possède des utilisations et des valeurs symboliques diverses pour les groupes sociaux. Le cas de Petorca montre l'autre facette d'un modèle qui a généré des inégalités socioécologique et des souffrances environnementales. La culture de l'avocat dans la région a modifié non seulement la géographie et le paysage, mais aussi les relations sociales et culturelles, forçant des changements productifs qui ont anéanti les économies traditionnelles et les ont réorientées vers une politique axée sur l'exportation de l'avocat. Les abus de la législation et les paradoxes d'un discours politique progressiste et néolibéral au Chili n'ont fait que renforcer un modèle mercantile autour des biens naturels.

VIII. Limites du travail

Ce travail de recherche a été menée entre 2019 et 2020. Plusieurs événements ont obligé à modifier les axes de recherche. Les deux plus importants correspondants à l'explosion sociale d'octobre au Chili, qui a entraîné l'interruption de l'accès à certaines données. De même, l'infrastructure de données spatiales de certaines institutions chiliennes (liées à l'agriculture et à l'eau) n'était pas disponible et la demande de certaines couches n'a pas été satisfaite. Cela peut s'expliquer soit par le bouleversement social et les préférences institutionnelles, soit par la diversité des intérêts et des conflits représentés par les analyses dans la province de Petorca. La situation de la covid-19 a eu un impact dans un deuxième temps sur le calendrier proposé dû au manque d'accès au logiciel de travail ArcGis.

La méthode d'analyse évolutive choisie à la place de la classification supervisée classique peut ne pas avoir classé avec précision les différents pixels de la surface végétale, ce qui réduit les calculs des estimations de la culture d'avocats. Moran et Batistella (2012) expliquent que l'hétérogénéité de la couverture végétale (comme c'est le cas au Chili) peut signifier différents problèmes puisqu'un seul pixel comprend 900 mètres carrés et peut donc contenir plusieurs classes en même temps. L'approche d'analyse évolutive choisie peut ne pas avoir classé avec précision les différents pixels de la surface végétale, ce qui réduit les calculs des estimations de la culture d'avocats. Il est important de noter que les catégorisations des surfaces ont été faites visuellement et selon les registres des entreprises agricoles du secteur. Certaines d'entre elles ne précisent pas quels hectares correspondent aux avocats, aux noyers et aux agrumes, c'est pourquoi certaines estimations pourraient manquer d'exactitude. Il aurait été intéressant de réaliser d'autres indices de végétation tels que GNDVI, GVI, NGRDI ou d'autres liés à la l'agriculture de précision afin de spécifier et de différencier toutes les cultures de la province. Ainsi, comme conséquence d'une sécheresse prolongée de plus de 8 ans dans la province de Petorca, il est possible de mettre en évidence la présence d'une quantité significative de sols nus. La tonalité de ces derniers génère une forte réflectivité qui peut interférer avec la composante réfléchi par la végétation, générant des problèmes pour la différencier d'autres couvertures hautement réfléchissantes telles que les zones urbaines.

En ce qui concerne le sujet étudié, il y a un manque de recherche sur les effets que certaines pratiques agricoles ont sur le sol, ainsi que sur les systèmes d'irrigation en aval et l'environnement autour des plantations à flanc de colline. Par conséquent, un diagnostic spécifique est nécessaire sur la caractérisation du niveau de la couverture végétale indigène et la composition des espèces prédominantes de la flore sauvage et leur importance relative. La topographie doit également être différenciée plus en détail afin d'évaluer les pentes prépondérantes pour estimer les pertes de sol dues à l'érosion hydrique, ainsi que pour quantifier l'impact de la sédimentation sur les cours d'eau de surface.

IX. Réflexions finales

La présente recherche montre visuellement et quantitativement l'impact de la monoculture d'avocats sur l'occupation du sol et la distribution de l'eau dans la province de Petorca depuis les années 90. Les trois principales hypothèses correspondant à : a) la monoculture de l'avocat continue d'augmenter b) la répartition spatiale des cultures des avocats se localise à proximité des nouveaux stockages d'eau c) l'appropriation de la ressource eau de la part des exportateurs des avocats modifie le paysage de la zone, sont confirmées. Cela est fait par l'analyse de l'évolution temporelle de deux indices de végétation, le NDVI et le NDWI, obtenus à partir d'images du satellite Landsat 5-8 et de statistiques des surfaces.

Les différentes analyses effectuées montrent une fracture socioécologique causée par les exportations agricoles à Petorca. Cette fracture a rendu non viables des formes de vie qui existaient avant le processus d'intégration de la province au marché international. Cette dynamique socio-écologique n'est pas

étrangère aux rapports de force qui s'inscrivent entre les différentes classes et groupes sociaux. Lorsque des modes de vie sont mis en danger, c'est au travers de l'opposition qu'une dimension conflictuelle émerge. Dans ce contexte, Petorca est devenu un cas emblématique au niveau national en ce qui concerne le déséquilibre d'accès à l'eau, l'impact de la monoculture et de l'exportation. Ainsi, la critique des politiques de l'eau fait objet de la crise sociale actuelle que connaît le Chili depuis le 18 octobre 2019, devenant un sujet pertinent dans les revendications des citoyens pour un pays moins inégalitaire et qui valorise les systèmes écologiques et les besoins des communautés locales.

L'accélération de l'extraction agricole dénie et empêche des autres temporalités qui sont nécessaires à la reproduction des cycles de vie, comme le temps de recharge des bassins, la formation des aquifères, l'infiltration des sols, la consommation d'eau potable, entre autres. Malgré les difficultés de disponibilité de l'eau, l'approfondissement du modèle d'agro-exportation persiste comme un horizon incontestable dans le pays. L'explication des flux d'eau impliqués par l'activité fruitière permet d'aborder la quantification des impacts de cette activité, ce qui fournit des informations pour nourrir les débats publics, surtout dans un contexte où émergent des récits qui imputent au changement climatique le manque de disponibilité de l'eau dans les territoires et qui qualifient d'idéologiques les dénonciations des conséquences de l'agrobusiness.

Les conflits territoriaux à Petorca sont loin d'être terminés, c'est pourquoi cette recherche est une invitation ouverte aux études interdisciplinaires qui abordent d'autres variables qui influencent la gestion des ressources en eau dans le bassin versant de Petorca axé sur la plantation d'espèces fruitières telles que l'avocat, tout en considérant les impacts socioécologiques de l'activité. Ainsi, il sera intéressant d'étendre et d'approfondir l'analyse à d'autres régions pour tenir compte de l'hétérogénéité biophysique (sols, climat, hydrologie) des cultures et des relations sociales qui composent l'agrobusiness fruitier au Chili. Il est essentiel d'interroger les priorités nationales et internationales en matière de production alimentaire afin de promouvoir une agriculture qui respecte l'équilibre des dynamiques socio-écologiques dans les territoires.

X. Bibliographie

Altieri, M. A. (2009). The Ecological Impacts of Large-Scale Agrofuel Monoculture Production Systems in the Americas. *Bulletin of Science, Technology & Society*, 29(3), 236–244. <https://doi.org/10.1177/0270467609333728>

Bauer, Carl J. (2003). "Vendiendo agua, vendiendo reformas. Lecciones de la experiencia chilena". *Revista Ambiente y Desarrollo* (3 y 4): 6-9.

Bengoa Cabello, J. (2017). La vía chilena al "sobre" capitalismo agrario. *Anales de la Universidad de Chile*, (12), pp. 73-93. doi:10.5354/0717-8883.2017.47176

Bolados, P. (2016). "Conflictos socioambientales/ territoriales y el surgimiento de identidades post neoliberales (Valparaíso-Chile)". *Revista Izquierdas*, 31: 102-129.

Carvacho Bart, L. y Sánchez Martínez, M. (2010): Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile, en el período 2001-2005. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 728-737. ISBN 978-84-472-1294-1

CIREN (2017). *Catastro Frutícola, Región de Valparaíso, Chile*. Consultado en: <https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/catastros-fruticolas/catastro-fruticola-ciren-odepa>

CEPAL (1999) *El código de Aguas de Chile: entre la ideología y la realidad*. división de recursos naturales e infraestructura. CEPAL ISBN: 921321531284

CNR. (2011) Estudio diagnóstico de los recursos subterráneos en el sistema hídrico Ligua y Petorca. Recuperado de <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/10035>

Falkenmark, M. (1984). New ecological approach to the water cycle: ticket to the future. *AMBIO*, 13(3): 152–160.

Falkenmark, M. & Widstrand, C. (1992). Population and Water Resources: A delicate balance. *Population Bulletin*. Population Reference Bureau, Washington, USA.

Gao, B. C, 1996: NDWI – A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from space.

Gilabert, M. A., Younis, M, T., Garcia-Haro, J. y Melia, J. (1997). Sobre la utilización de derivadas en el análisis de datos de alta resolución espectral, en Casanova, J.L. y Sanz Justo, J. (eds), *Teledetección: usos y aplicaciones*. Pp. 407-414

Gu, Y, Brown, J. F., Verdin, J. P., Wardlow, B, 2007: A five-year of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States –*Geophysical research letters*, VOL. 34, L06407, doi:10.1029/2006GL029127.

Hoekstra, A & Hun, P. (2002). *Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to crop trade*. Delft: Institute for Water Education.

INIA. (2013). *Determinación de la huella del agua y estrategias de manejo de recursos hídricos*. La Serena: INIA.

INE. (2008). *Cambios estructurales en la agricultura chilena. Análisis intercensal, 1976-1997-2007*. Santiago de Chile: CEDOC

INDH. (2014). *Informe Misión de Observación Provincia de Petorca*. Santiago de Chile: INDH

Lagadeuc, Y. & Chenorkian, R. (2009). Les systèmes socio-écologiques : vers une approche spatiale et temporelle. *Natures Sciences Sociétés*, vol. 17(2), 194-196. <https://www.cairn.info/revue-natures-sciences-societes-2009-2-page-194.htm>.

Linsley J., Kohler M. y Paulhus J. (1975). *Hidrology for engineers*. 2da. Edición. McGraw Hill. New York.

McMICHAEL. (2009). “A food regime genealogy”. *Journal of Peasant Studies*, 36 (1): 139-169.

Murray, W. (2006). Neo-feudalism in Latin America? Globalisation, agribusiness, and land re-concentration in Chile. *The journal of Peasant Studies*. Pages 646-677.

Miranda, F. (2018). “Plantaciones de paltos: la carencia de una legislación para el uso del suelo”. *El Mostrador*. En: <http://www.elmostrador.cl/noticias/opinion/2018/06/20/plantaciones-de-paltos-la-carencia-de-unalegislacion-para-el-uso-del-suelo/>

Moran, L et Batistella, M (2002). Linear mixture model applied to Amazonian vegetation classification. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 87, pp. 456-469.

Molina, J., T. (2018). “Gremio de agricultores: no existe escasez hídrica en Petorca y problema se debe a la “mala gestión” del recurso”. *Emol.com*. En: <Http://www.emol.com/noticias/Nacional/2018/05/22/907046/Agropetorca-Aseguran-que-no-existe-escasez-hidrica-en-la-zona-yatribuyen-problemas-a-una-mala-gestion-del-recurso.html>

ShimabukuroLong, Tengfei. Zhang, Zhaoming. He, Guojin. Jiao, Weili. Tang, Chao. Wu, Bingfang. Zhang, Xiaomei. Wang, Guizhou. Yin, Ranyu. (2019). 30m resolution Global Annual Burned Area Mapping based on Landsat images and Google Earth Engine. *Remote Sens*. Vol. 11, n°5

Pengue, W. (2006). “Agua virtual, agronegocio sojero y cuestiones económico-ambientales futuras”. *Fronteras*, 5: 14-25.

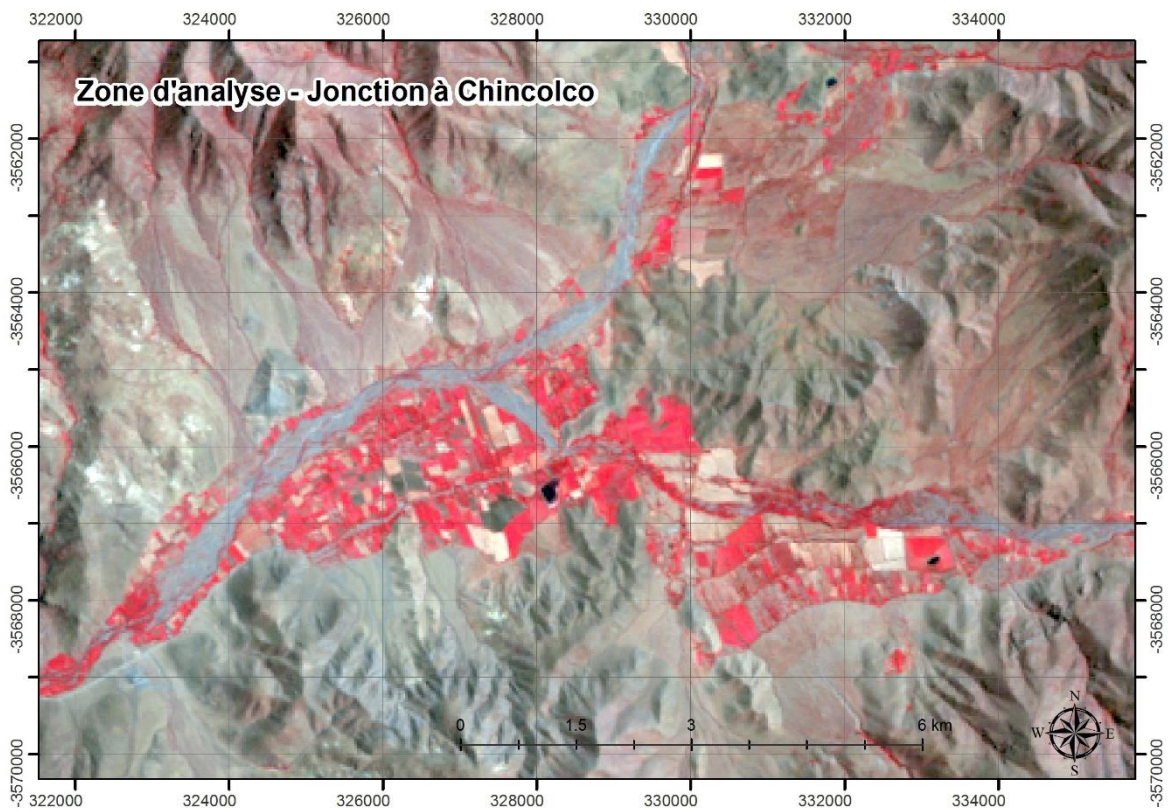
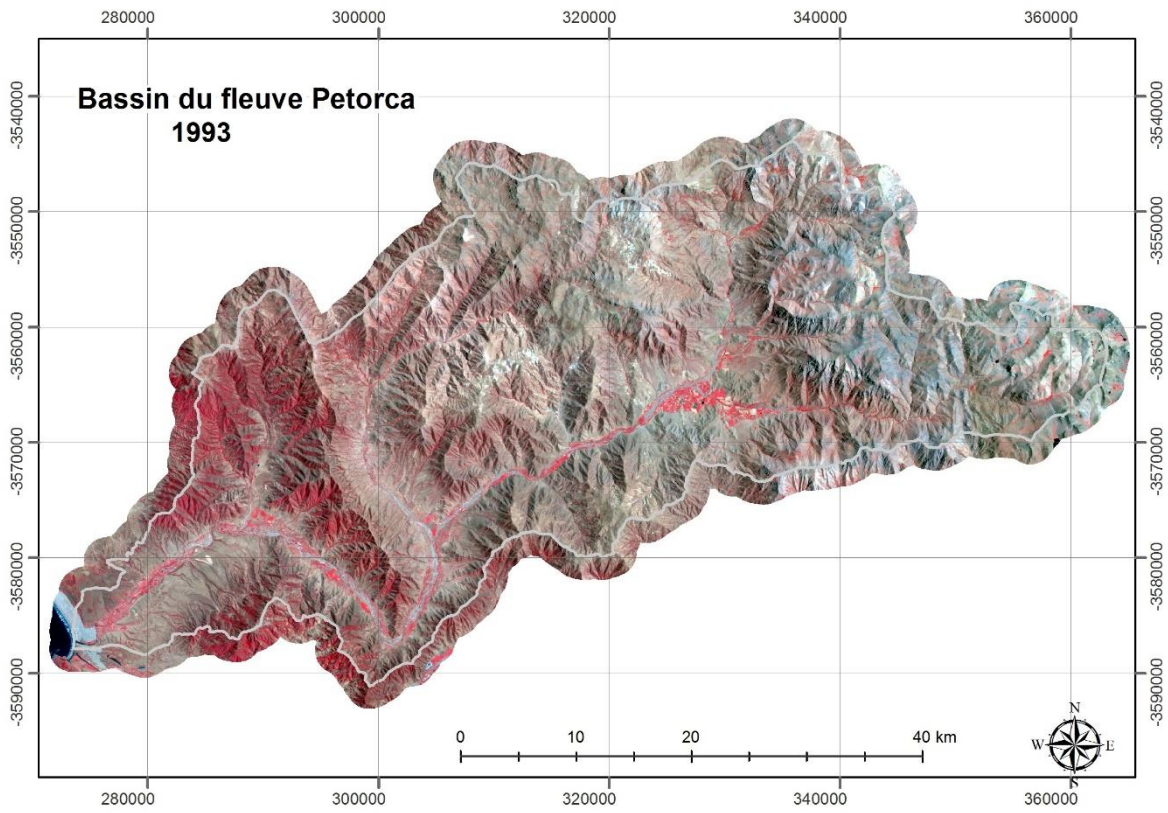
Steduto, P.; Hsiao, T.; Raes, D. & Fereres, E. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. FAO, Roma. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i2800s.pdf>

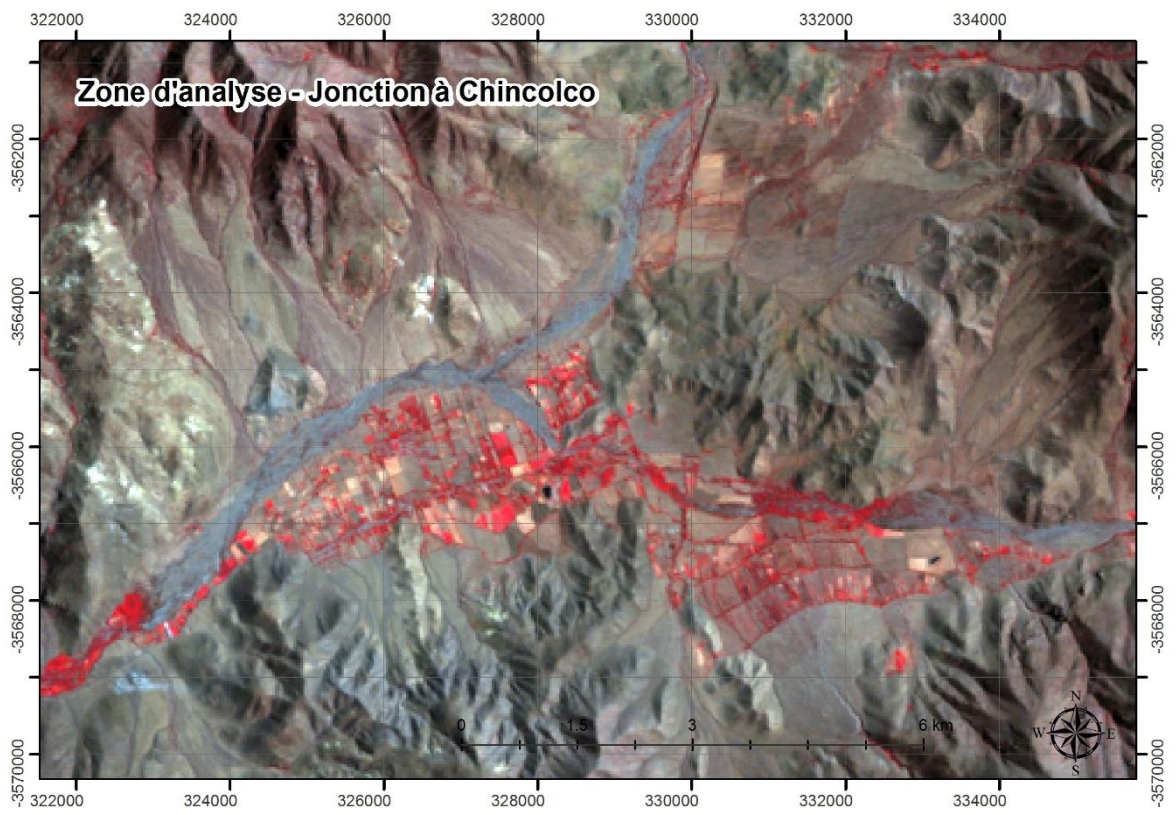
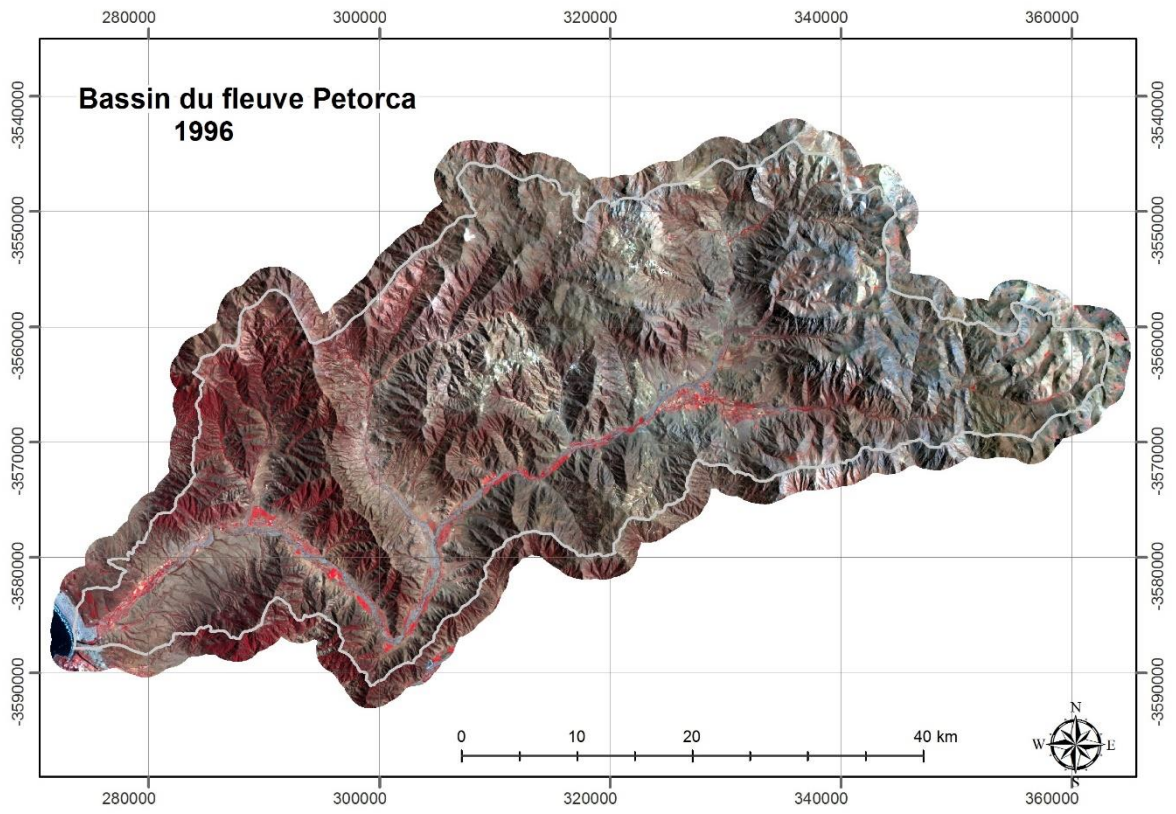
Sobrino, J.A. (2000) Teledetección Servicio de Publicaciones Universidad de Valencia, 467 pp.

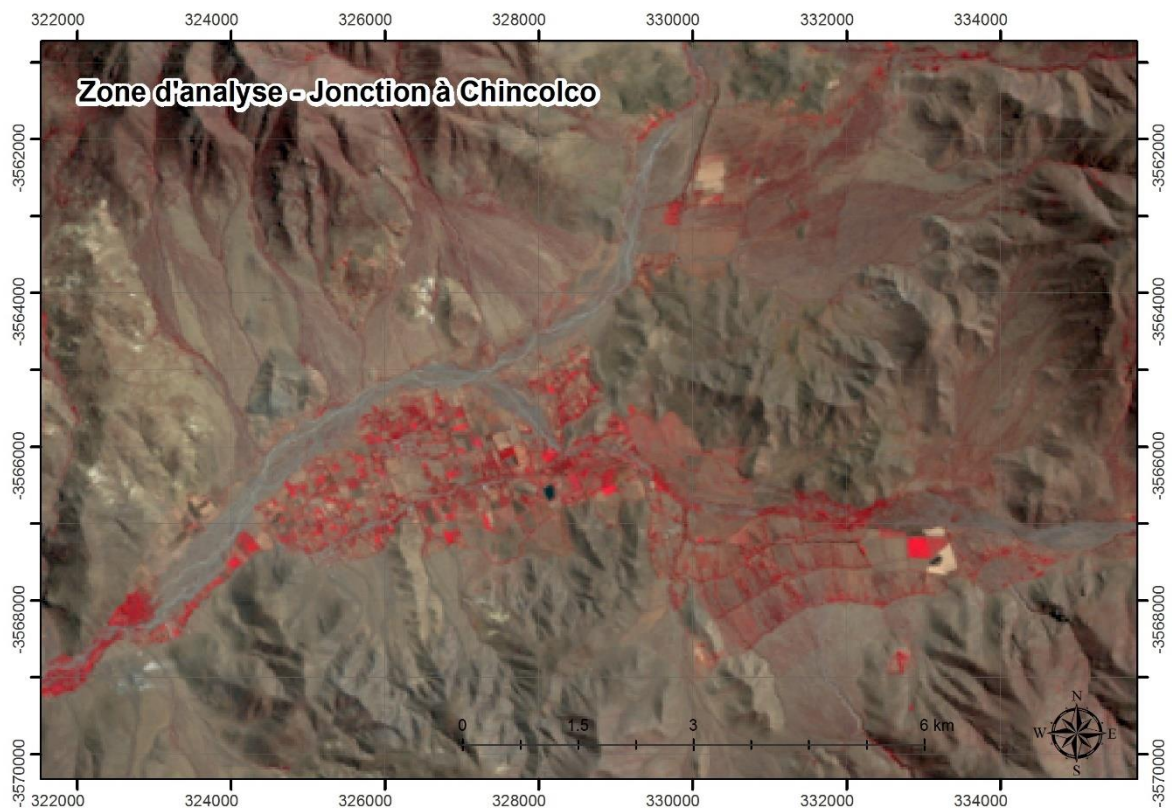
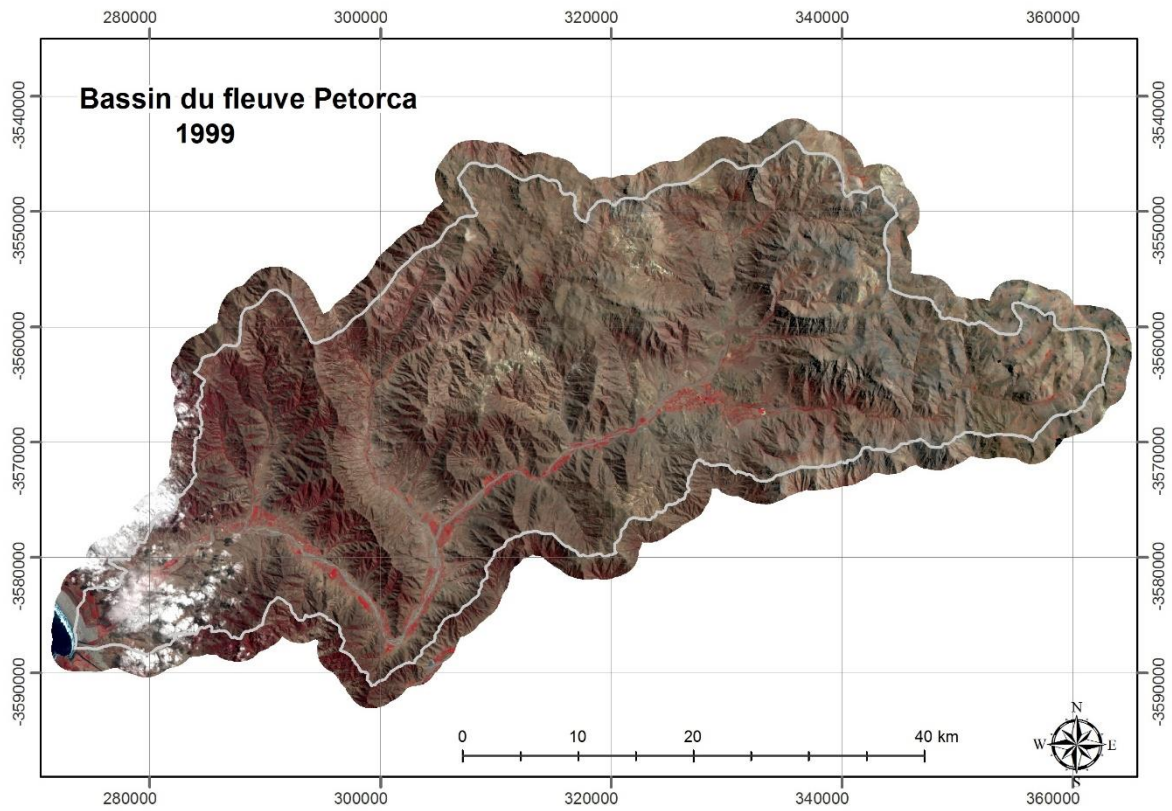
Valdés, X. (2017). “Conquistas, derrotas, desplazamientos: de la sindicalización en la reforma agraria a la des-sindicalización y emergencia de nuevos actores sociales bajo el neoliberalismo”. Revista Anales, 12: 183-202.

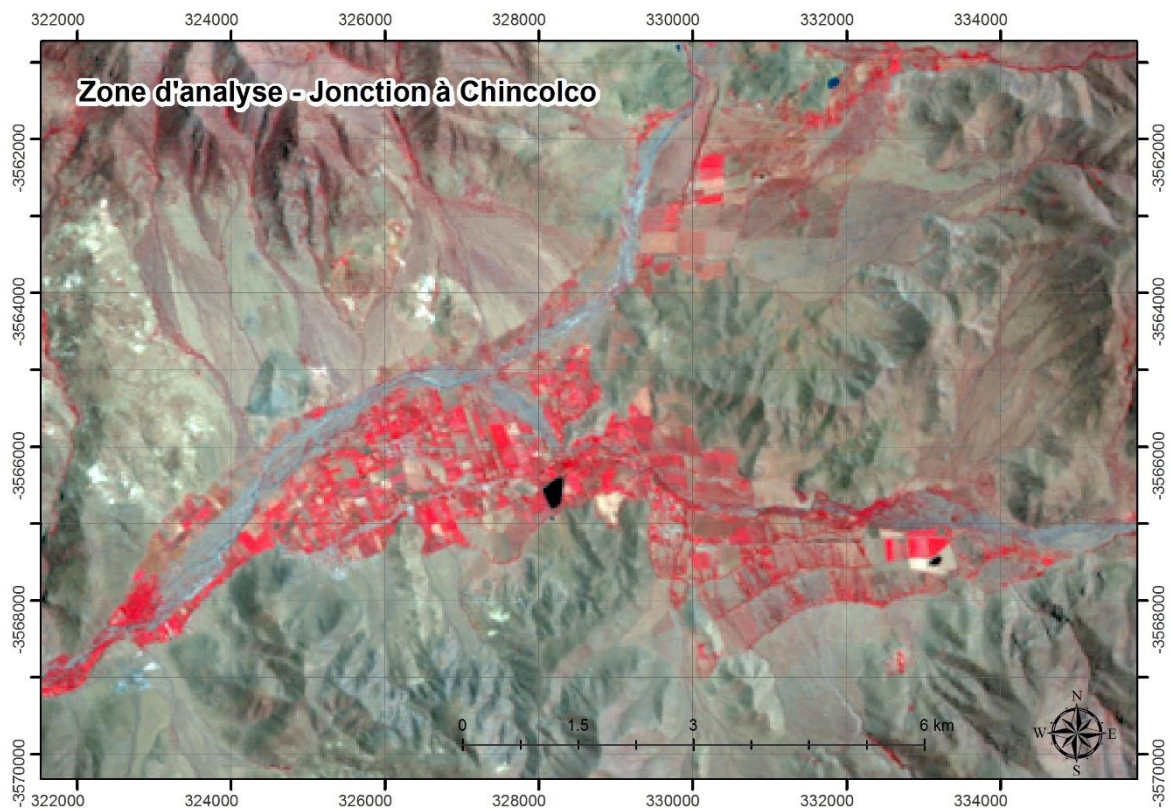
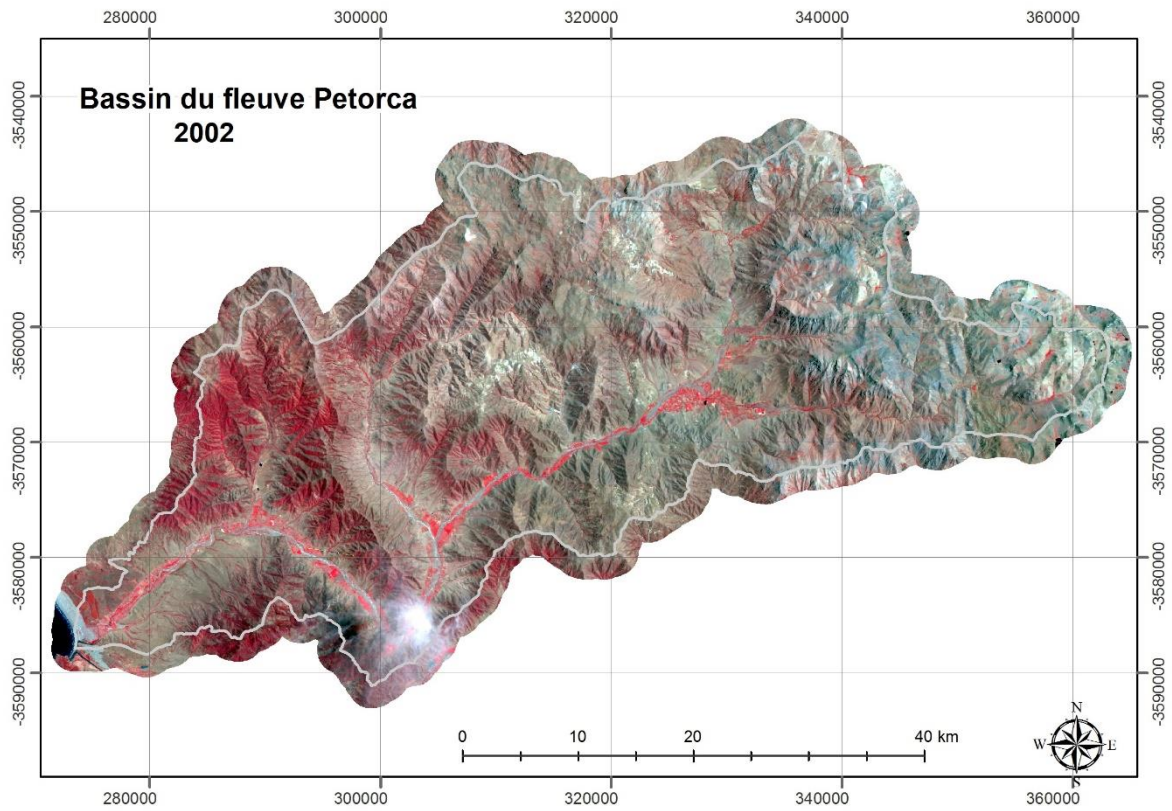
XI. Annexes

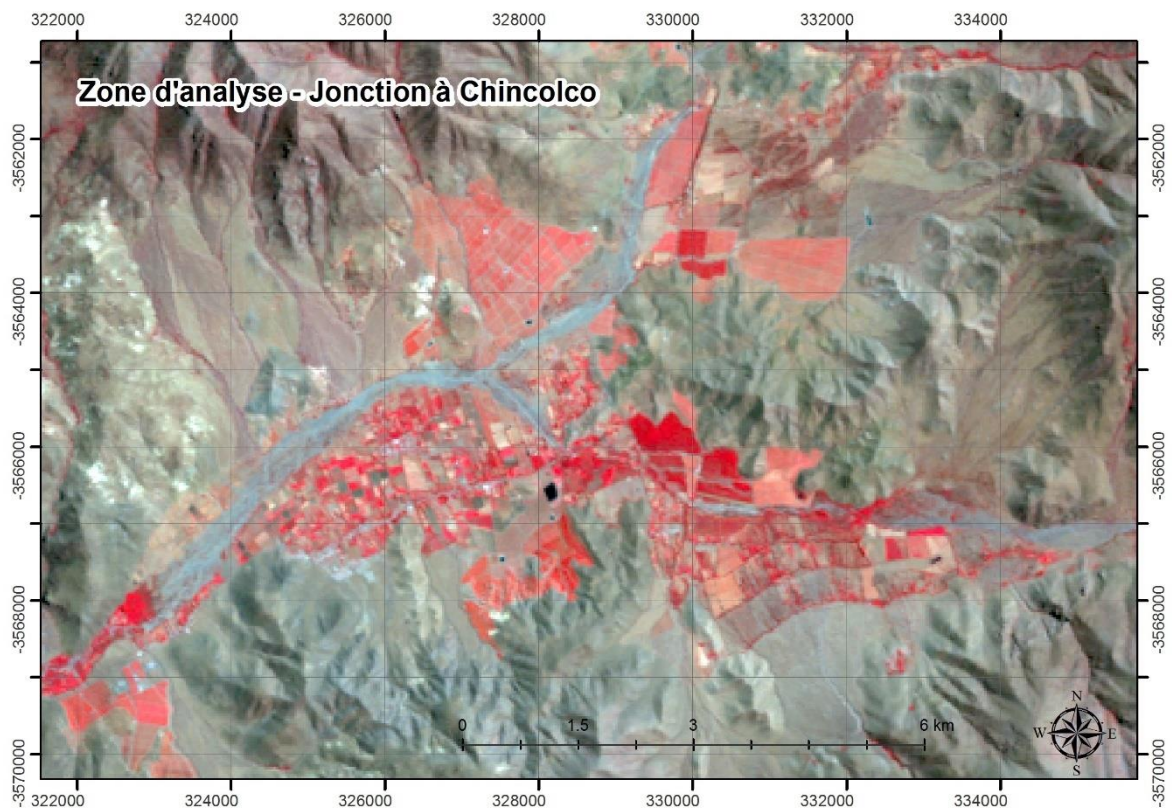
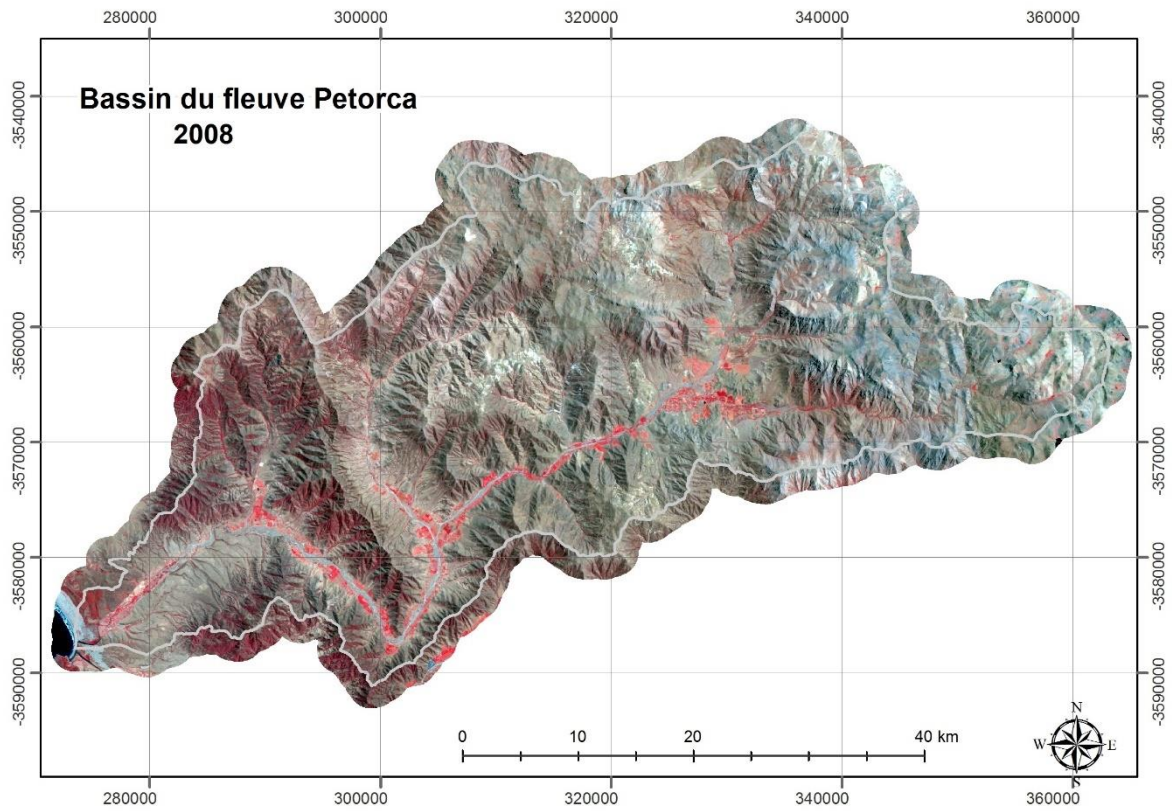
a. Compositions fausses couleurs infrarouges 4-3-2

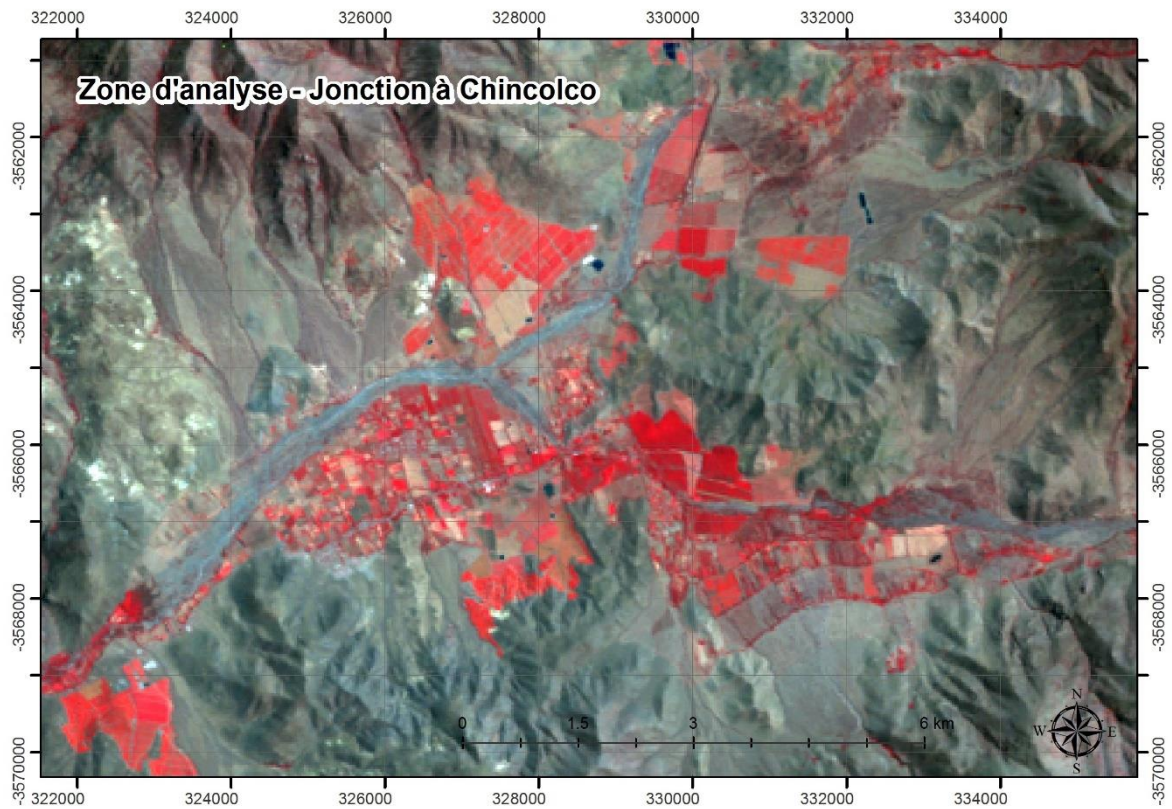
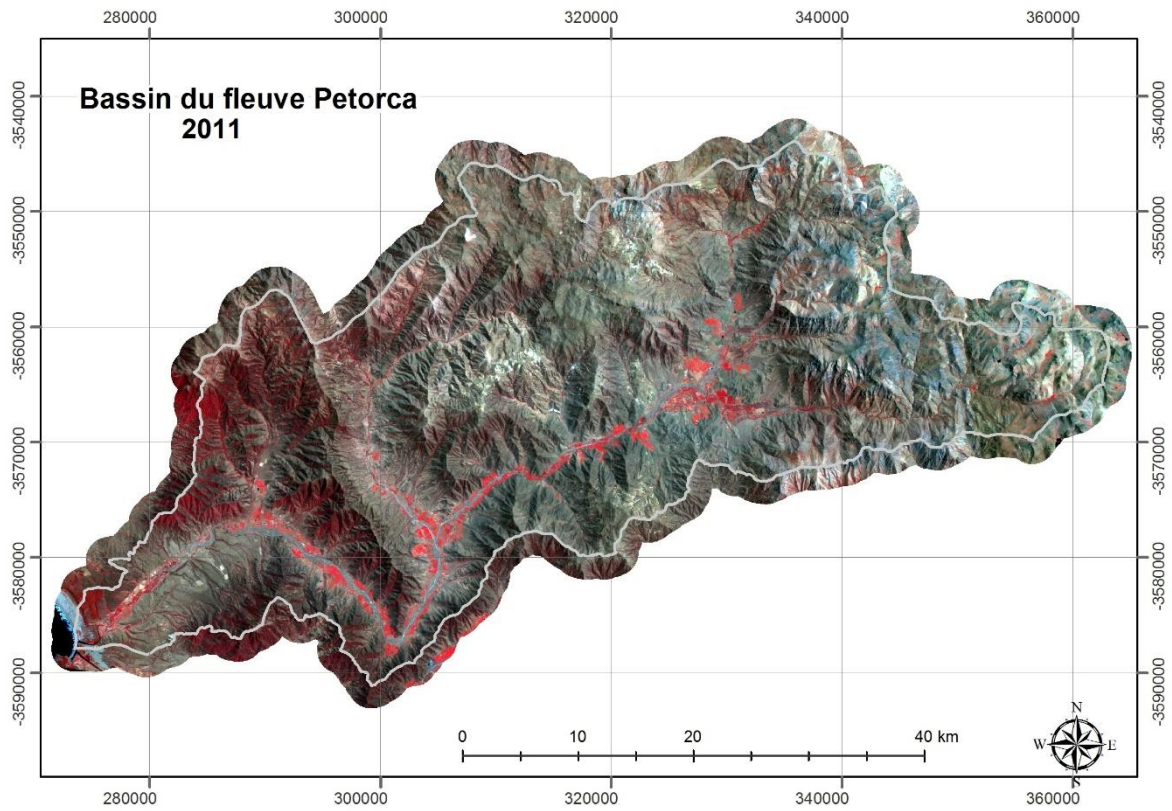




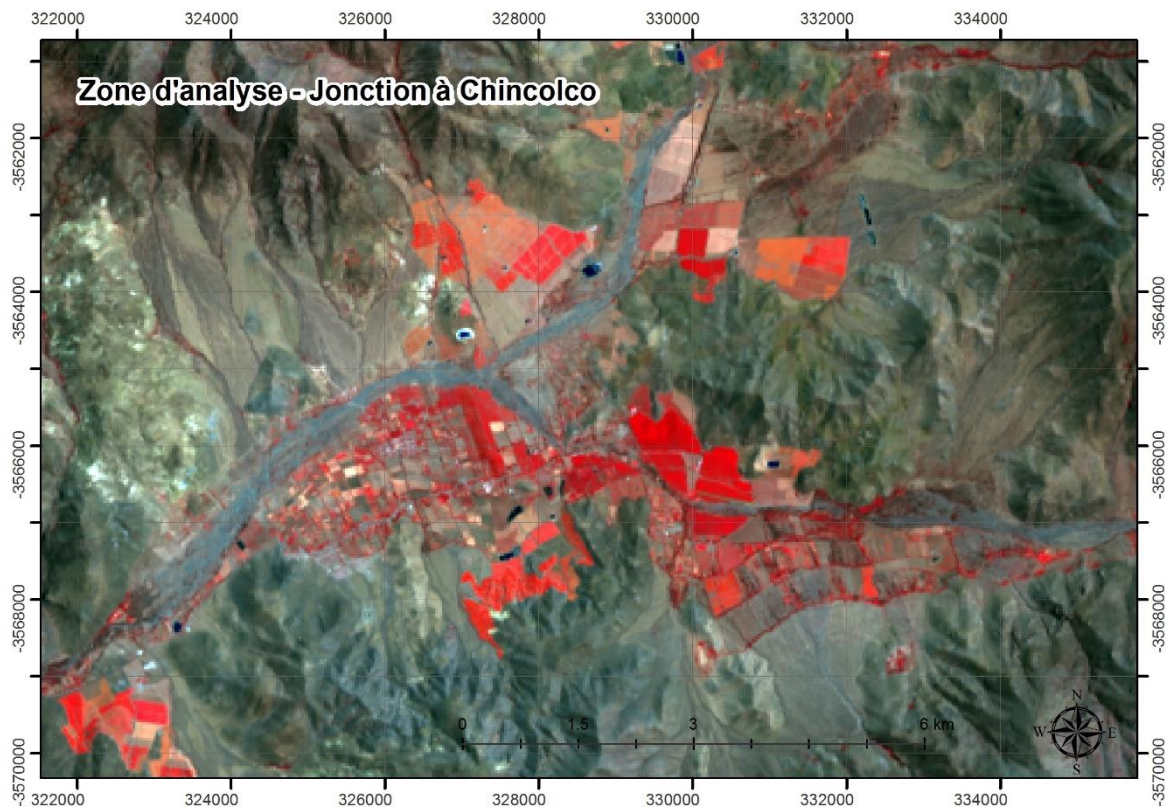
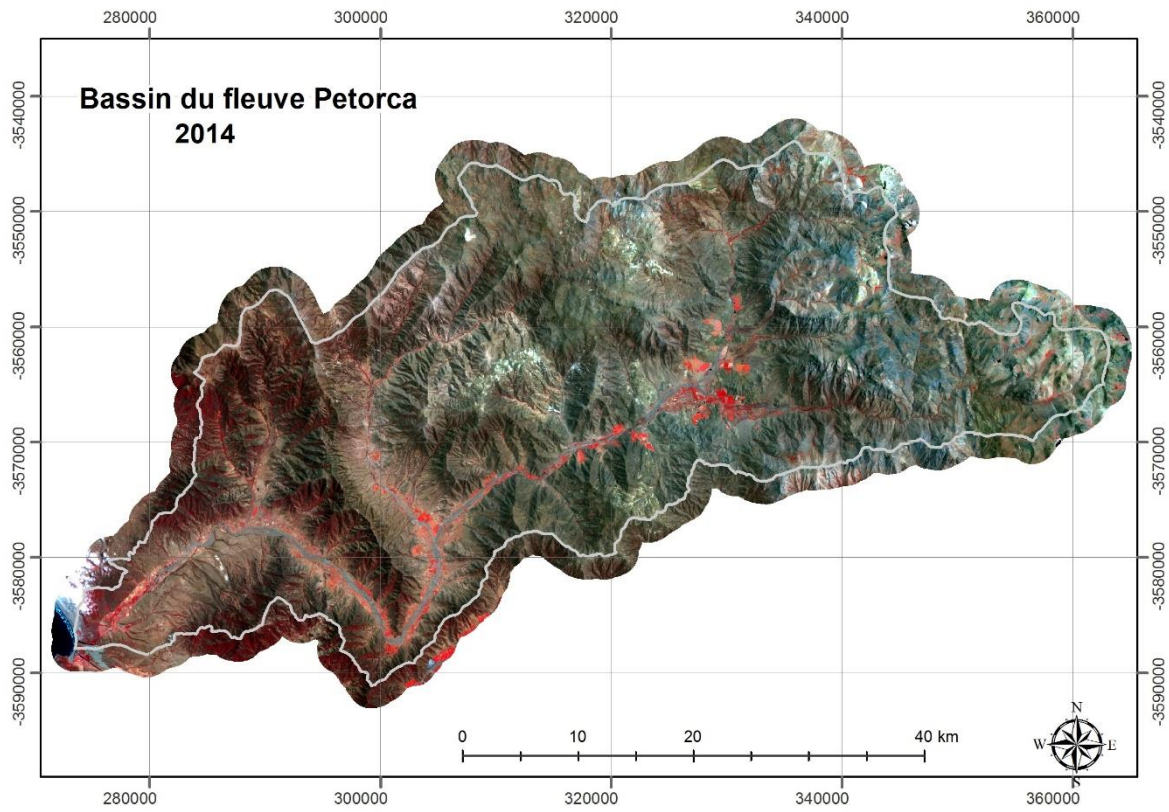


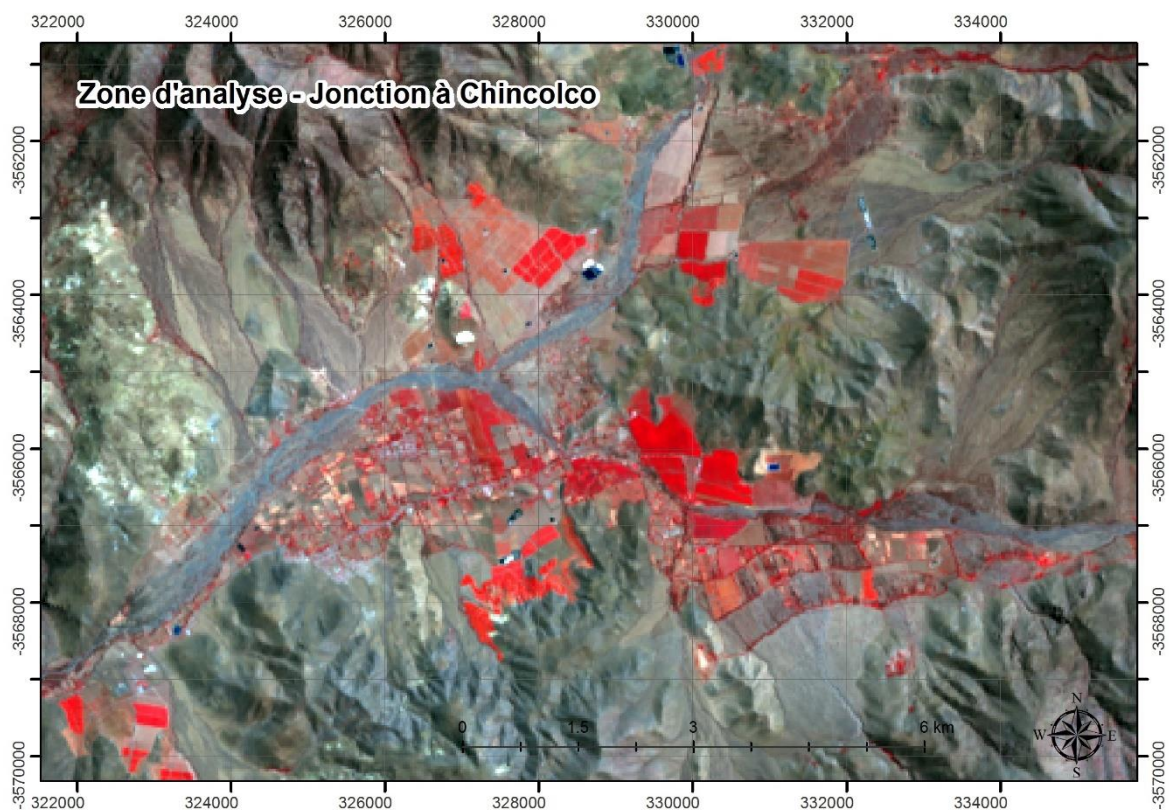
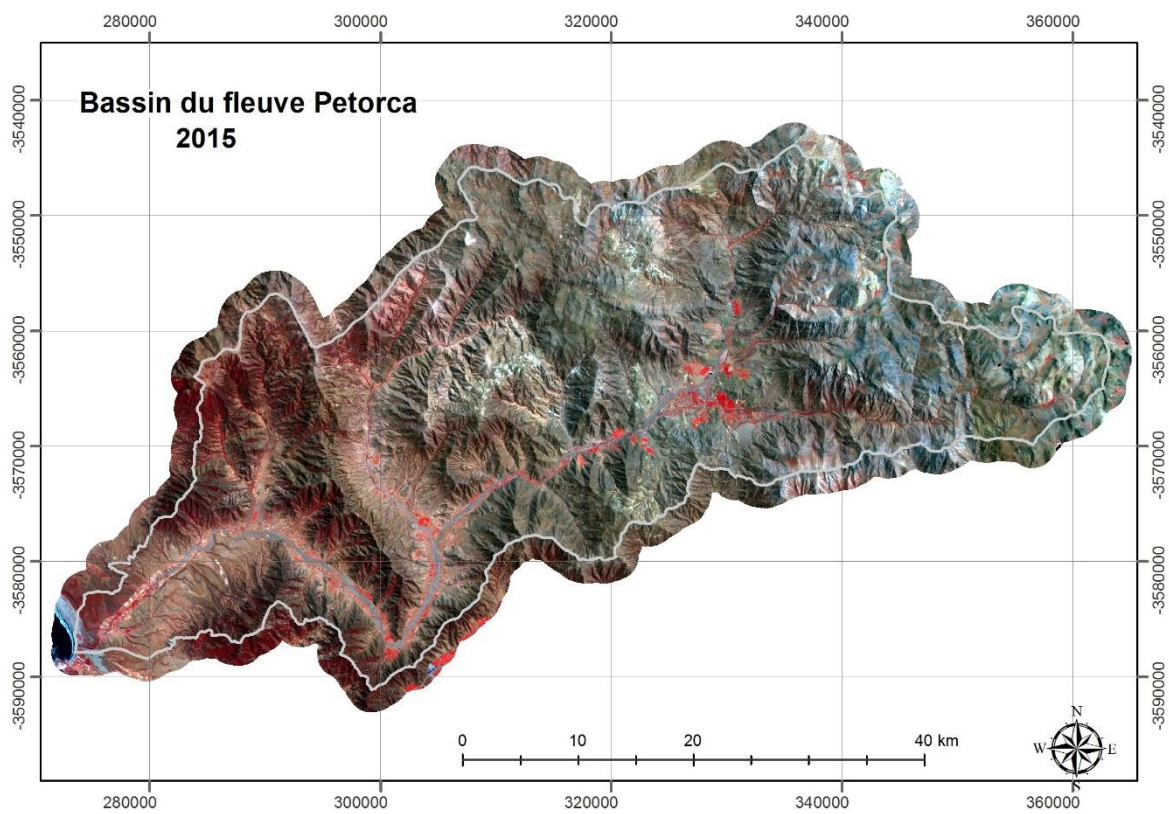


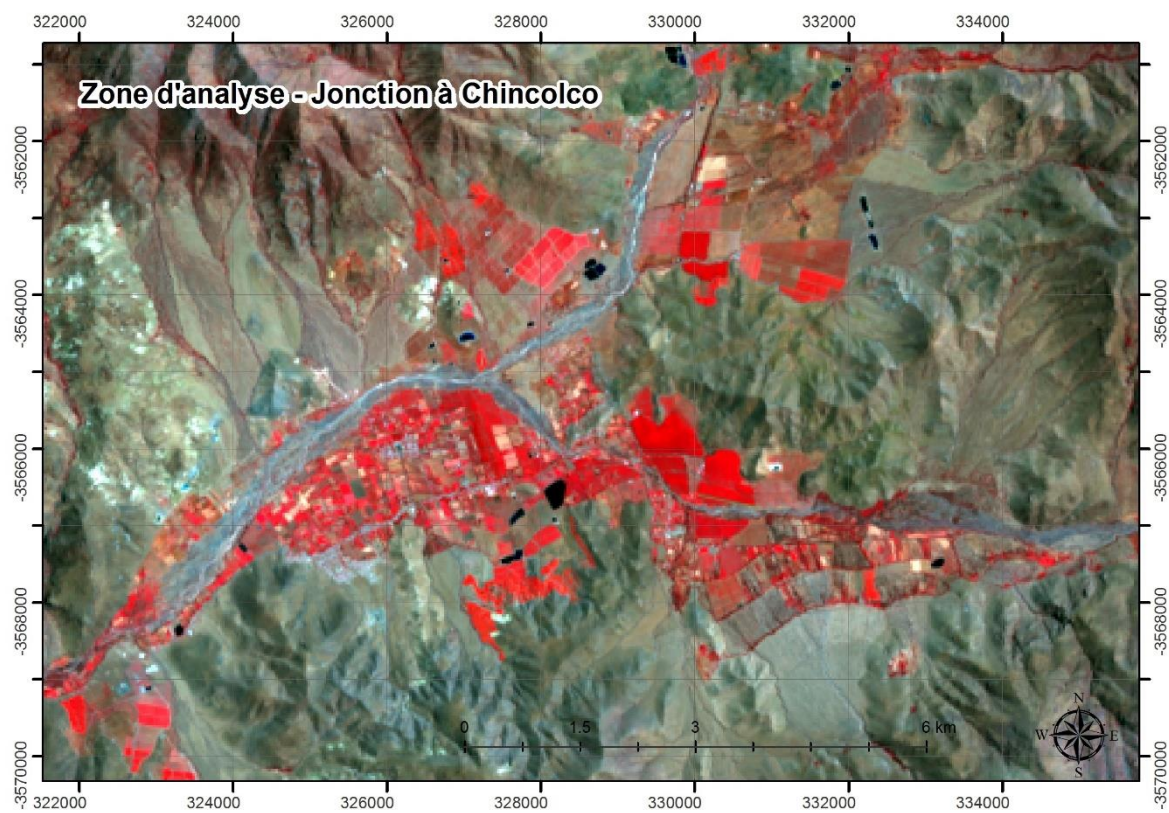
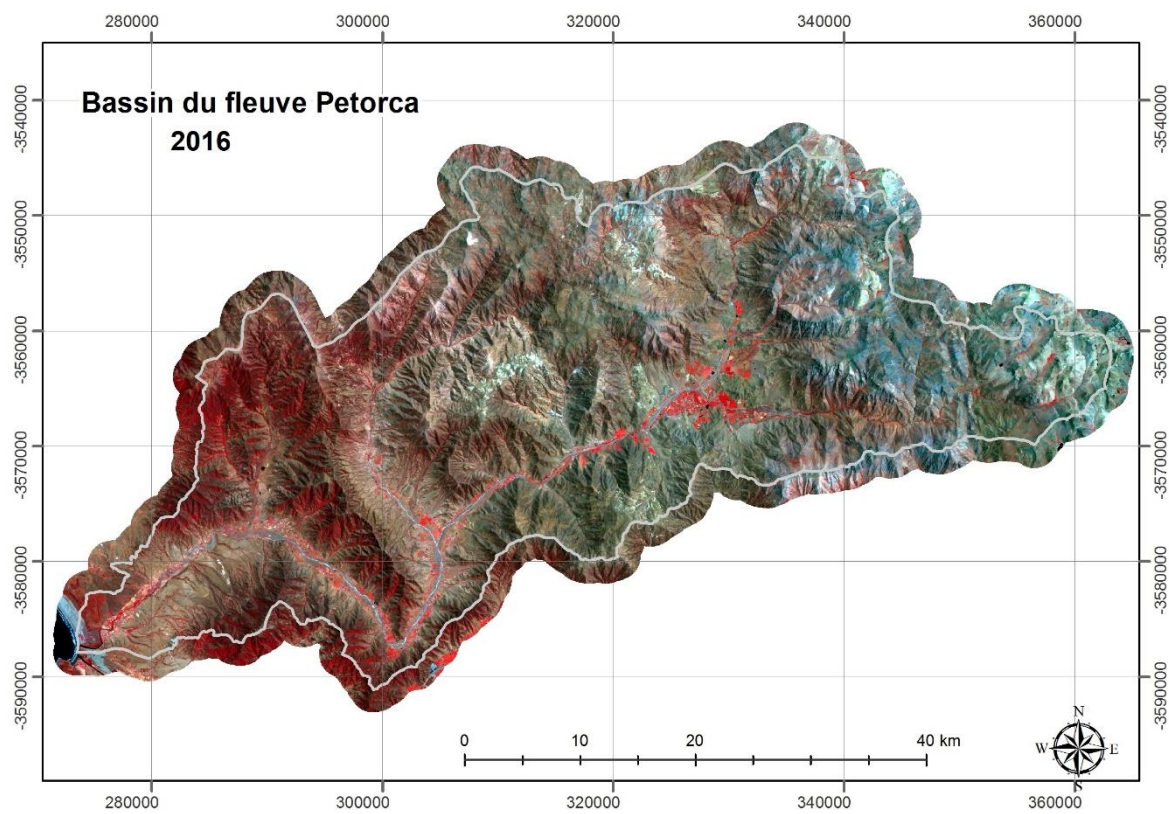


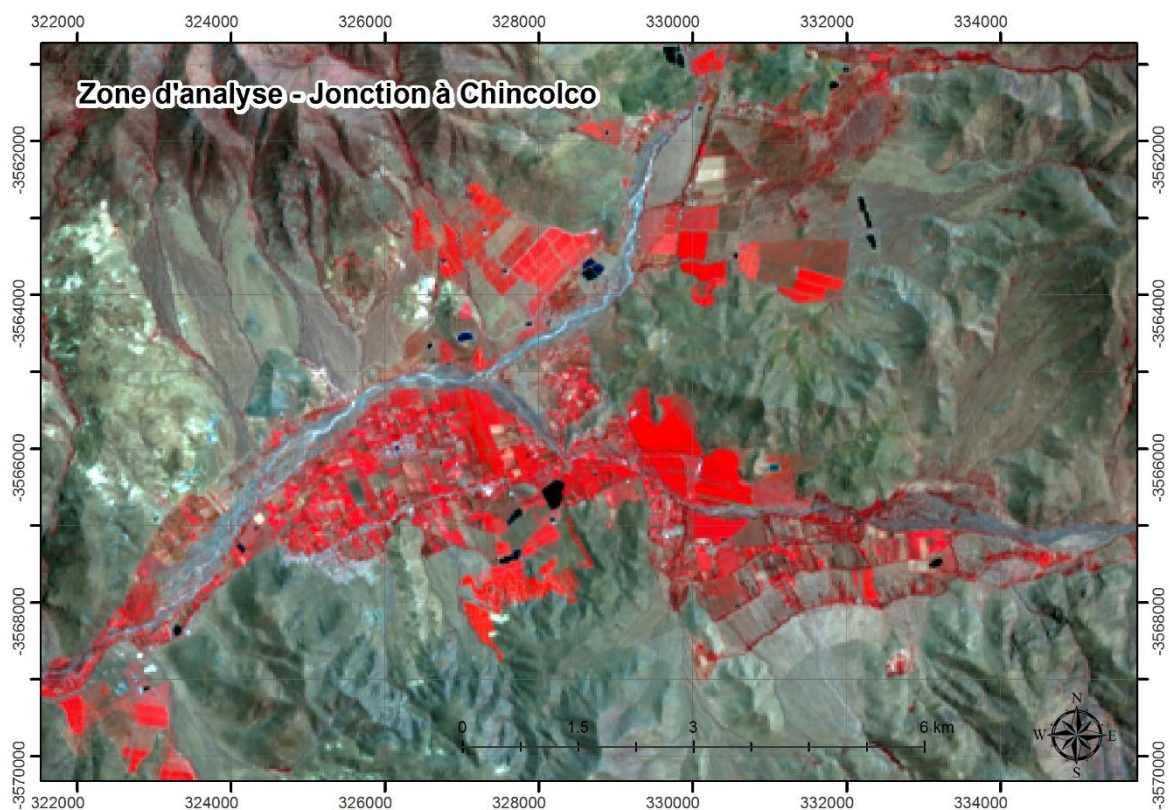
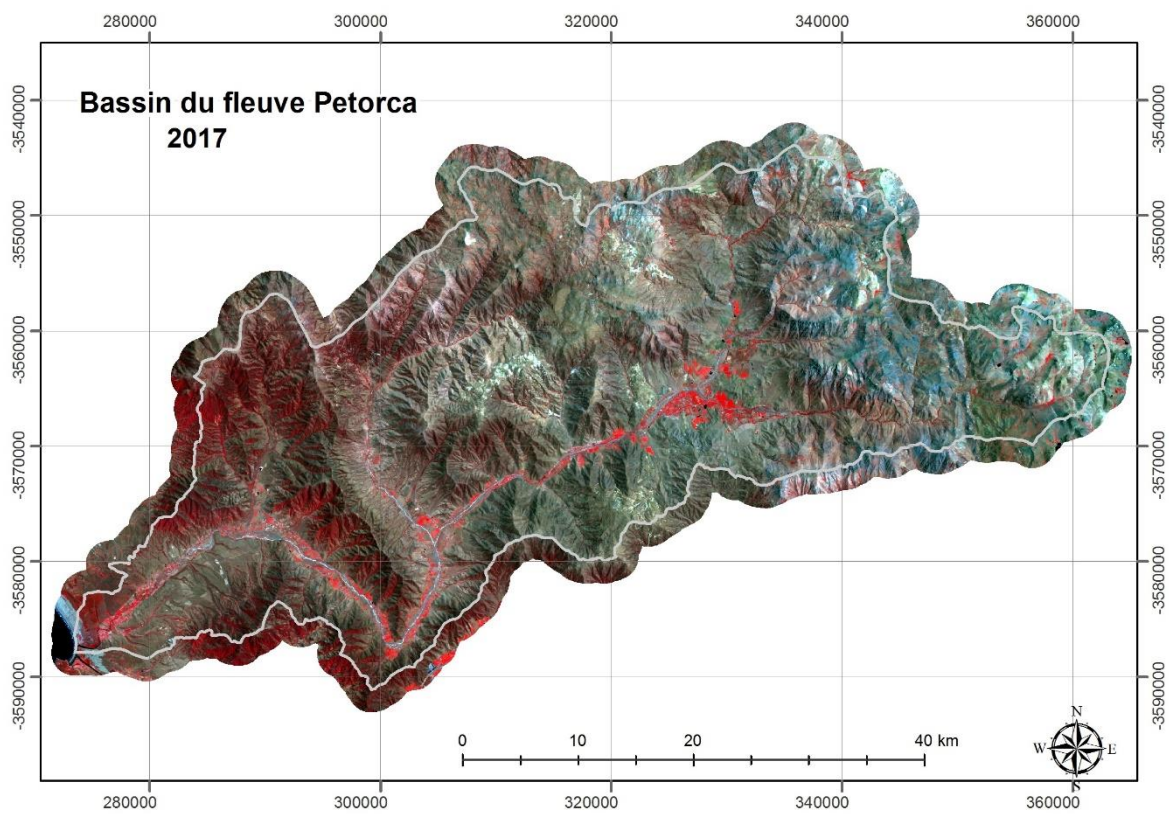


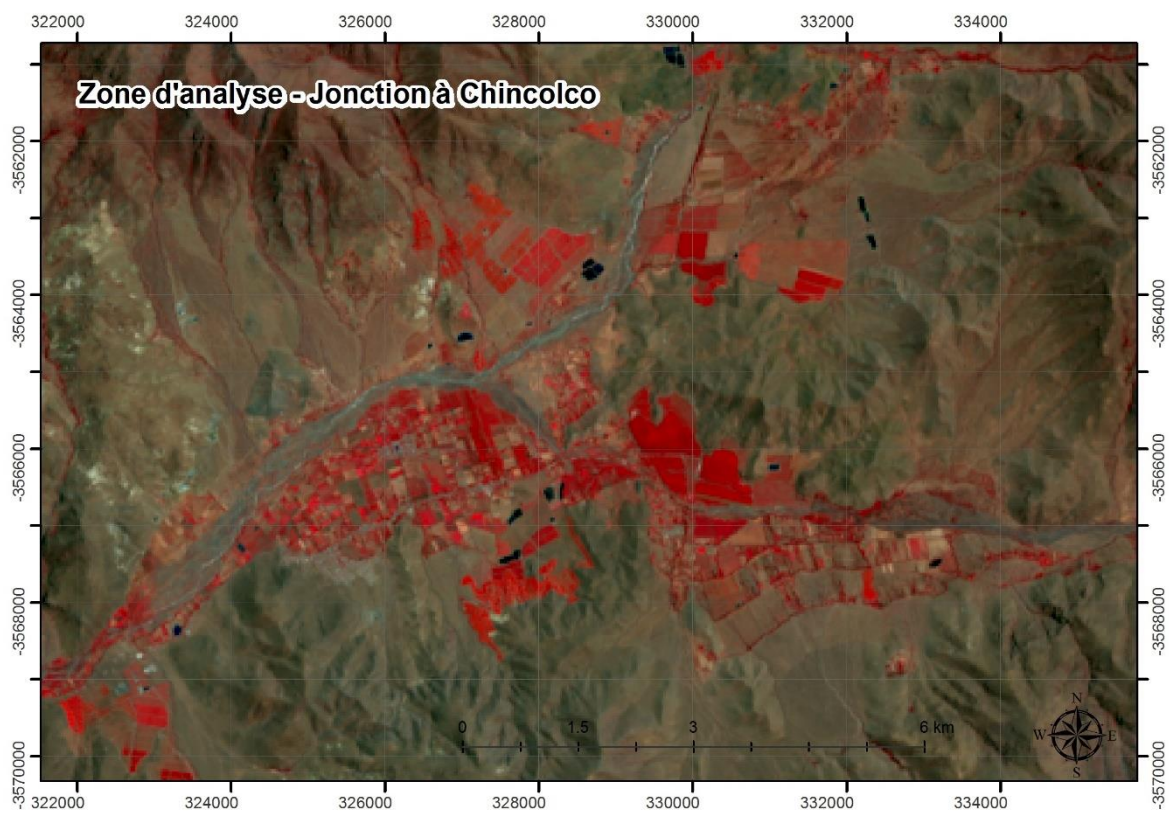
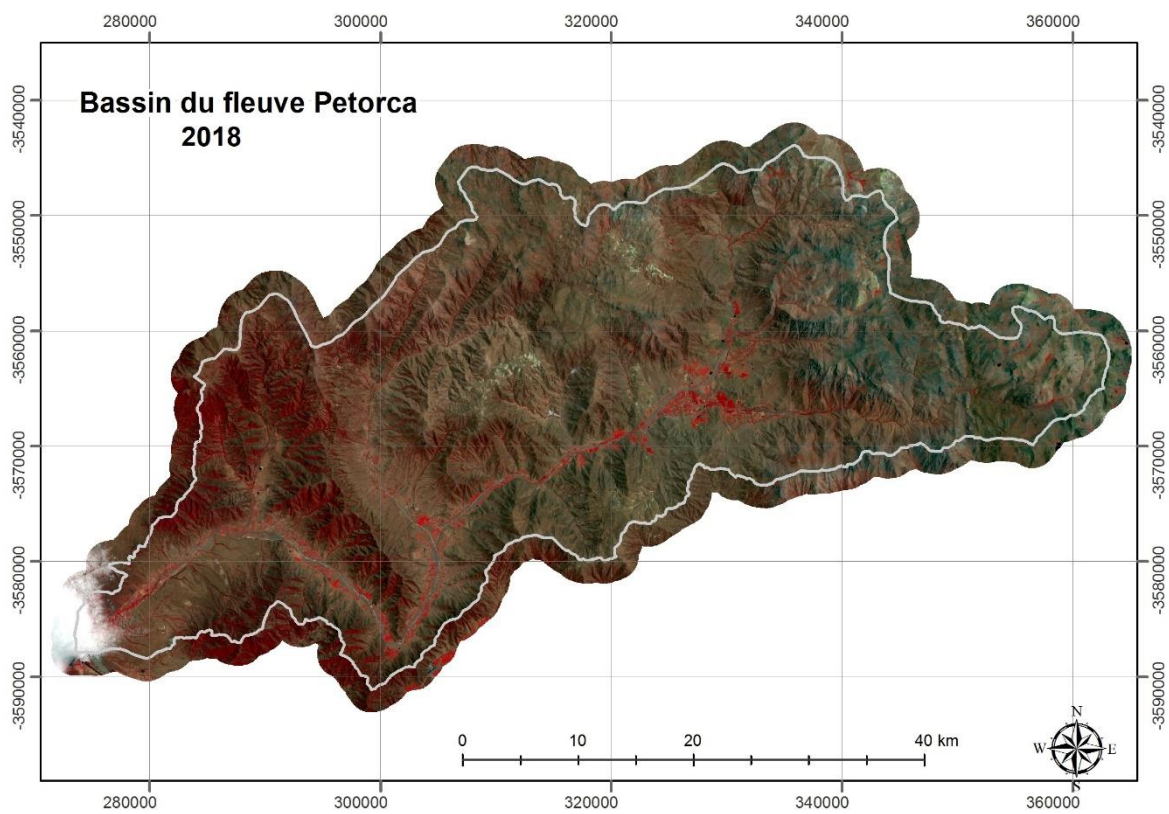
b. Compositions fausses couleurs infrarouges 5-4-3





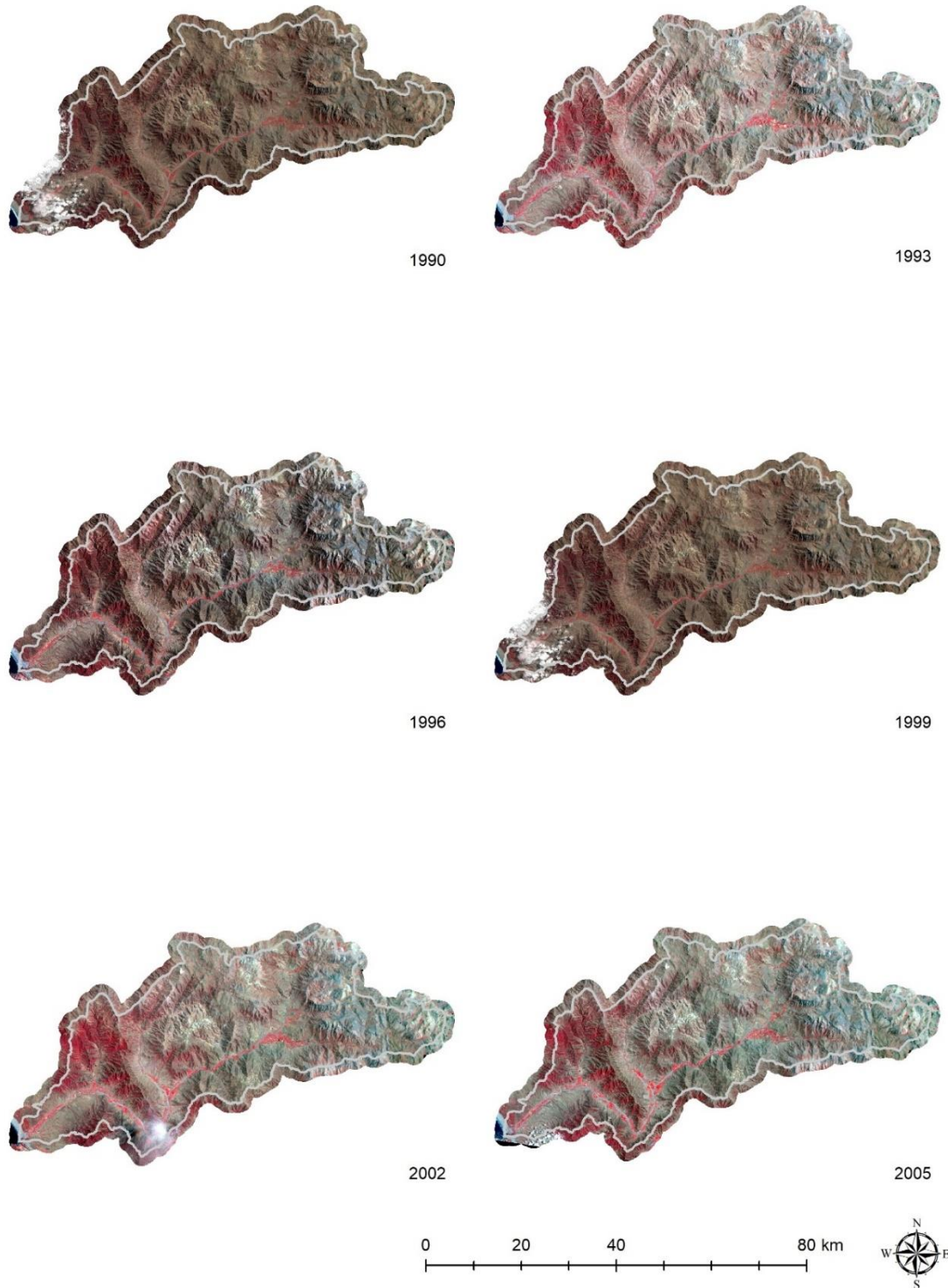






c. Compositions fausses couleurs infrarouges 4-3-2⁴²

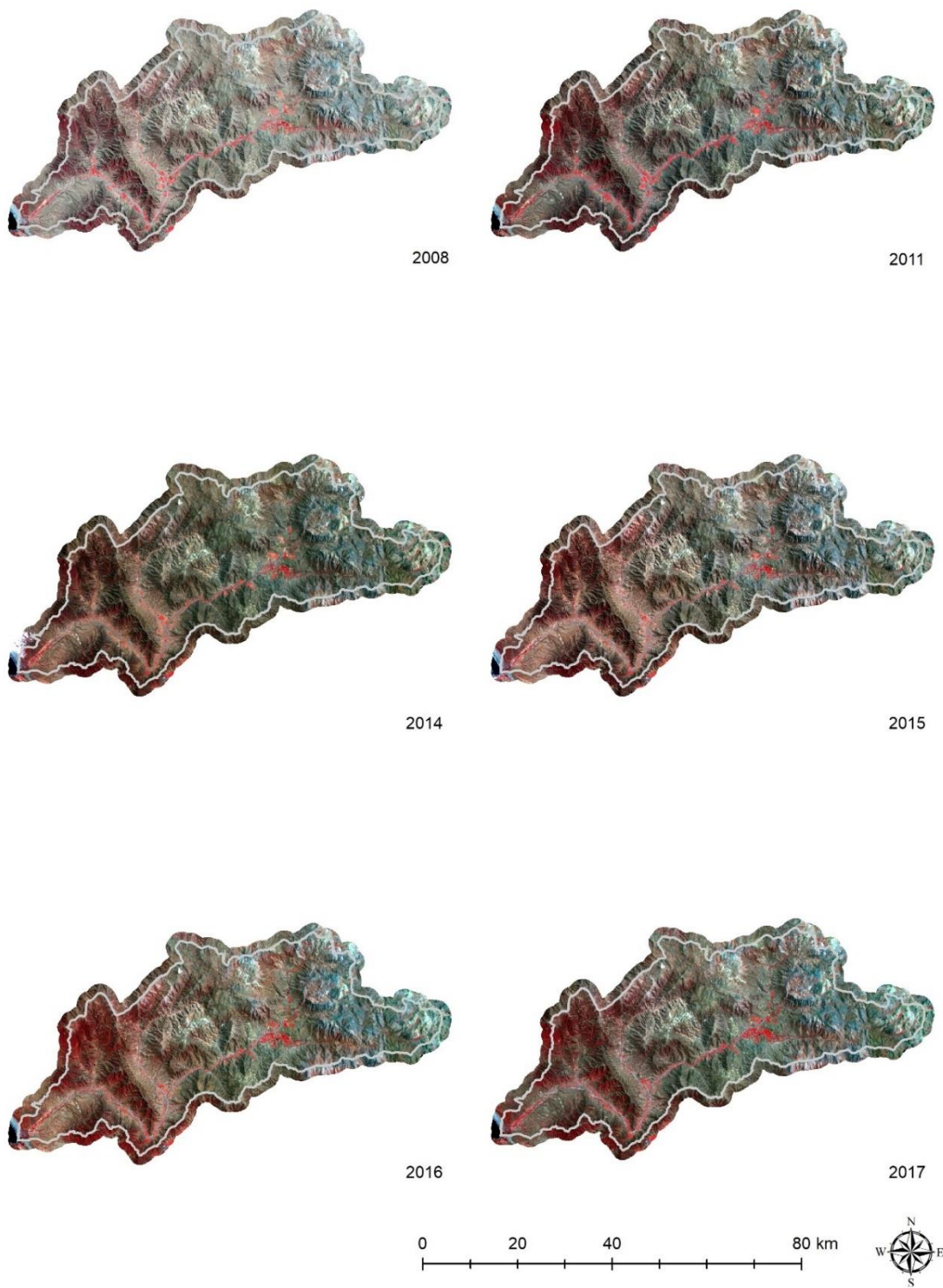
Évolution des cultures d'avocats (RVB)



⁴² Les plantations d'avocats sont représentées en couleur rouge et sont situées tout aux longes des cours d'eau Petorca et ligua dans le bassin de Petorca

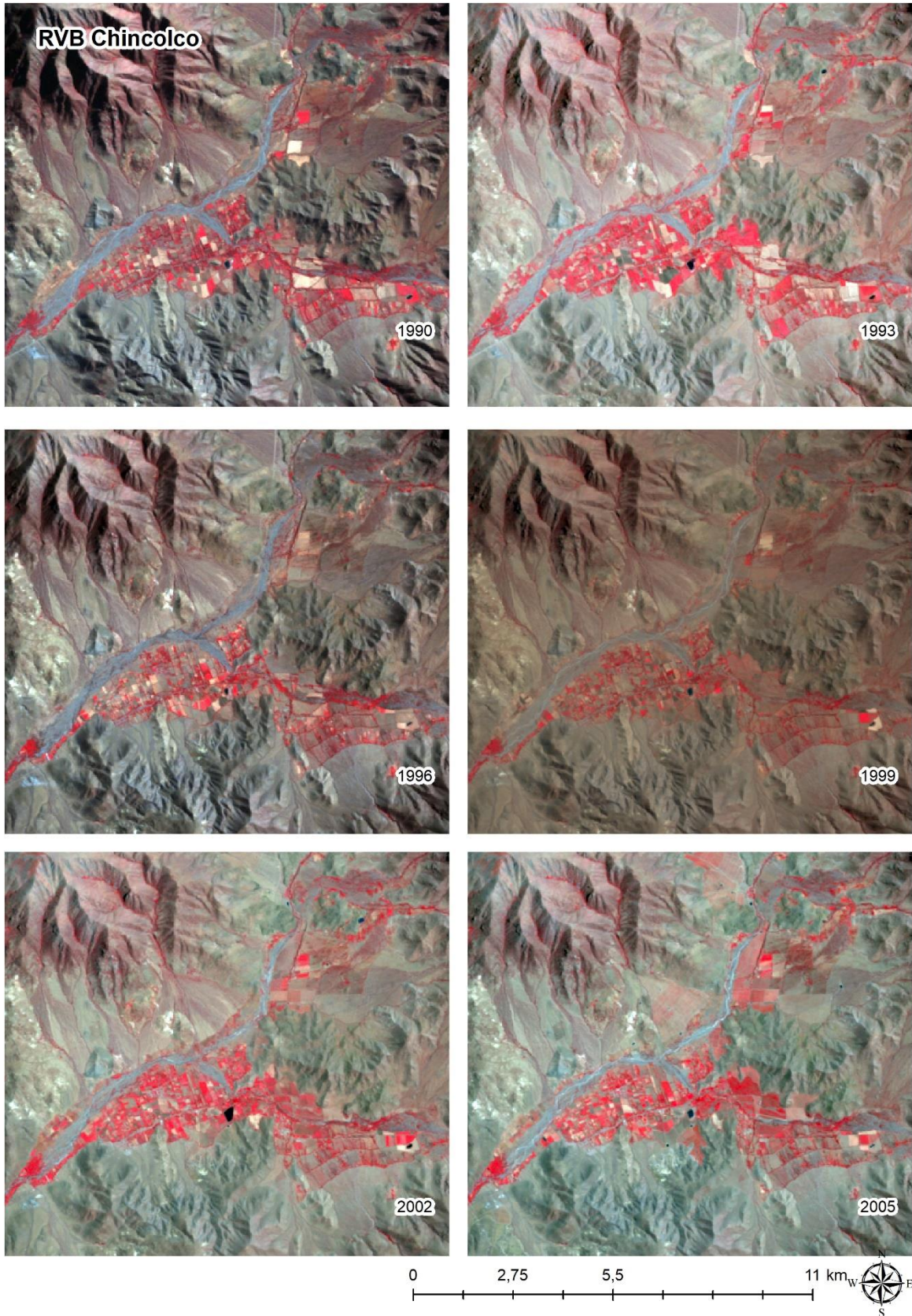
d. Compositions fausses couleurs infrarouges 5-4-3⁴³

Évolution des cultures d'avocats (RVB)

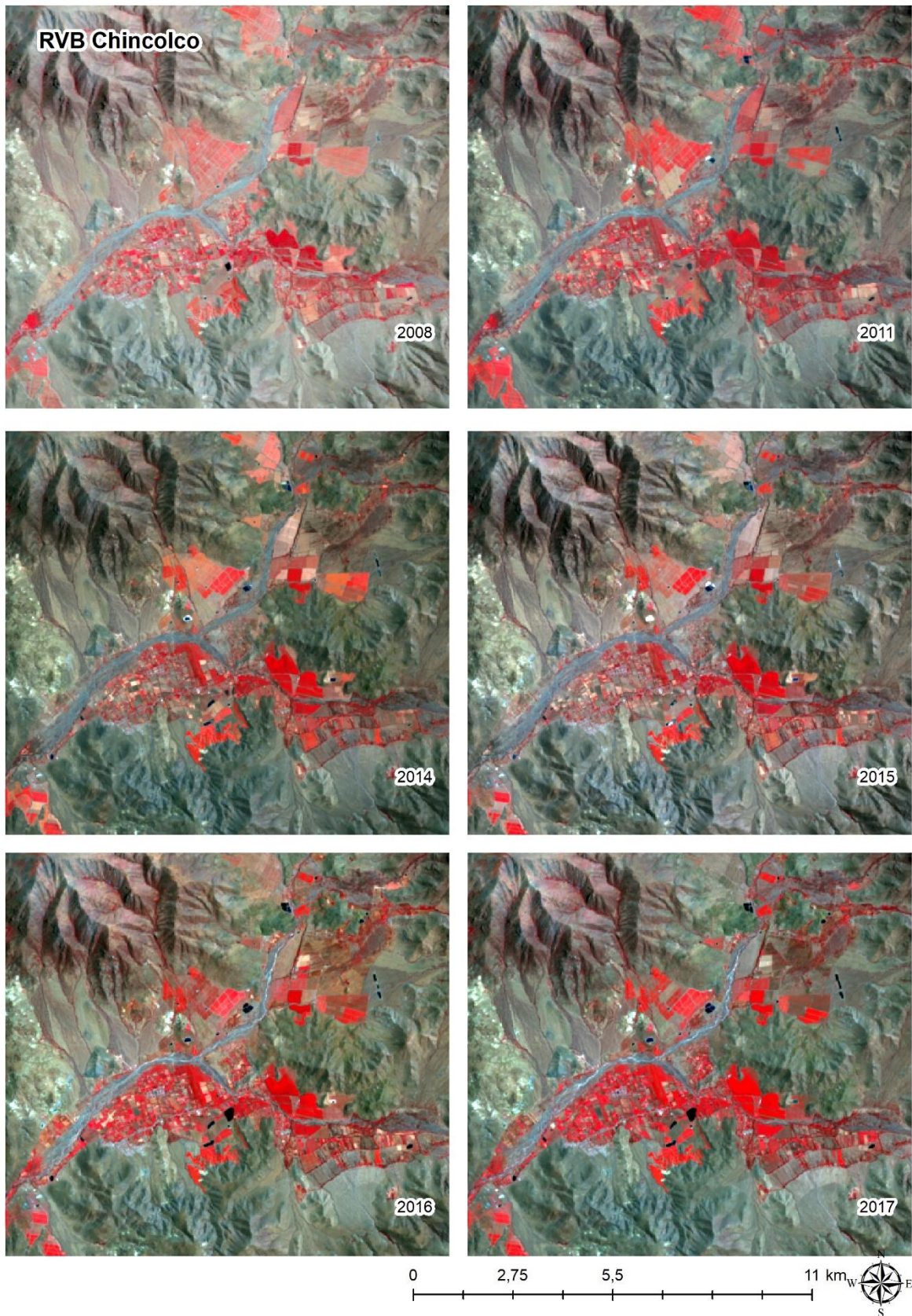


⁴³ Les bandes 5-4-3 sont appliquées dès 2014 comme dans l'annexe f dans le bassin de Petorca.

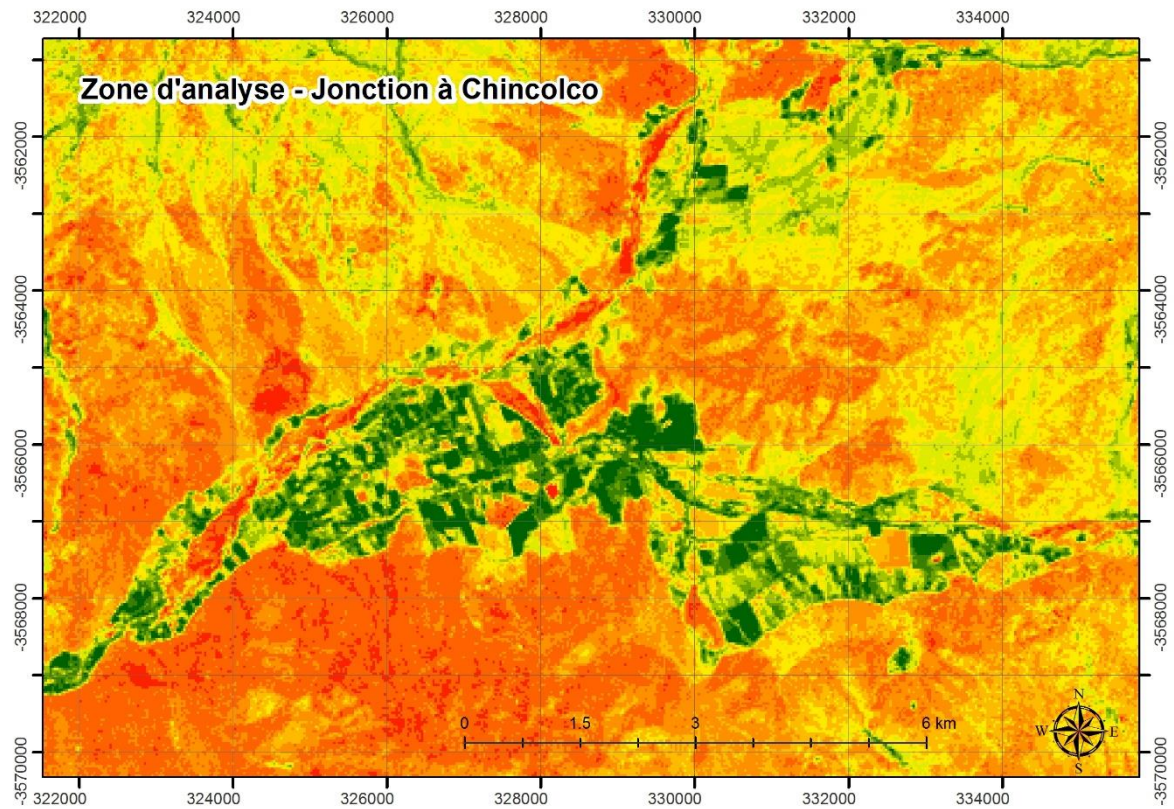
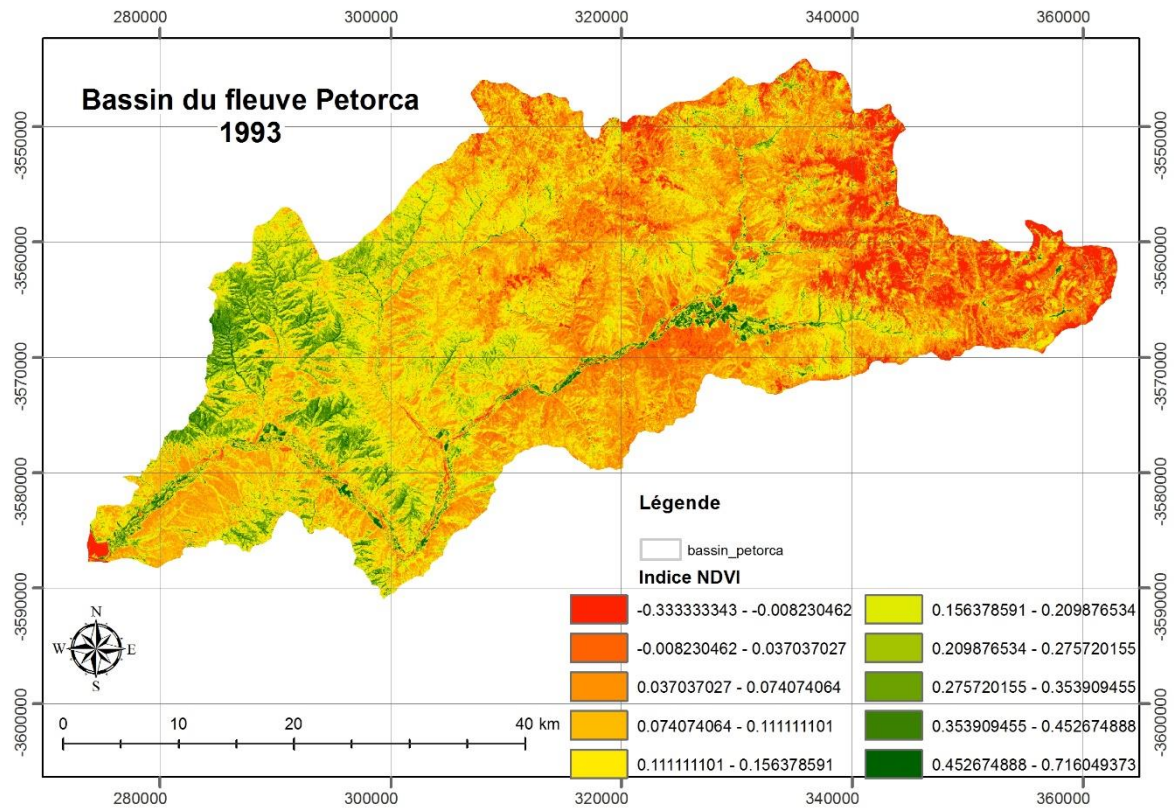
e. Zone de Chincolco : compositions fausses couleurs infrarouges 4-3-2

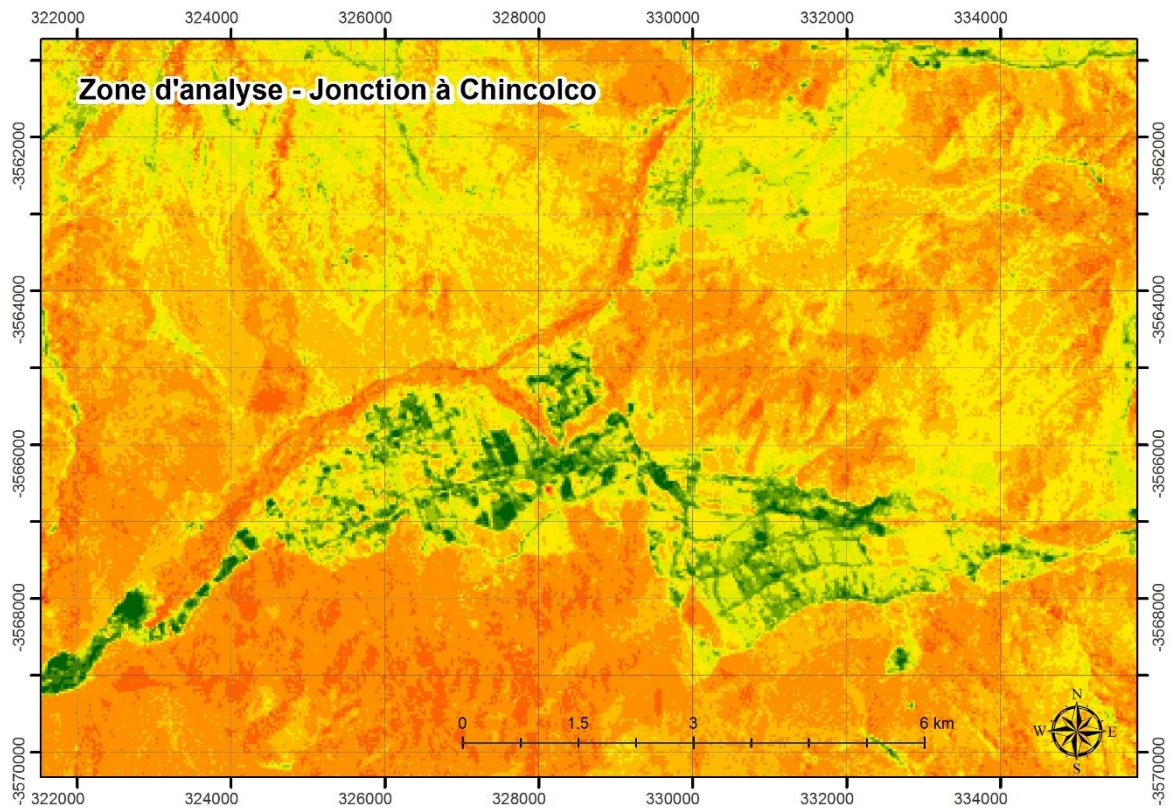
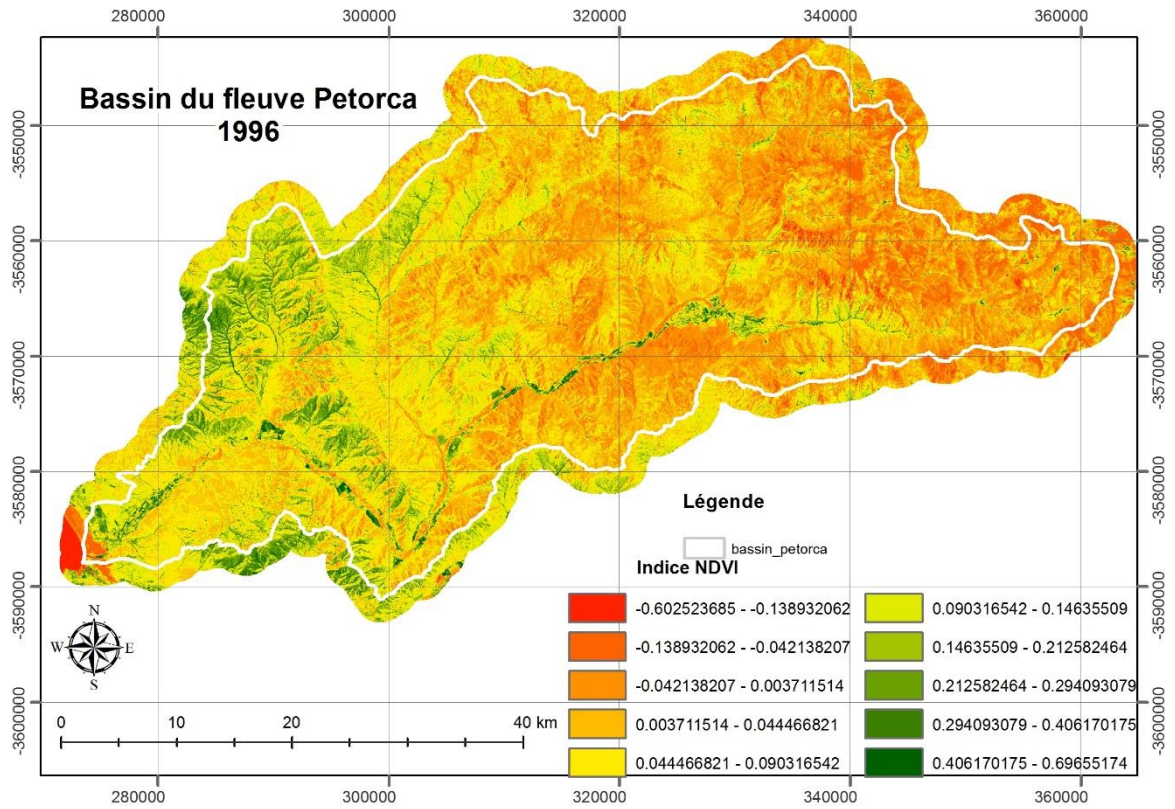


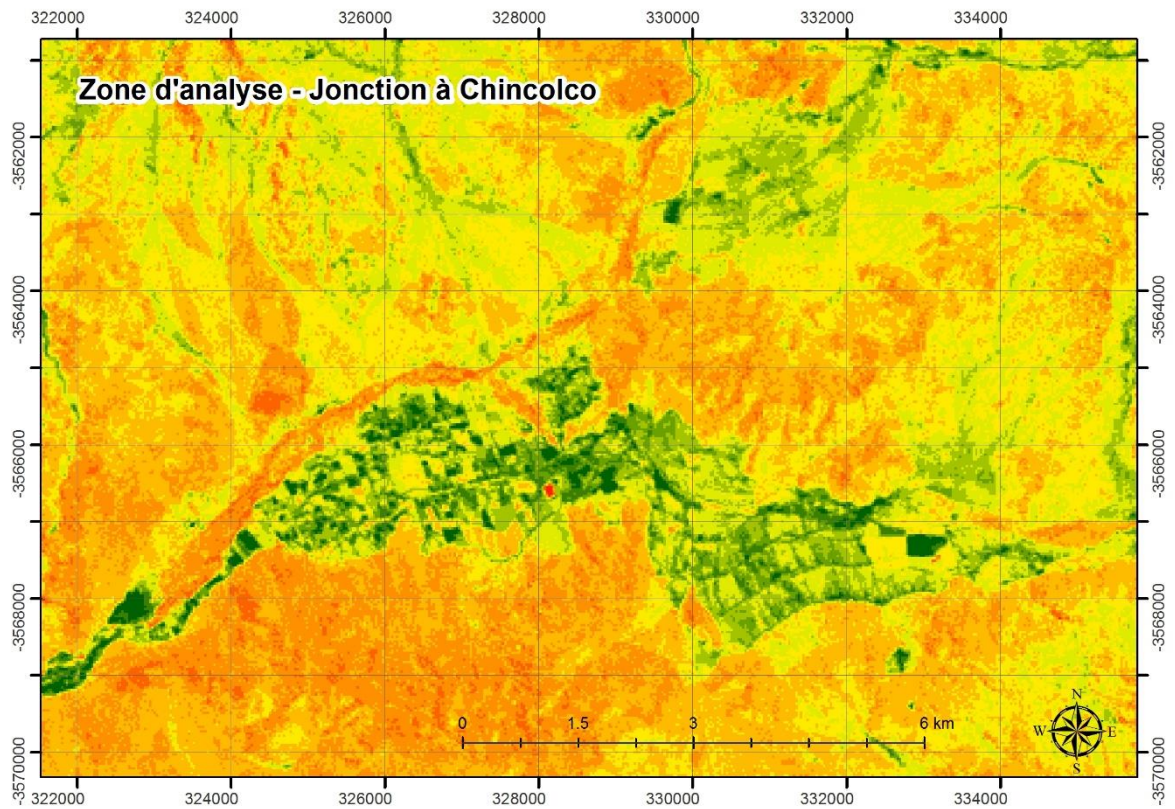
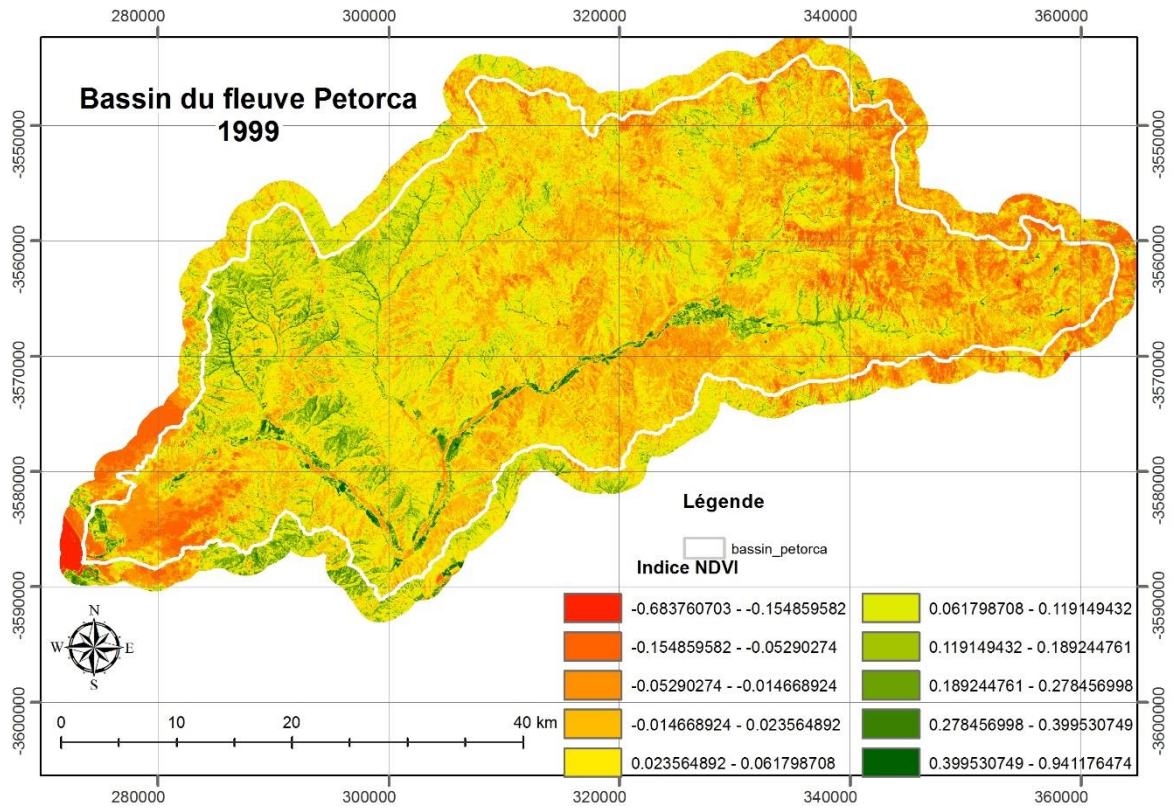
f. Zone de Chincolco : compositions fausses couleurs infrarouges 5-4-3

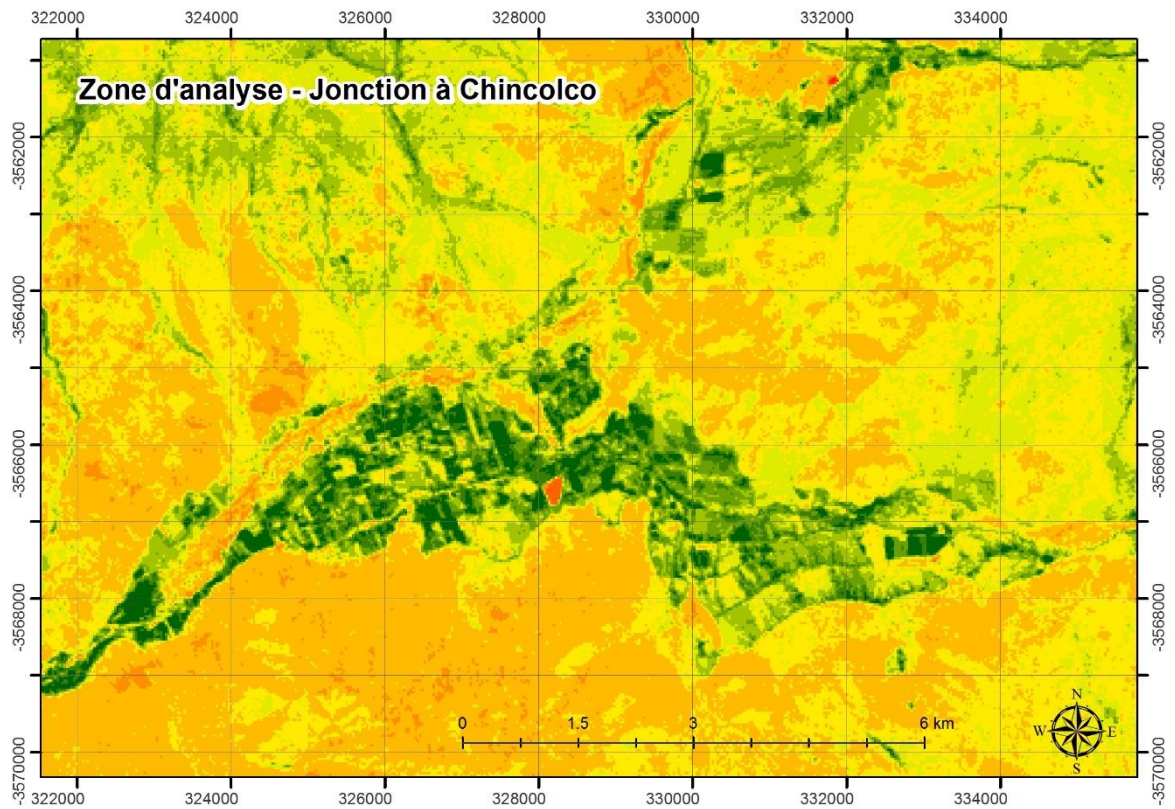
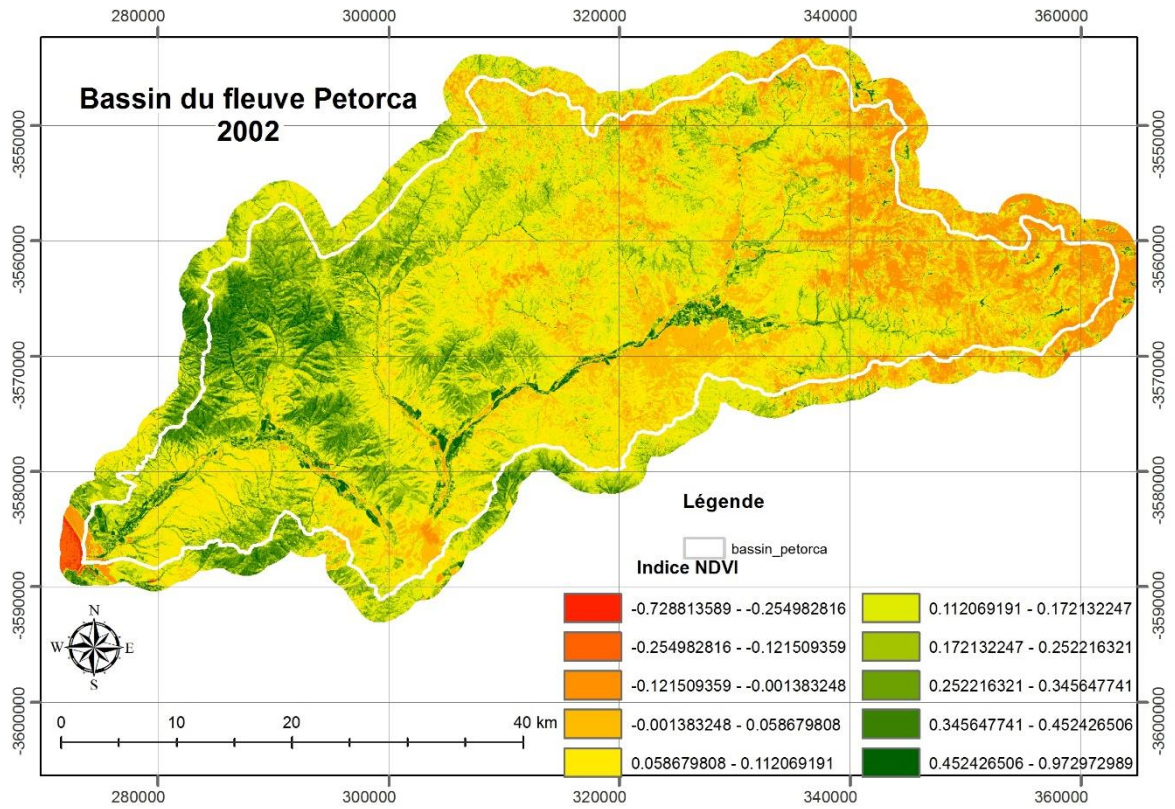


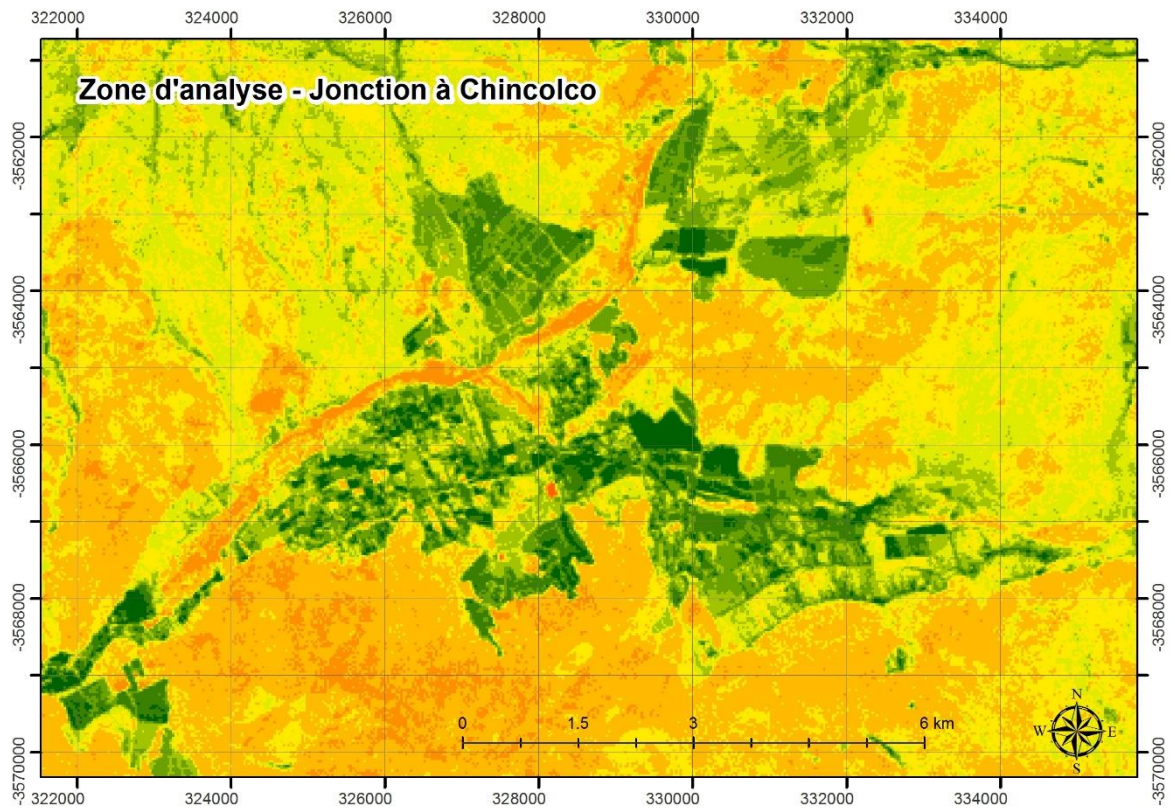
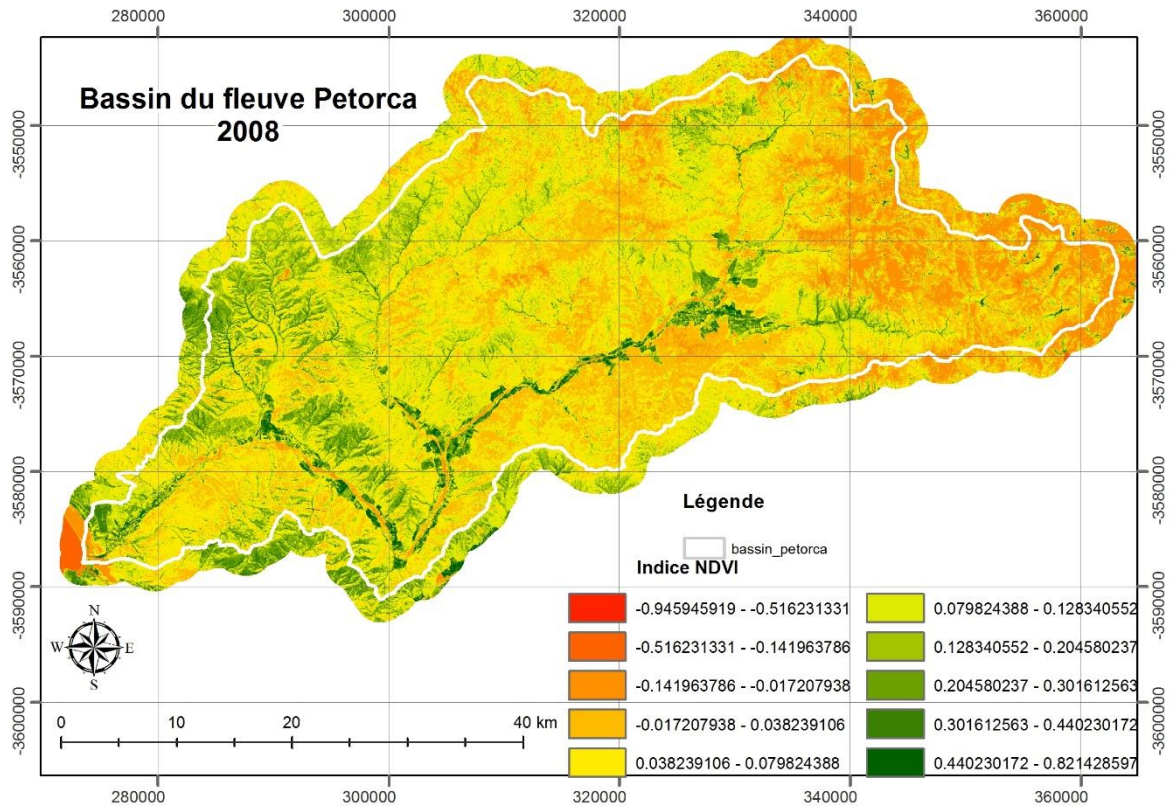
g. Indice de végétation par différence normalisé NDVI

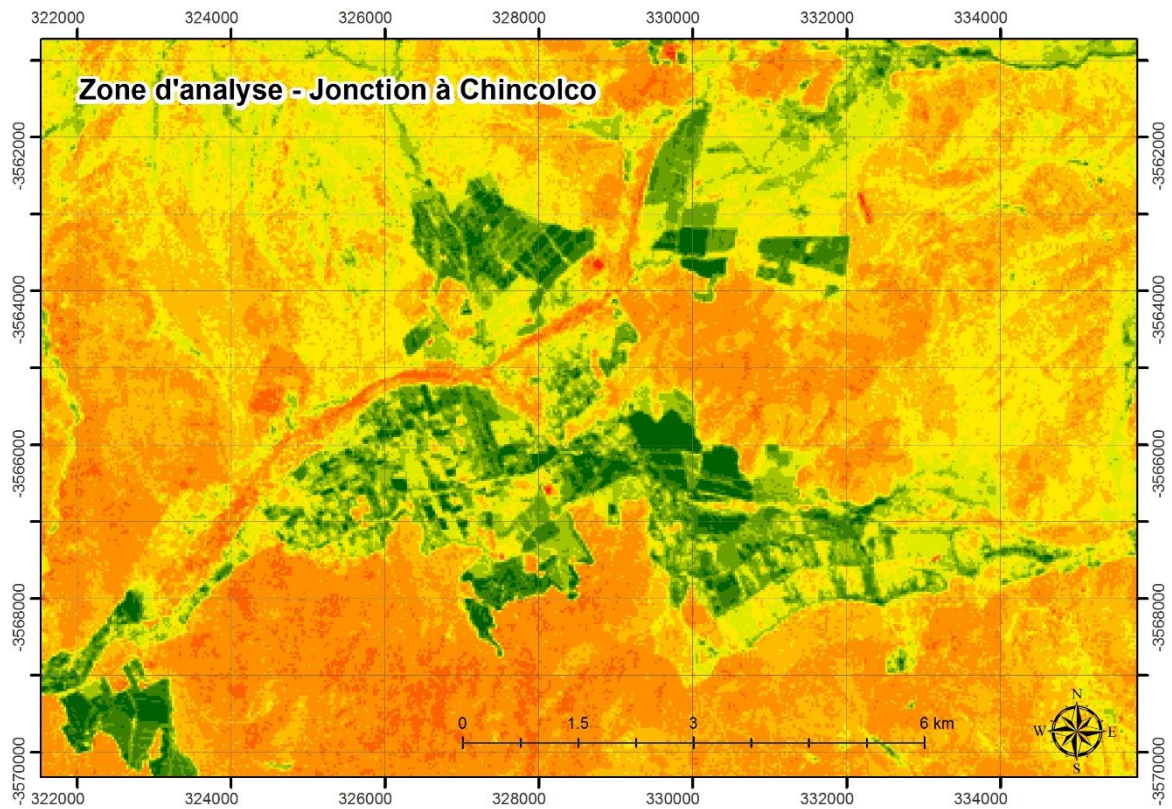
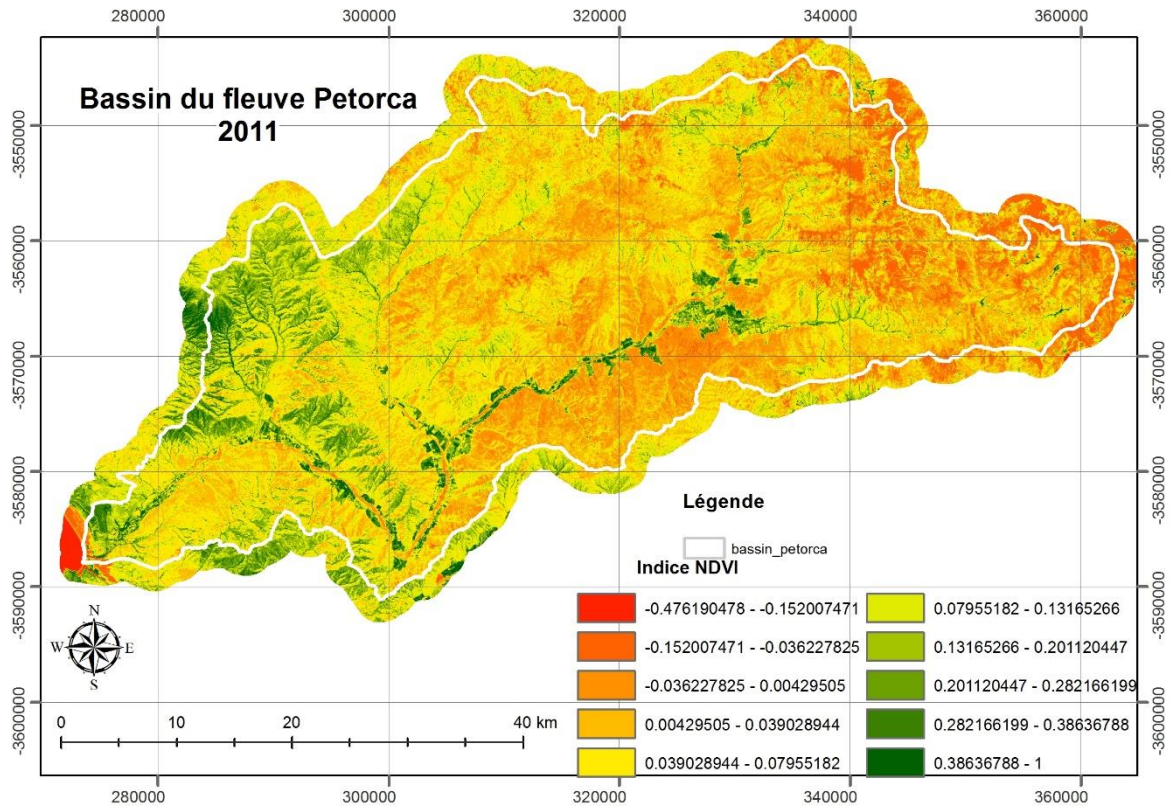


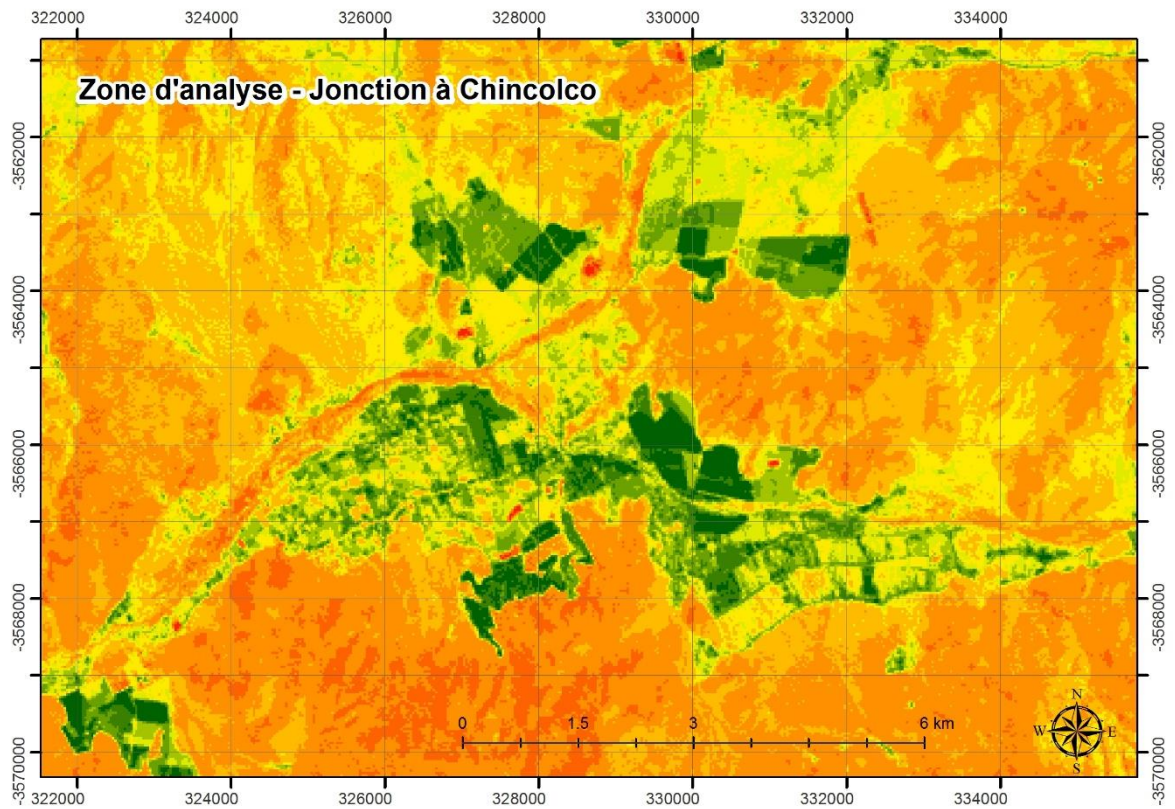
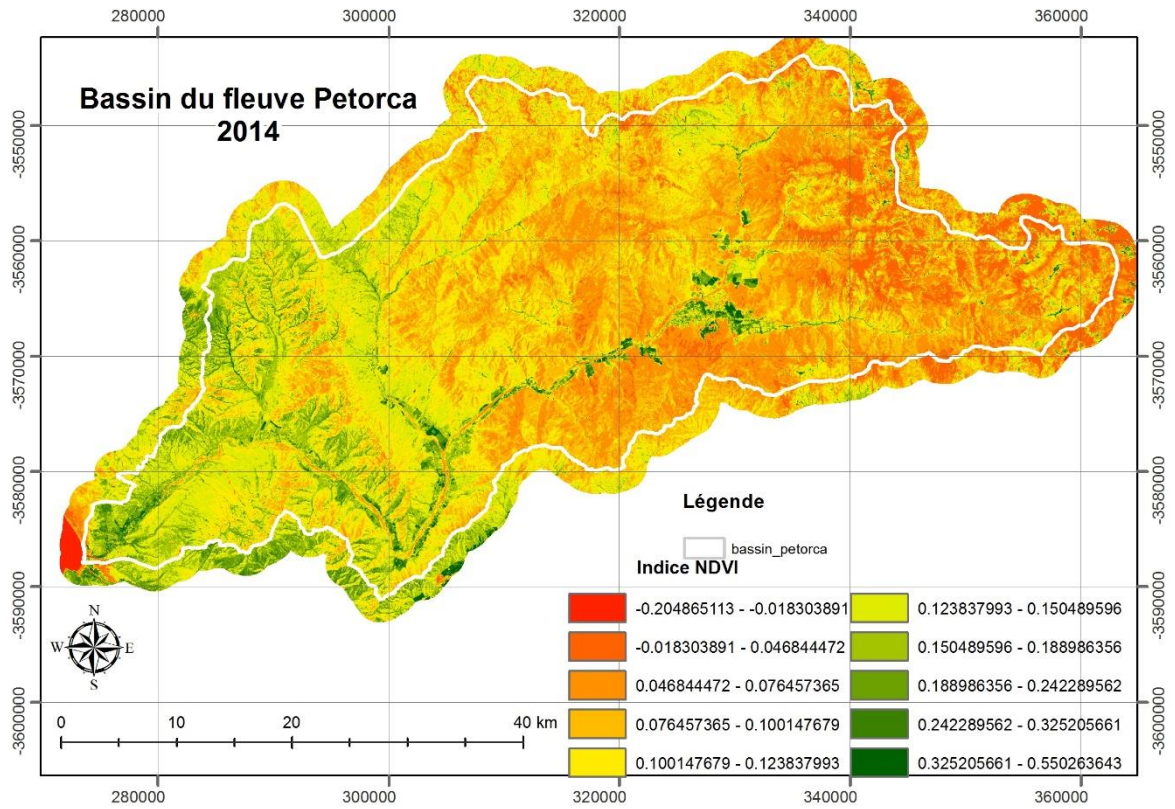


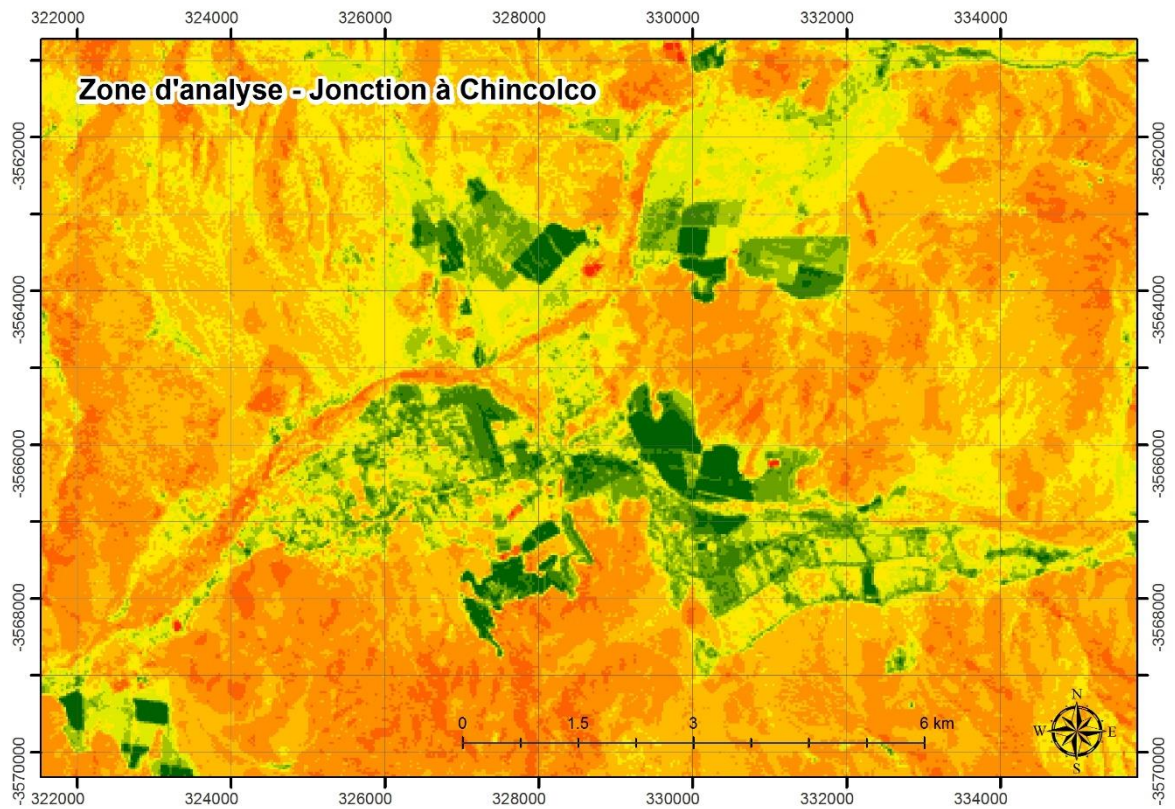
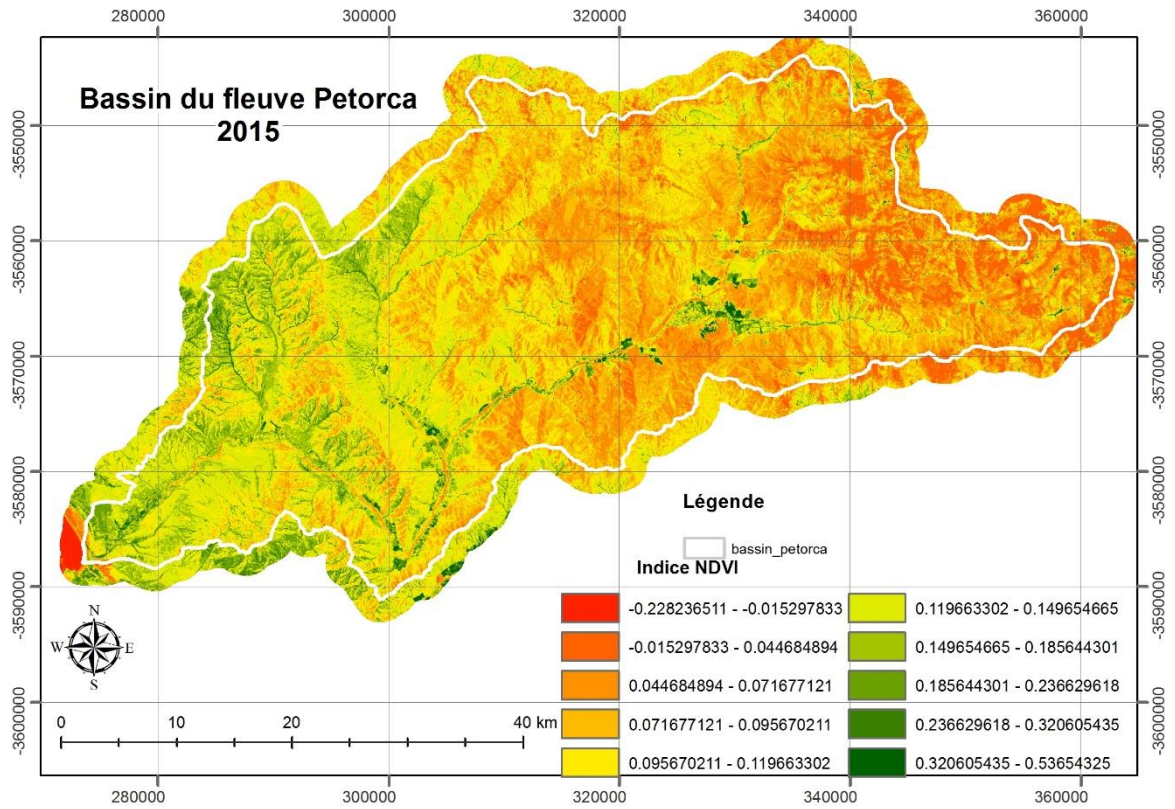


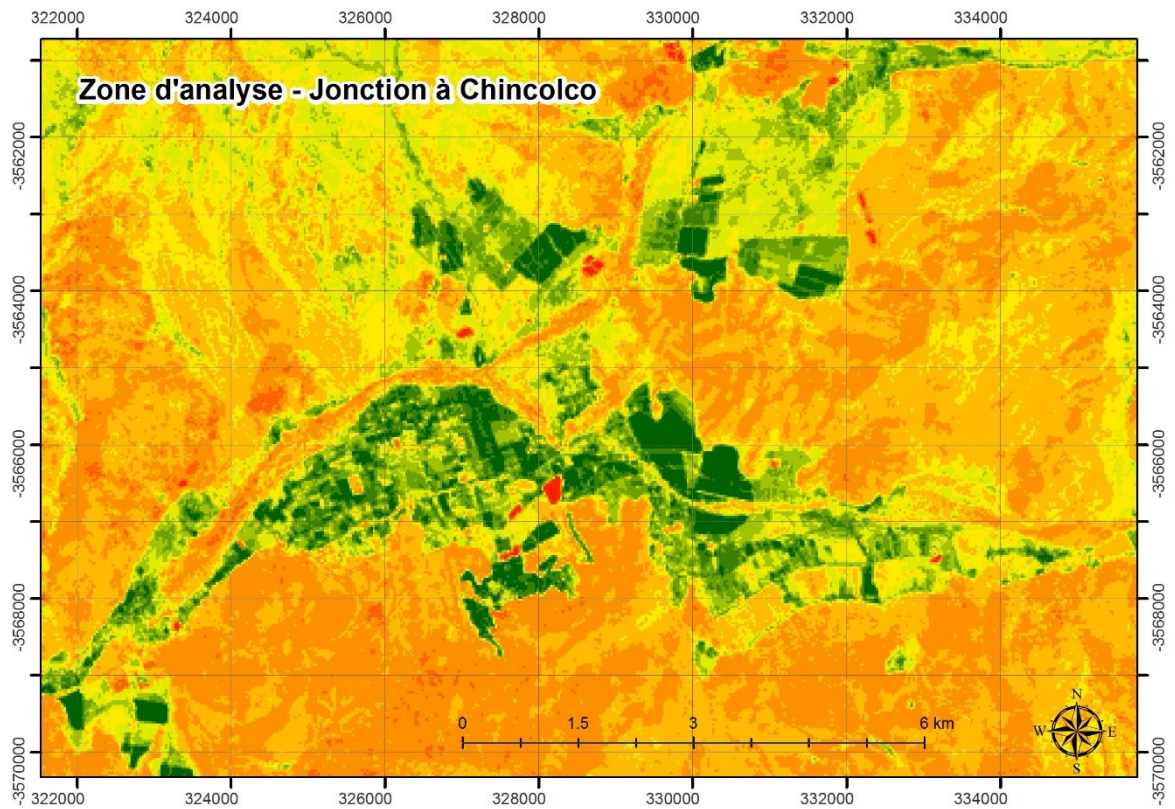
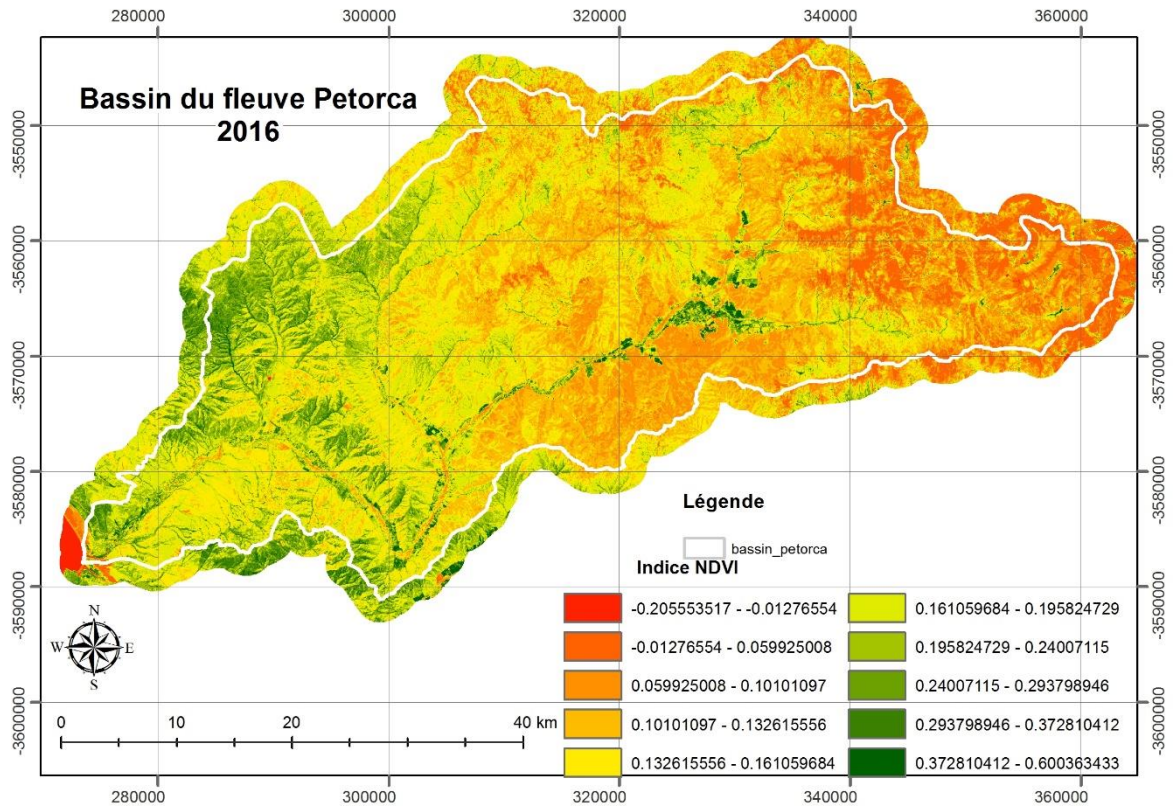


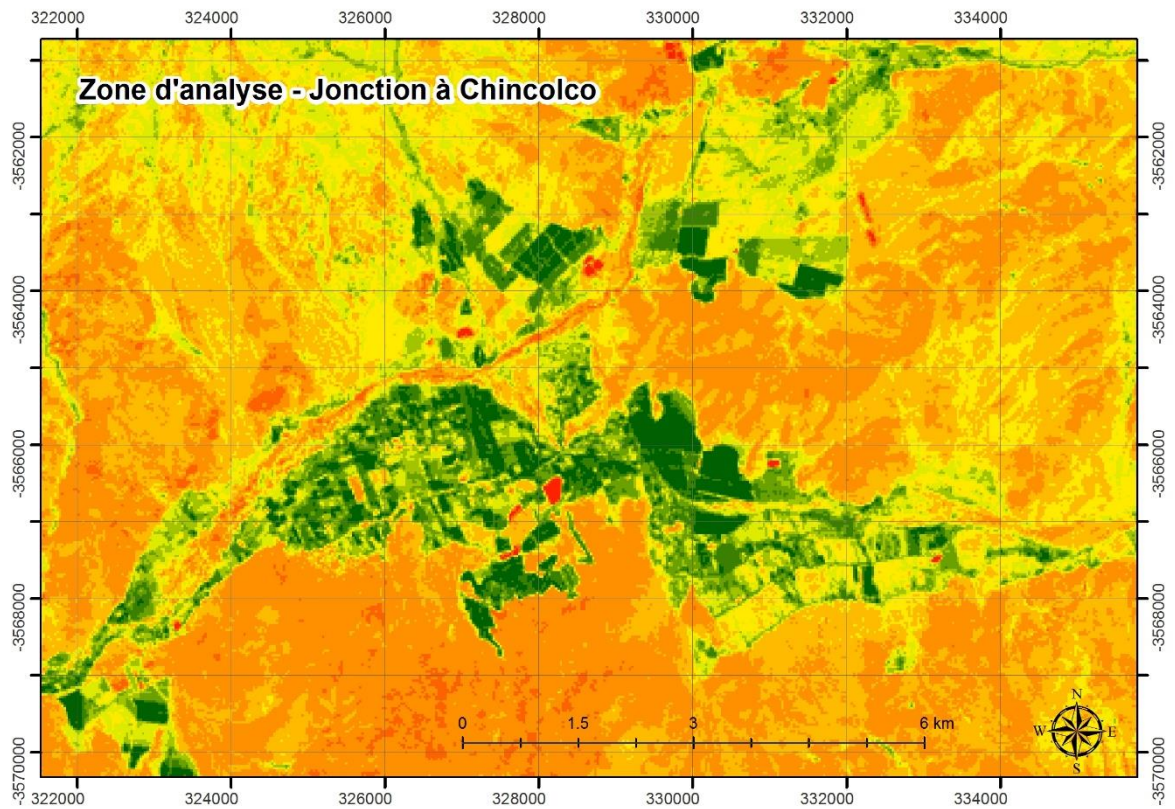
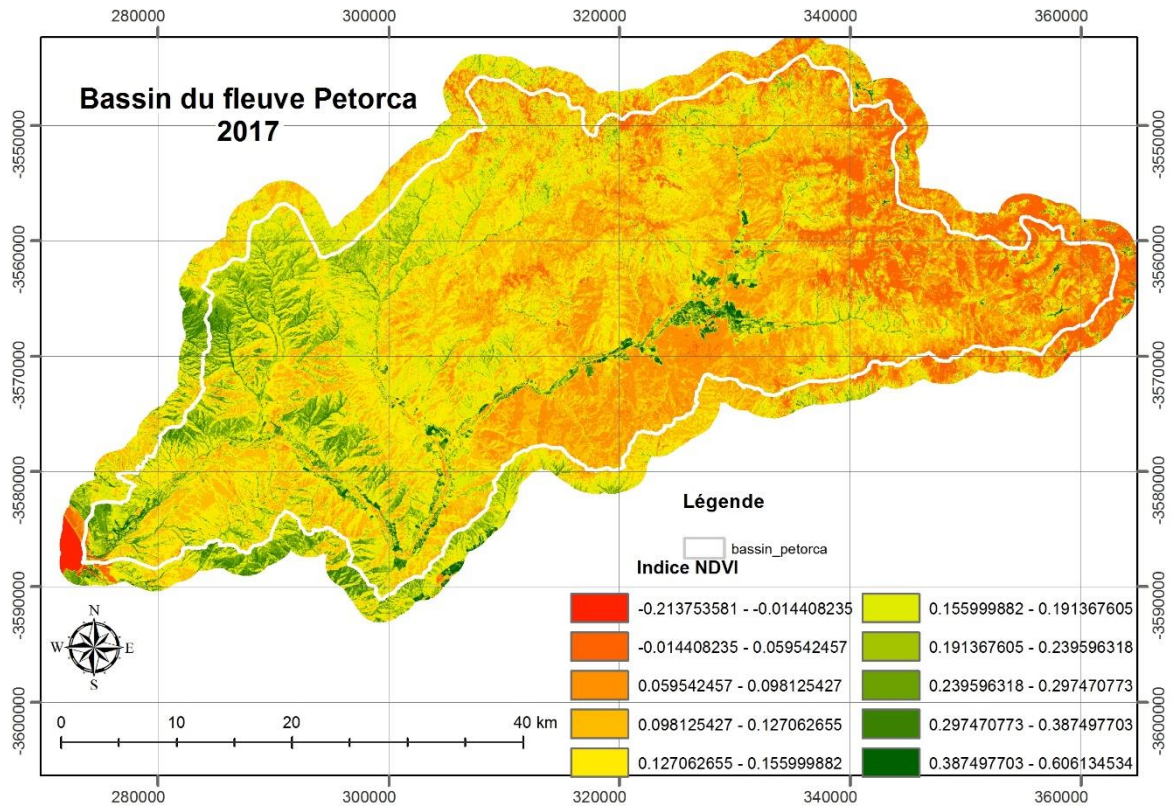


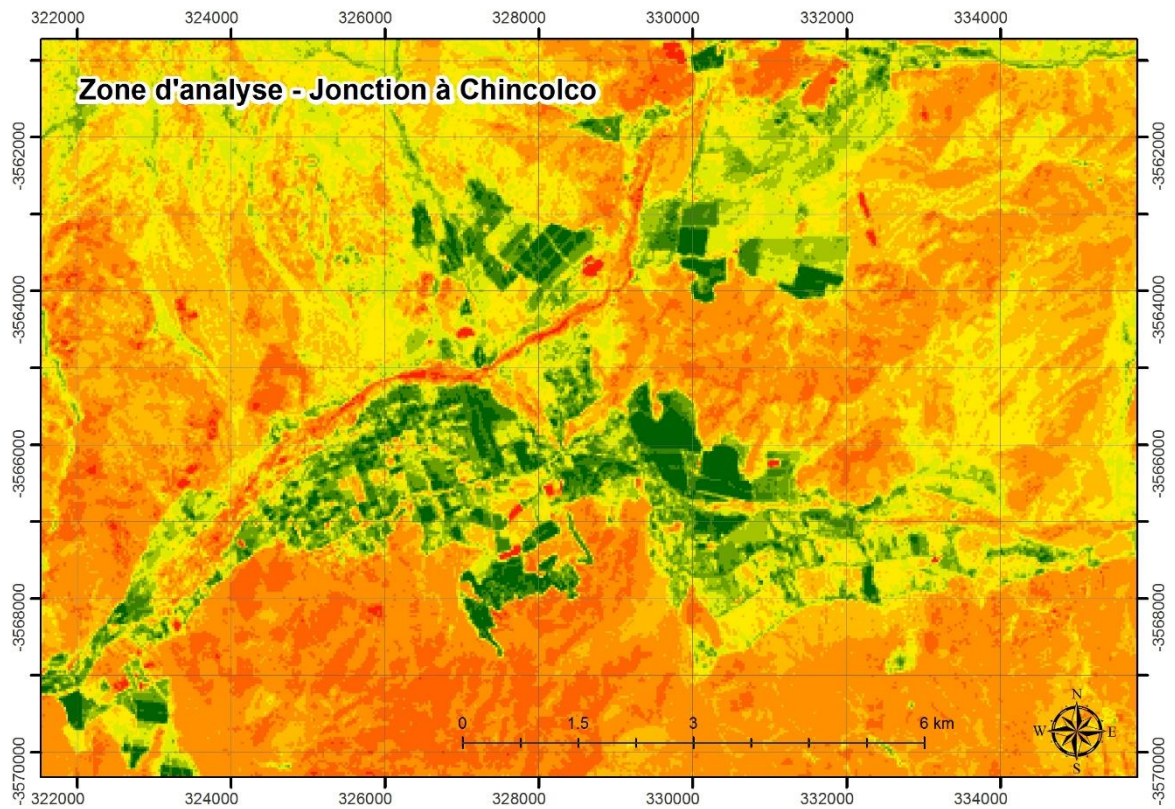
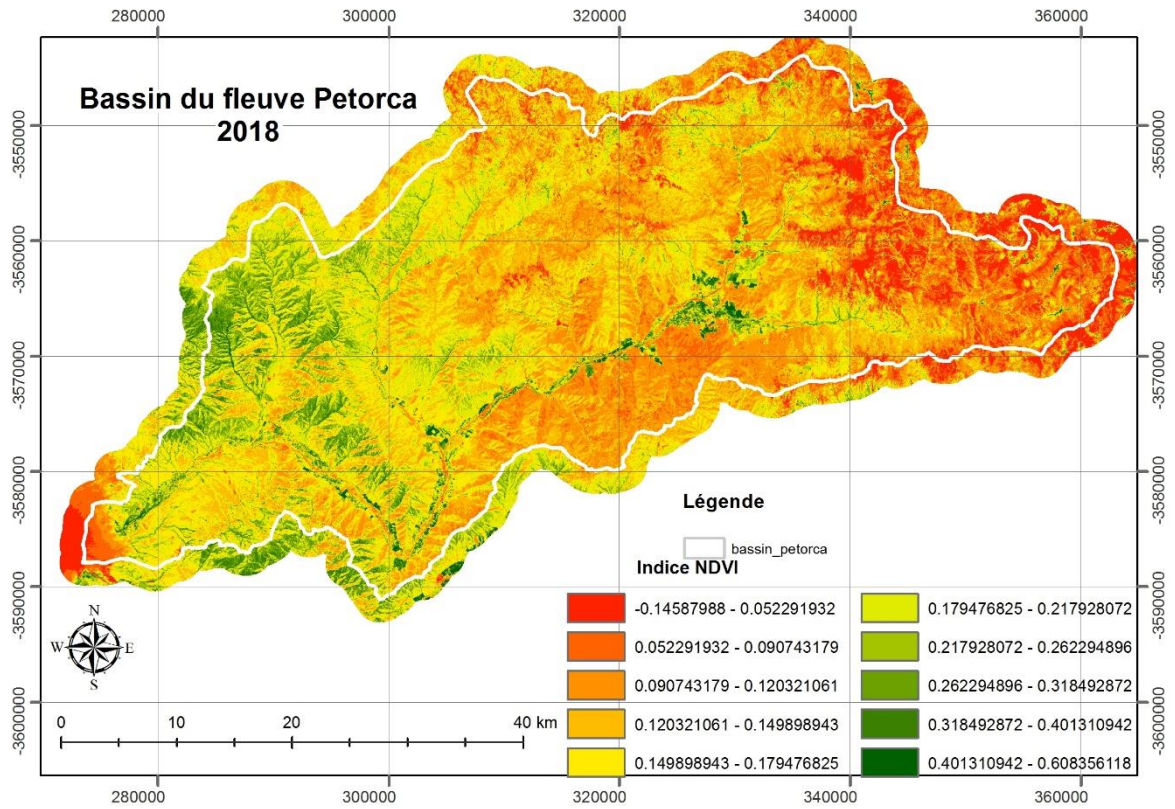






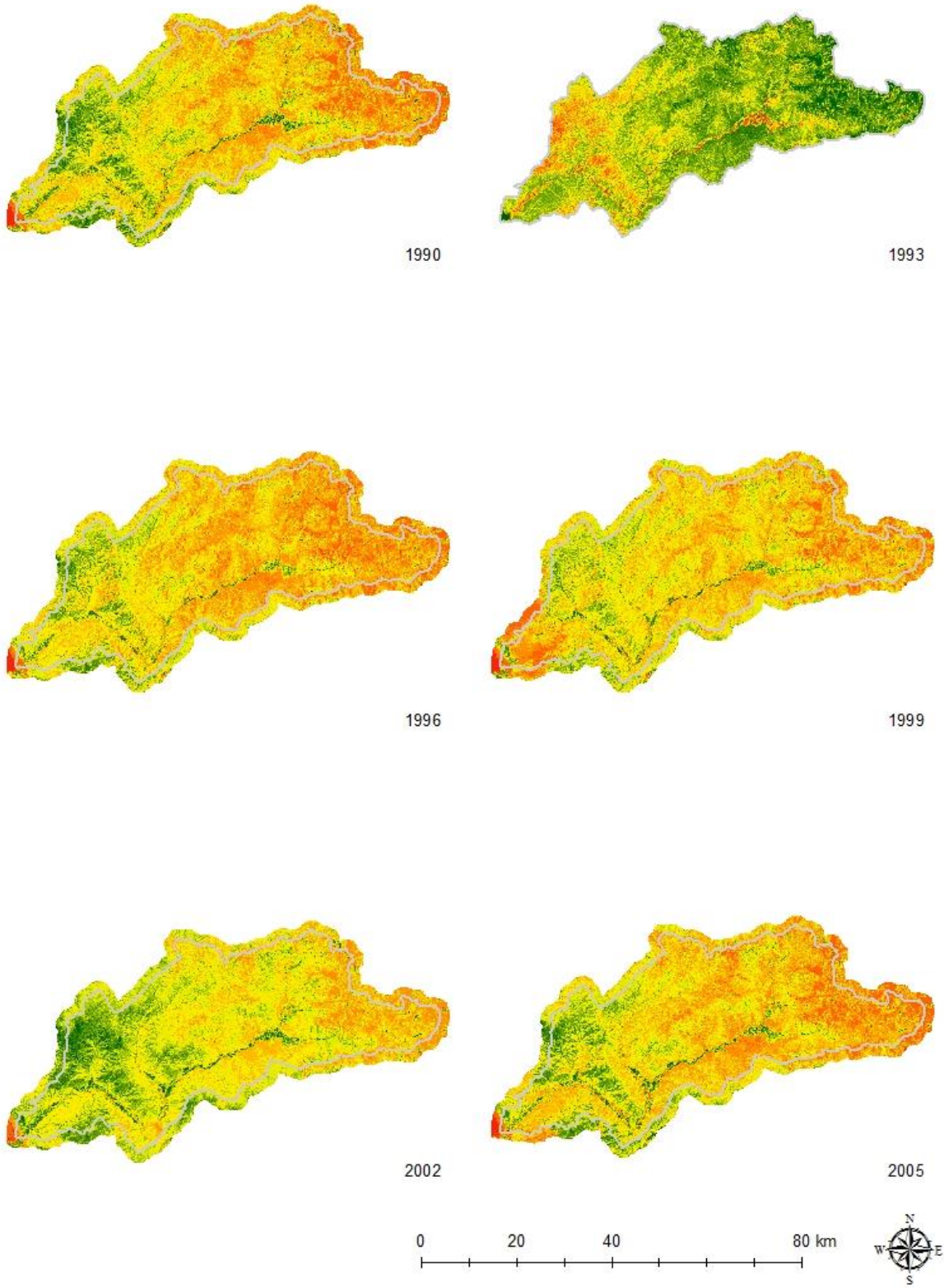




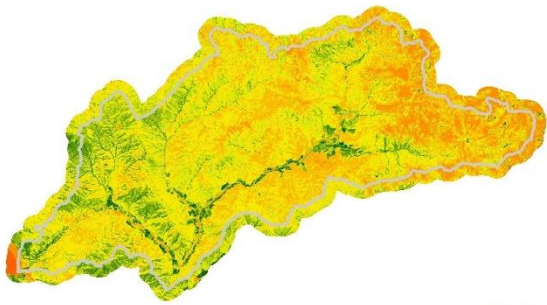


h. Bassin hydrographique Petorca (NDVI)

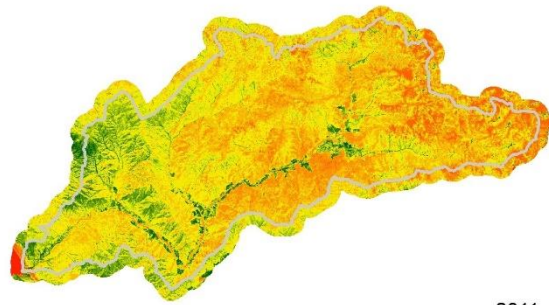
Province de Petorca (NDVI)



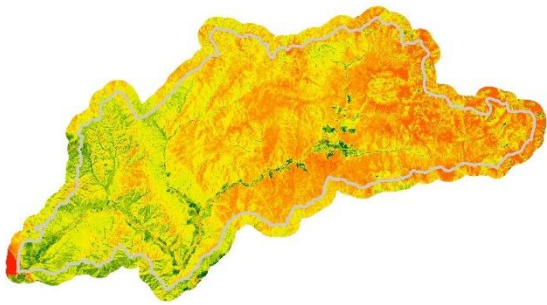
Province de Petorca NDVI



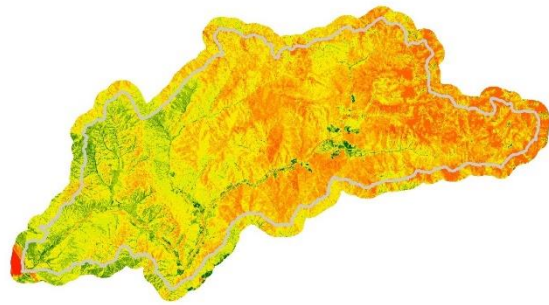
2008



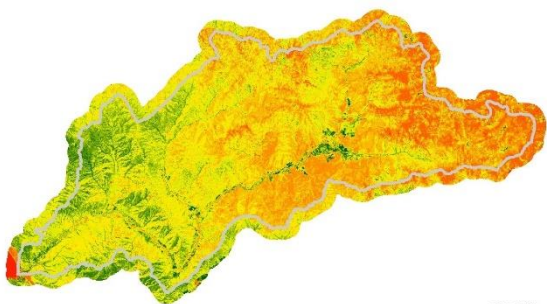
2011



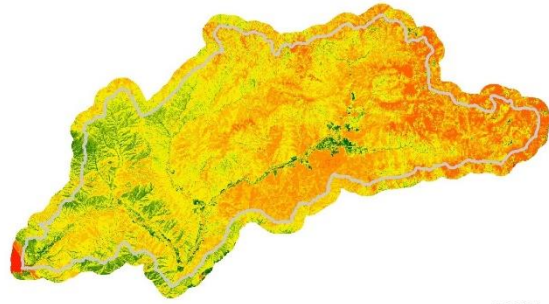
2014



2015



2016

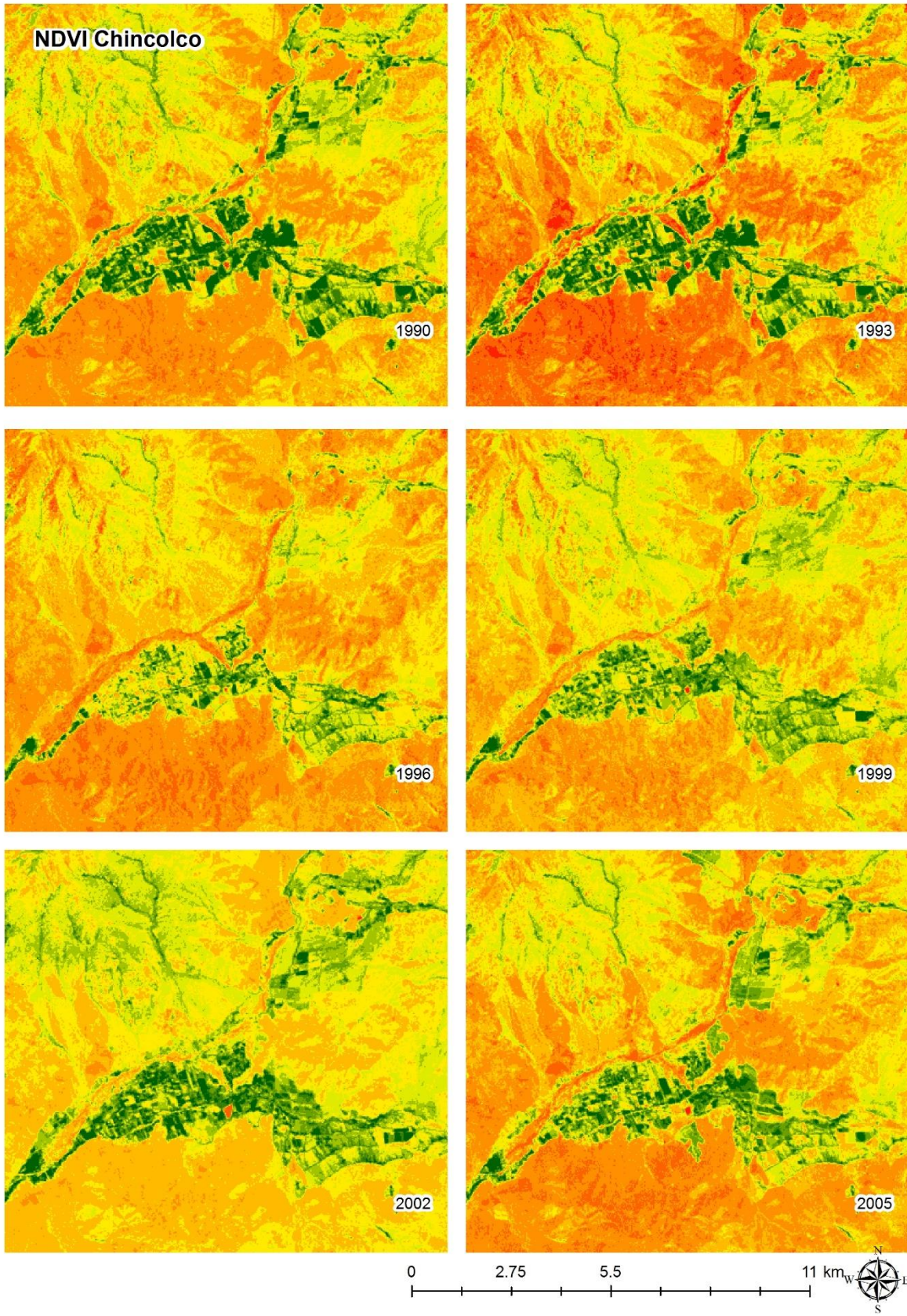


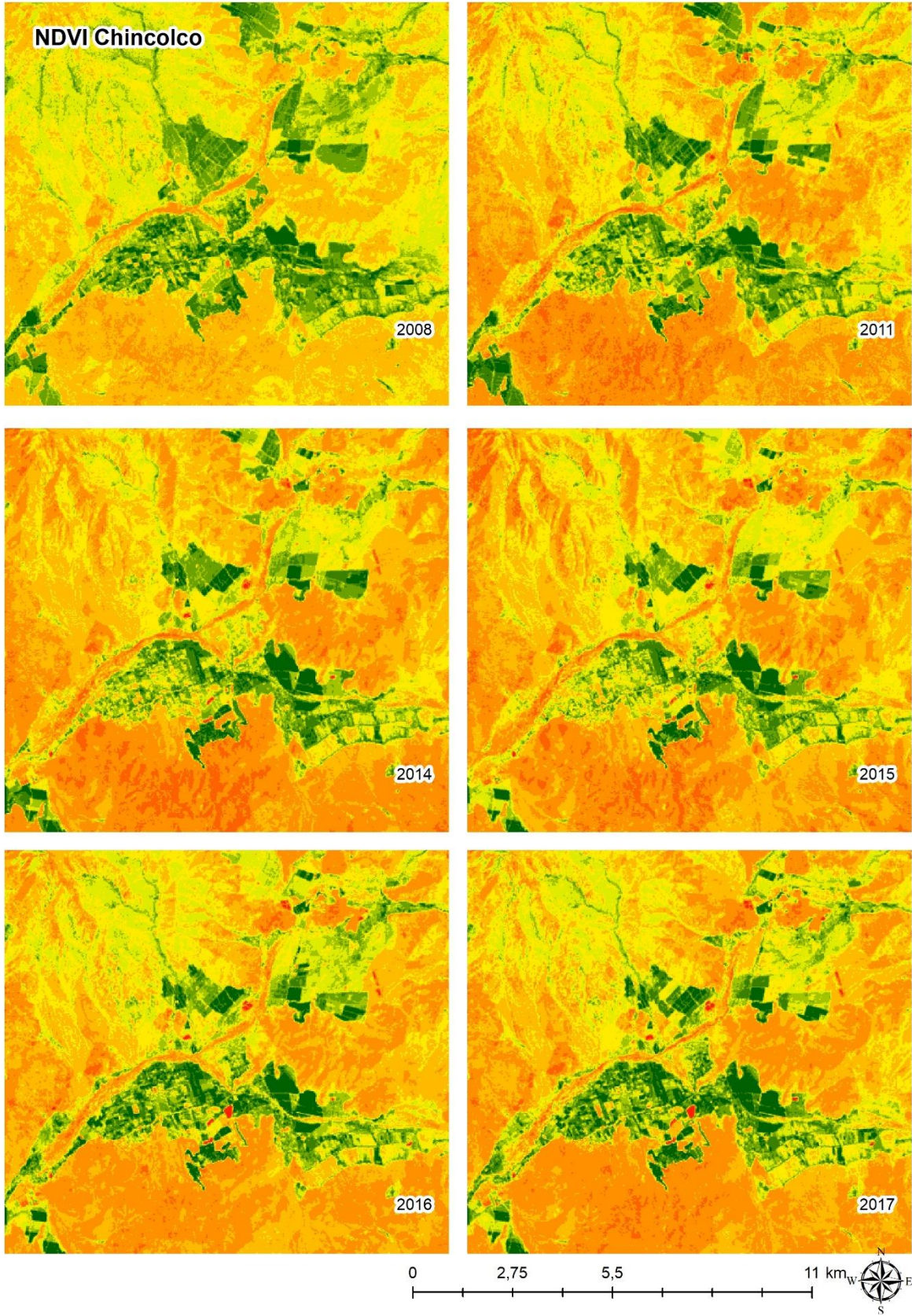
2017

0 20 40 80 km

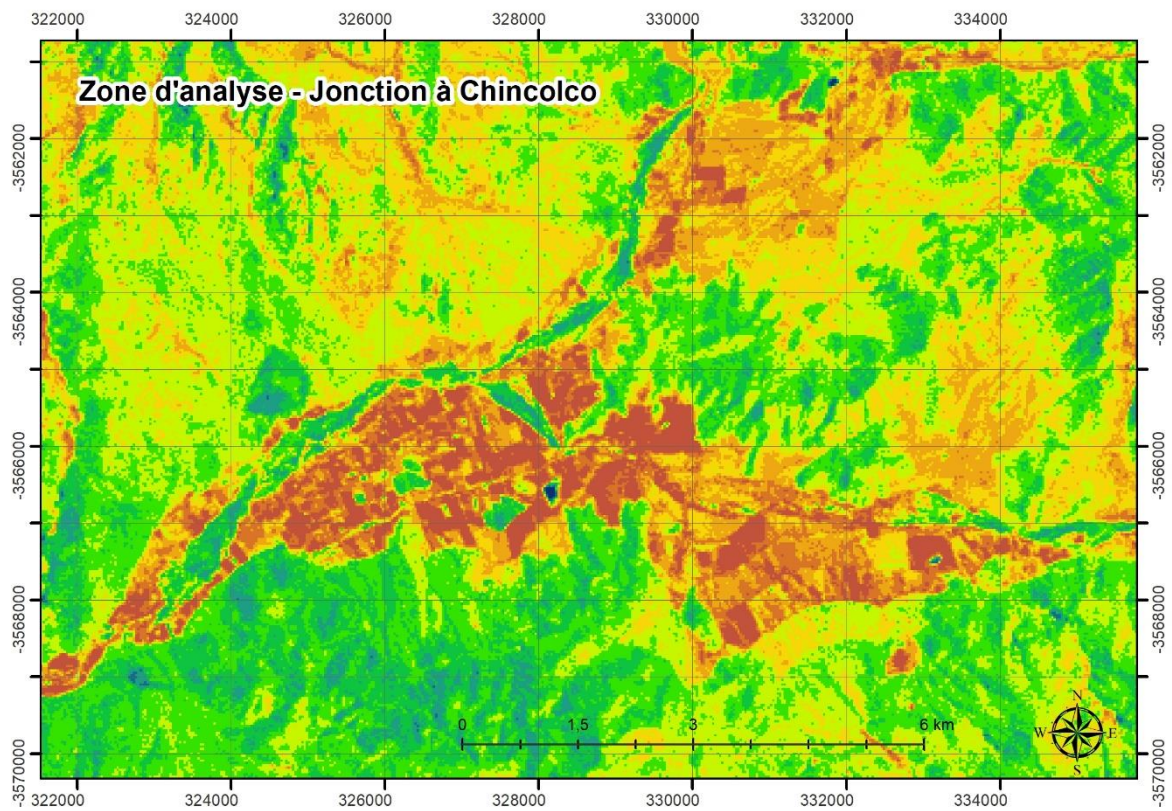
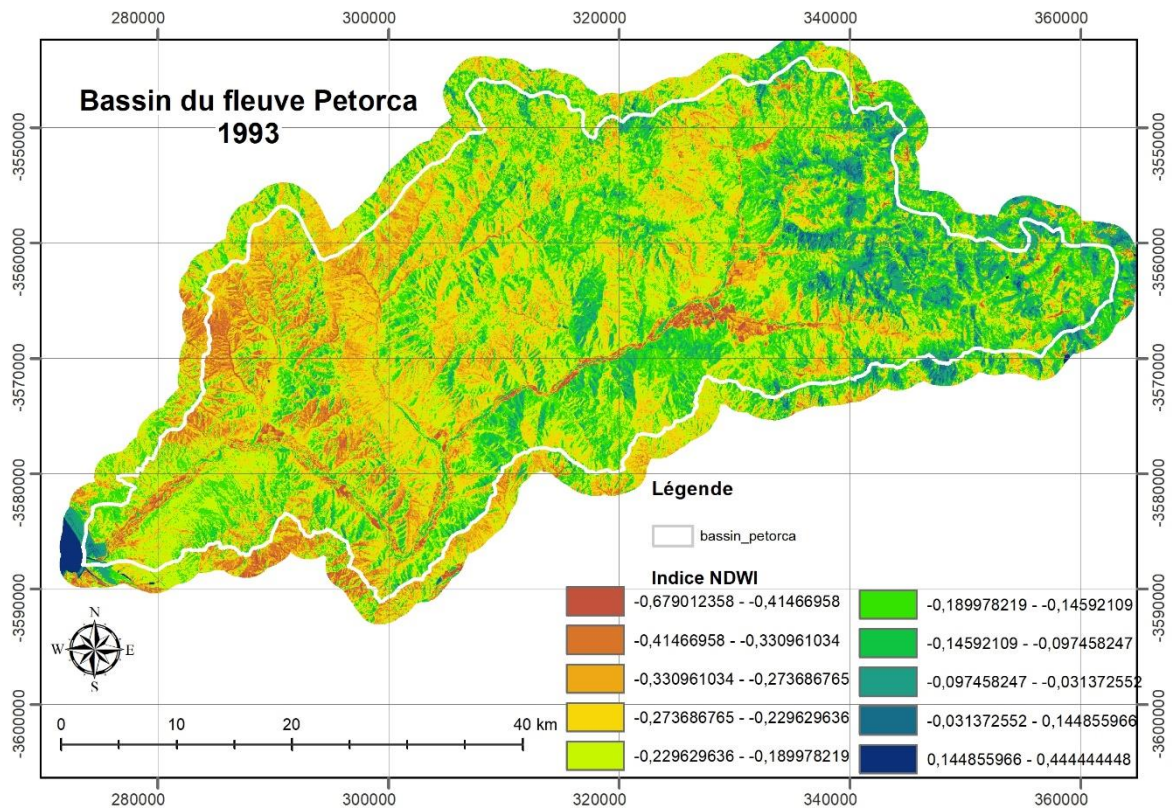


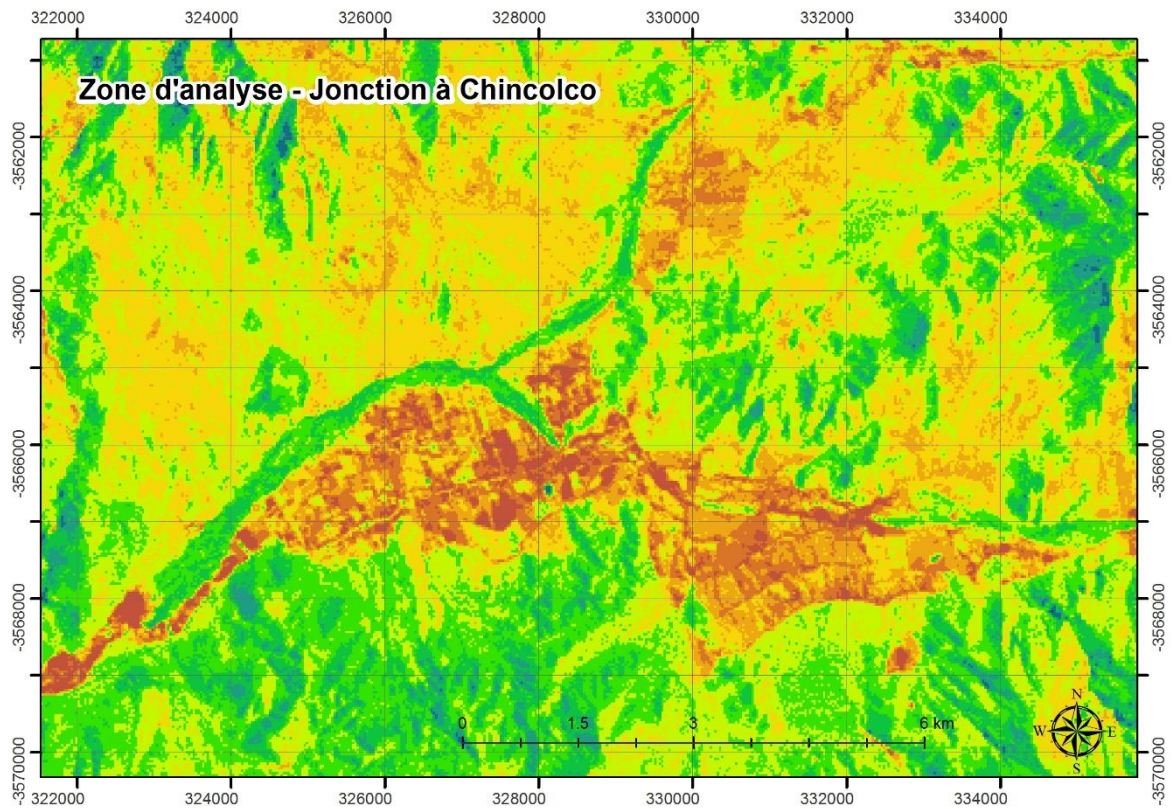
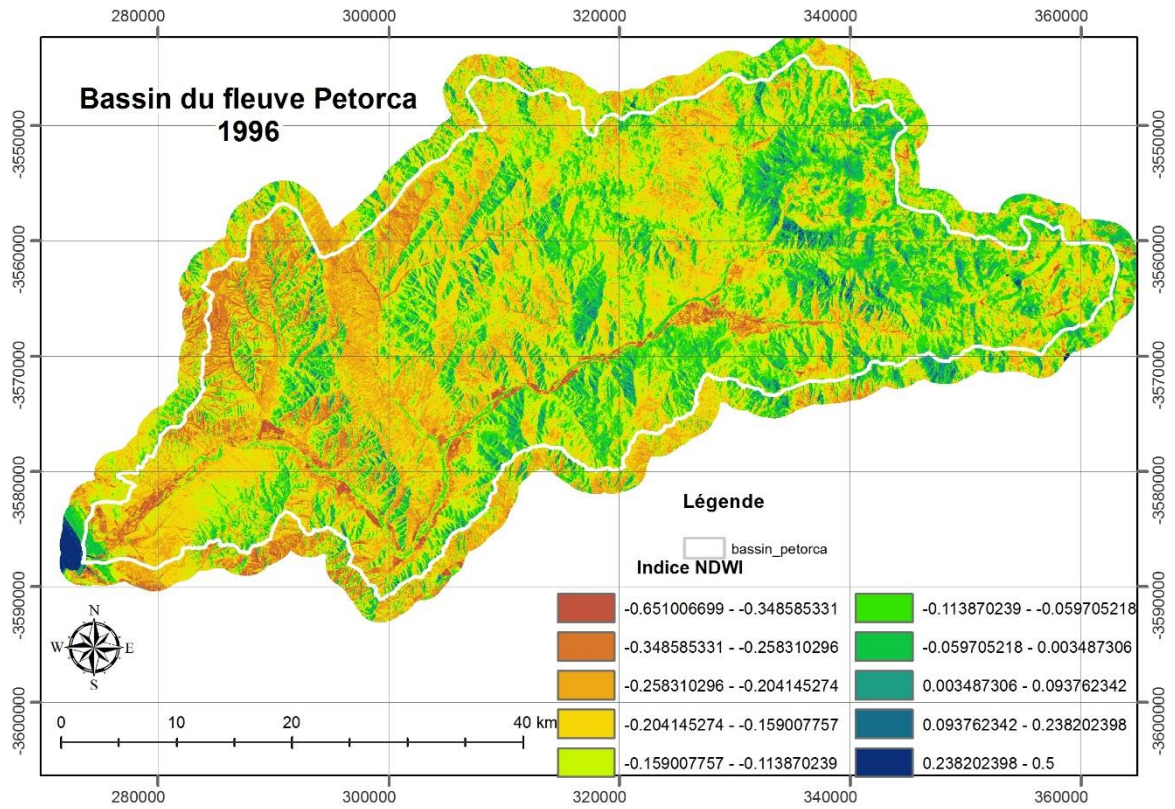
i. NDVI zone de Chincolco

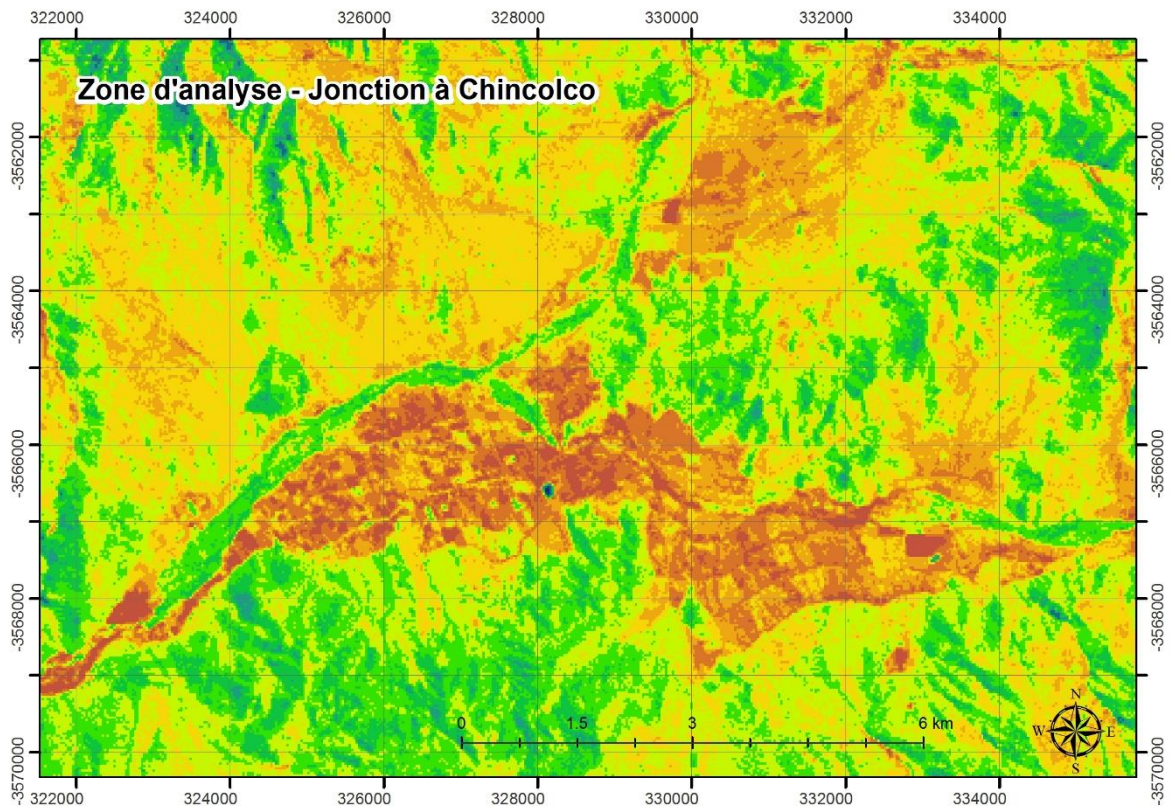
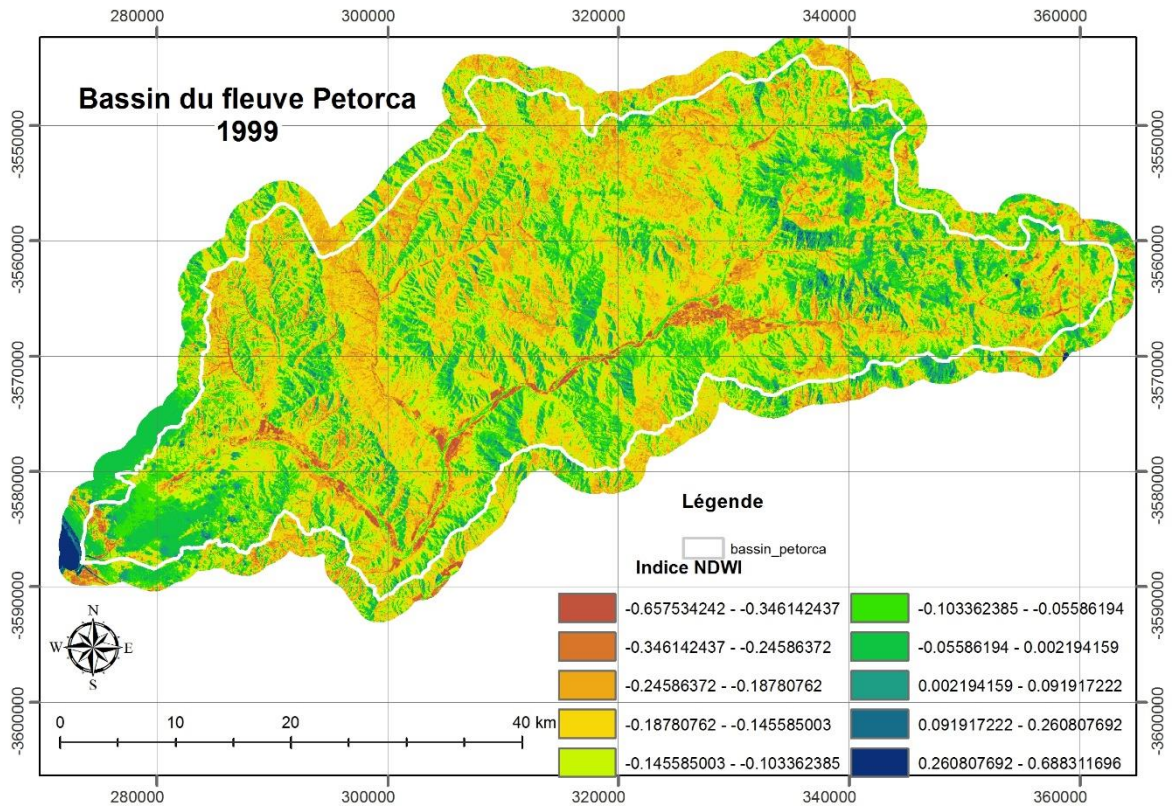


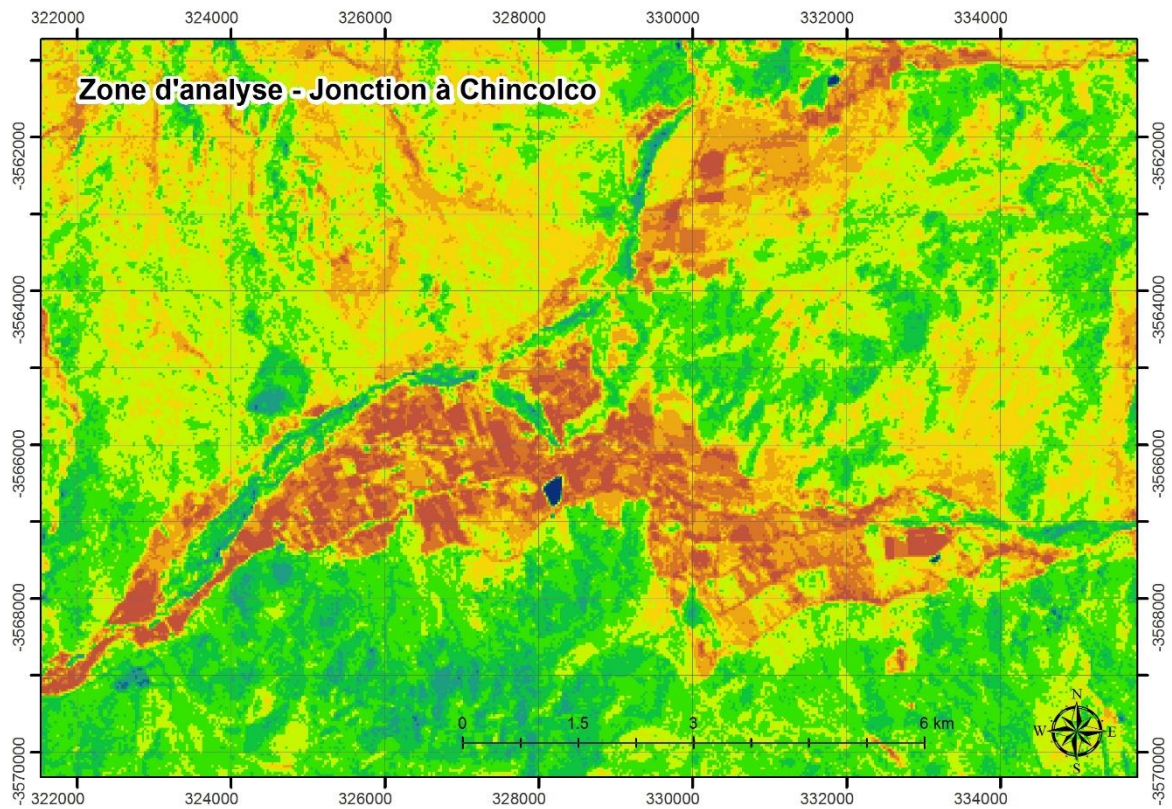
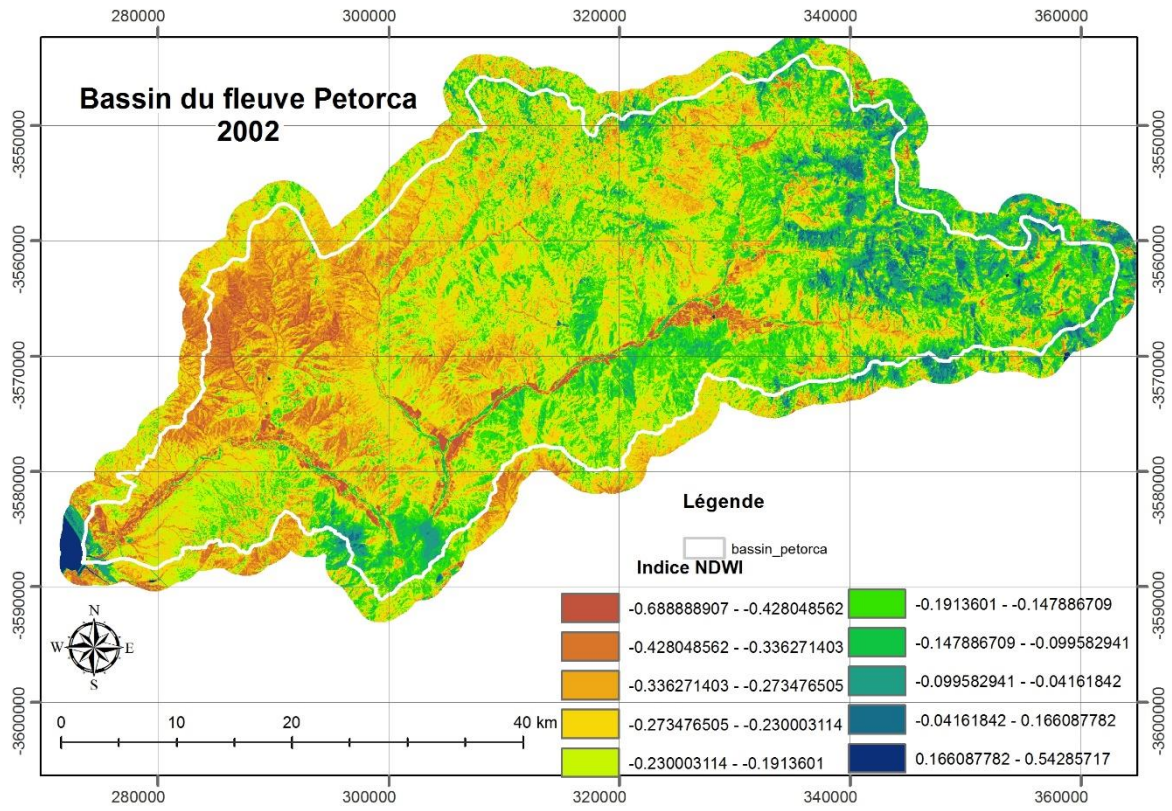


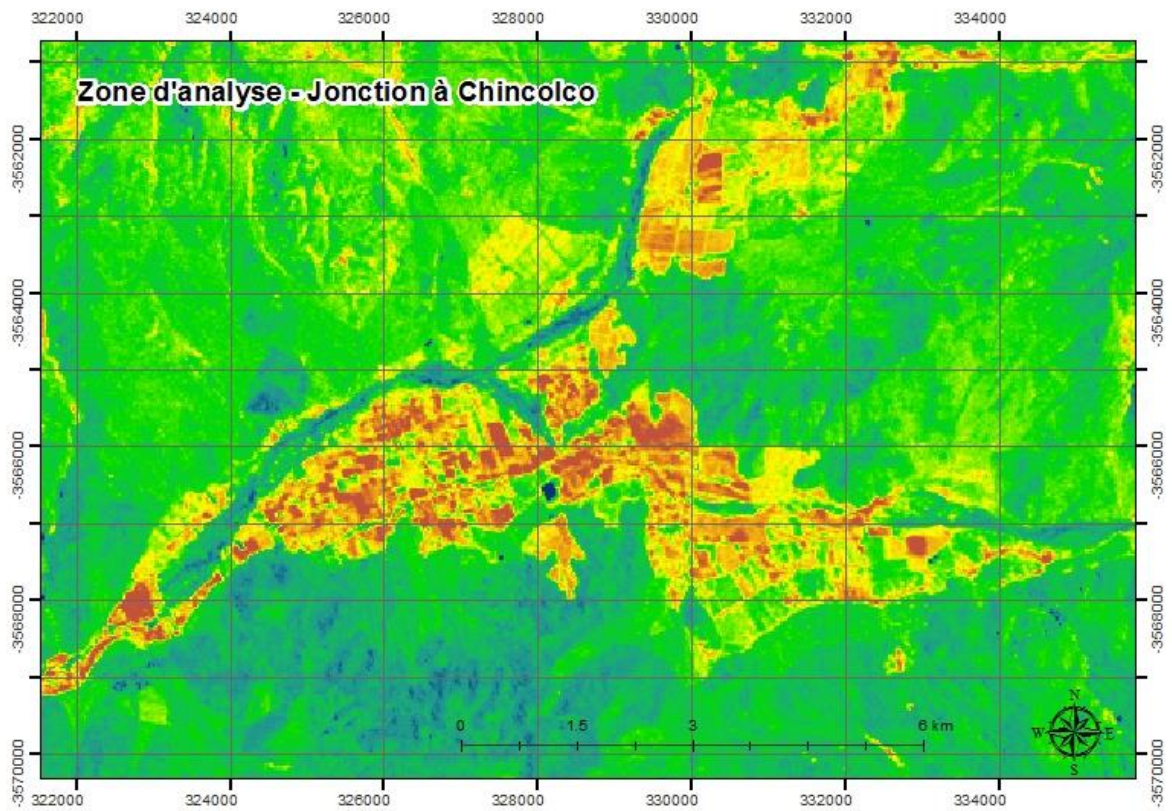
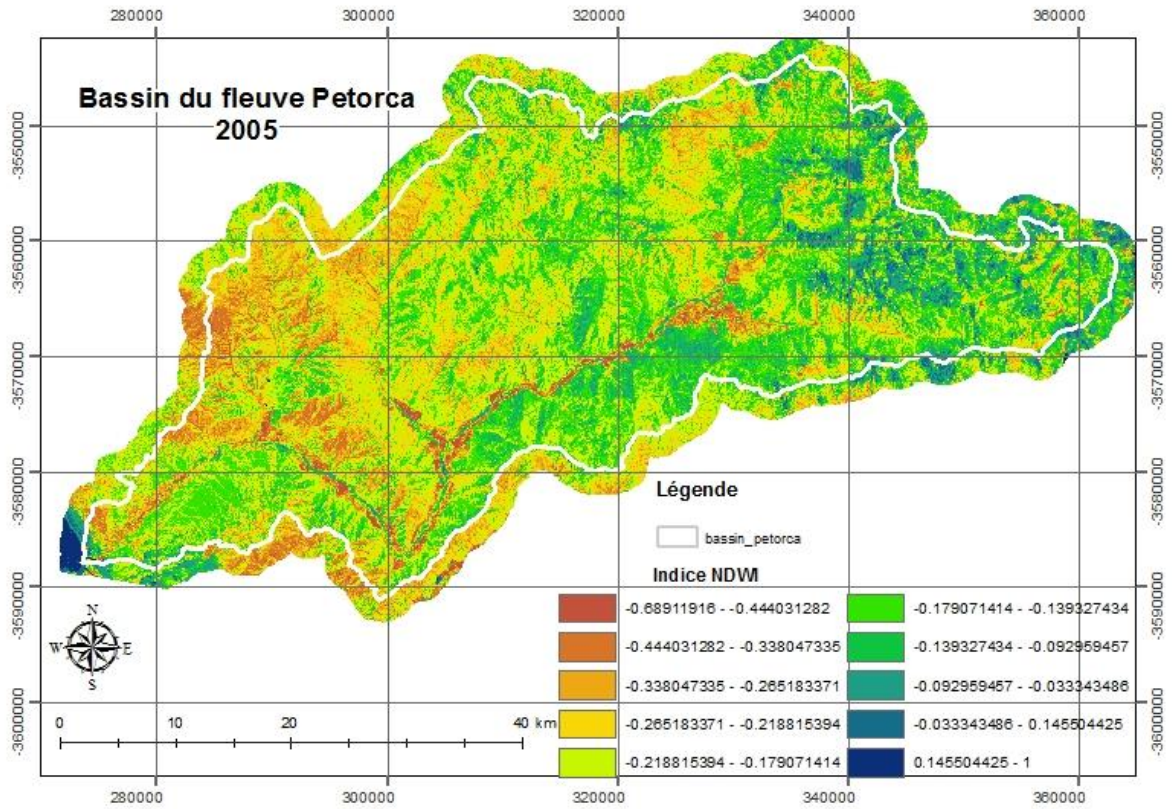
j. Indice de teneur en eau par différence normalisée (NDWI)

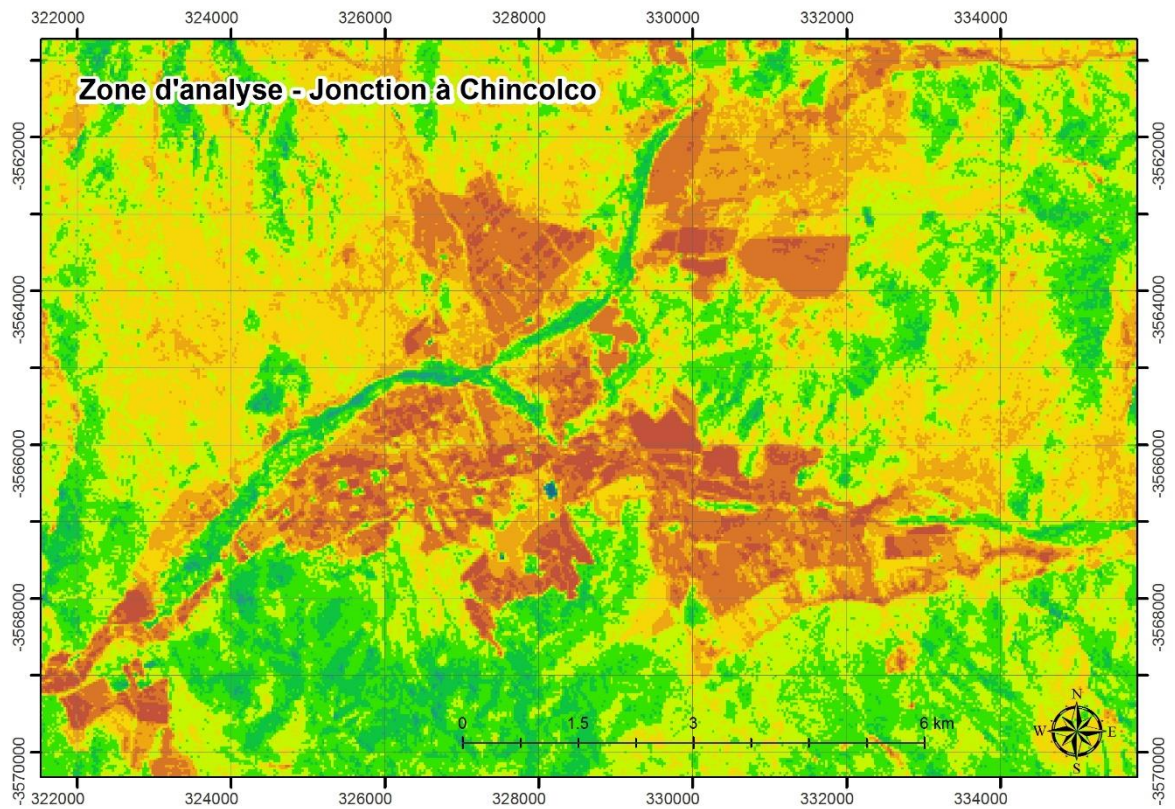
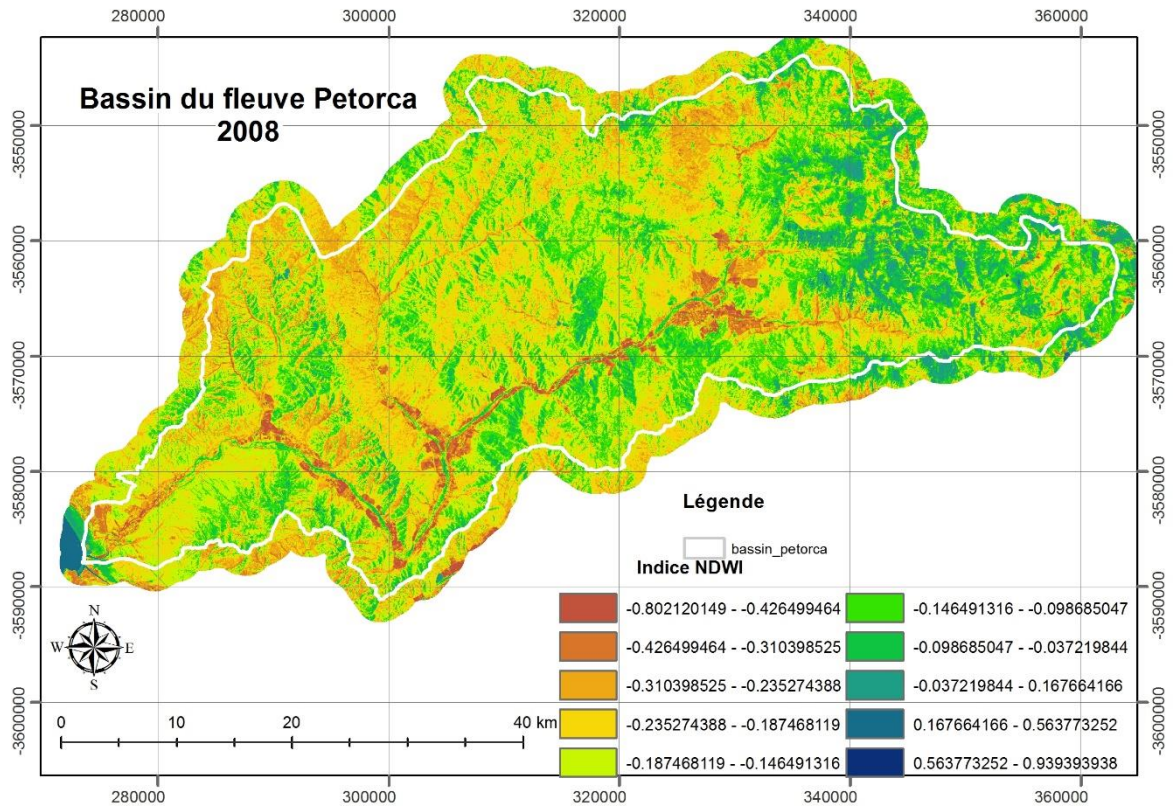


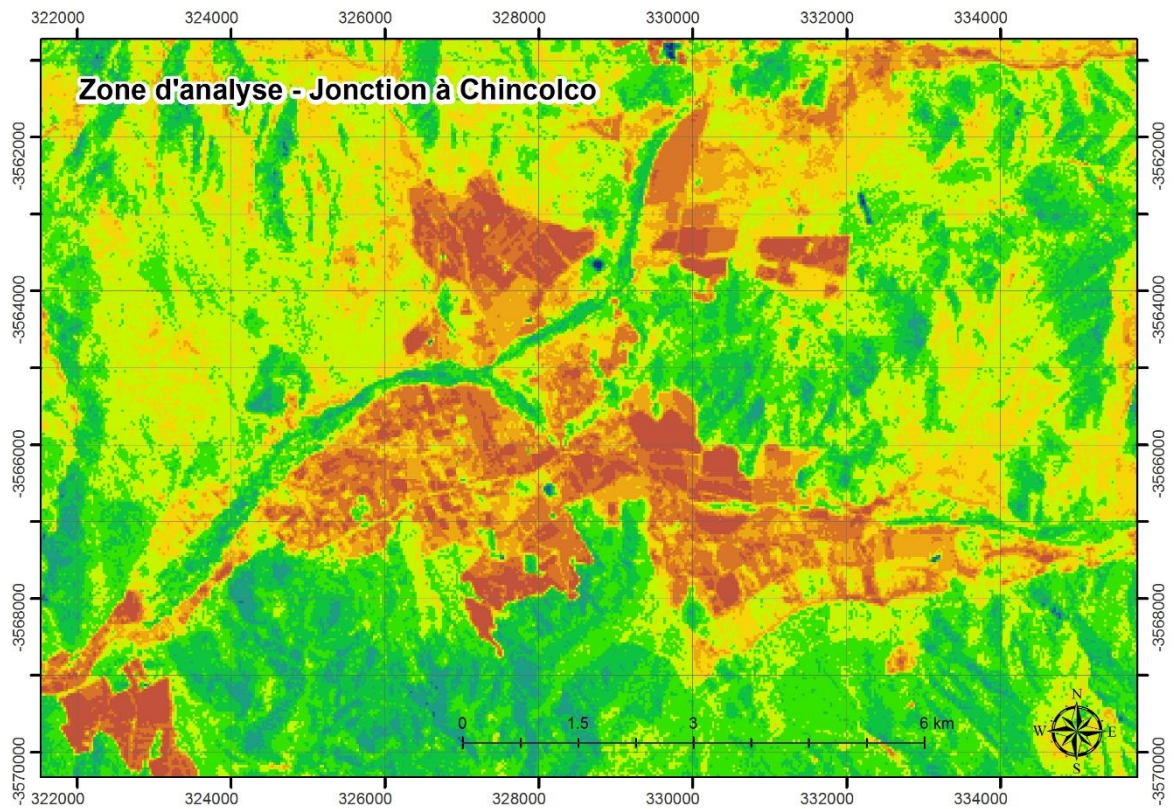
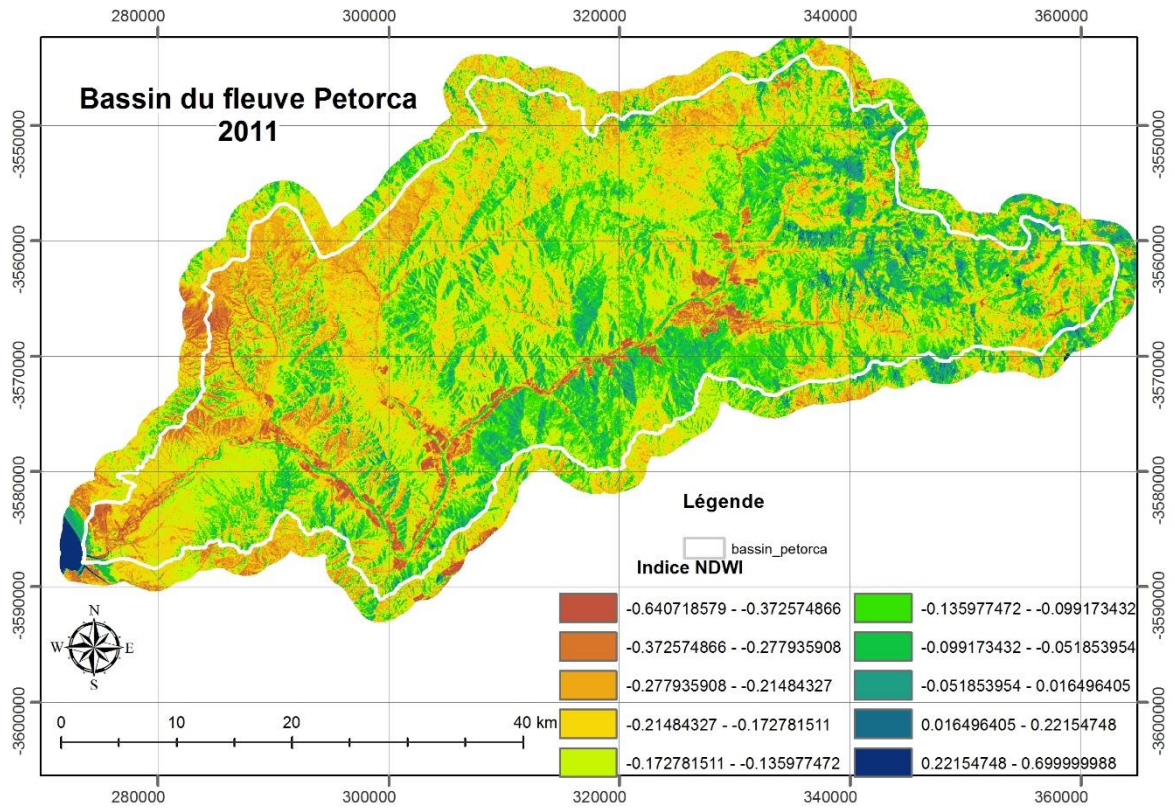


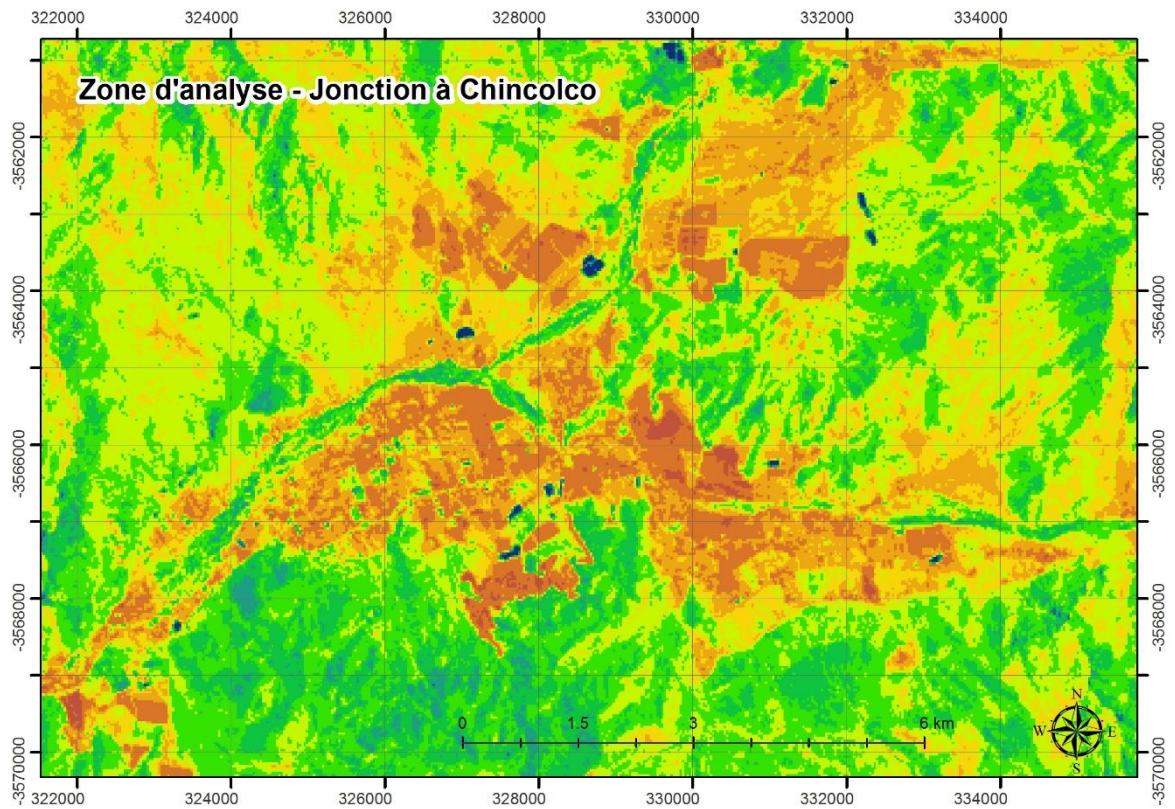
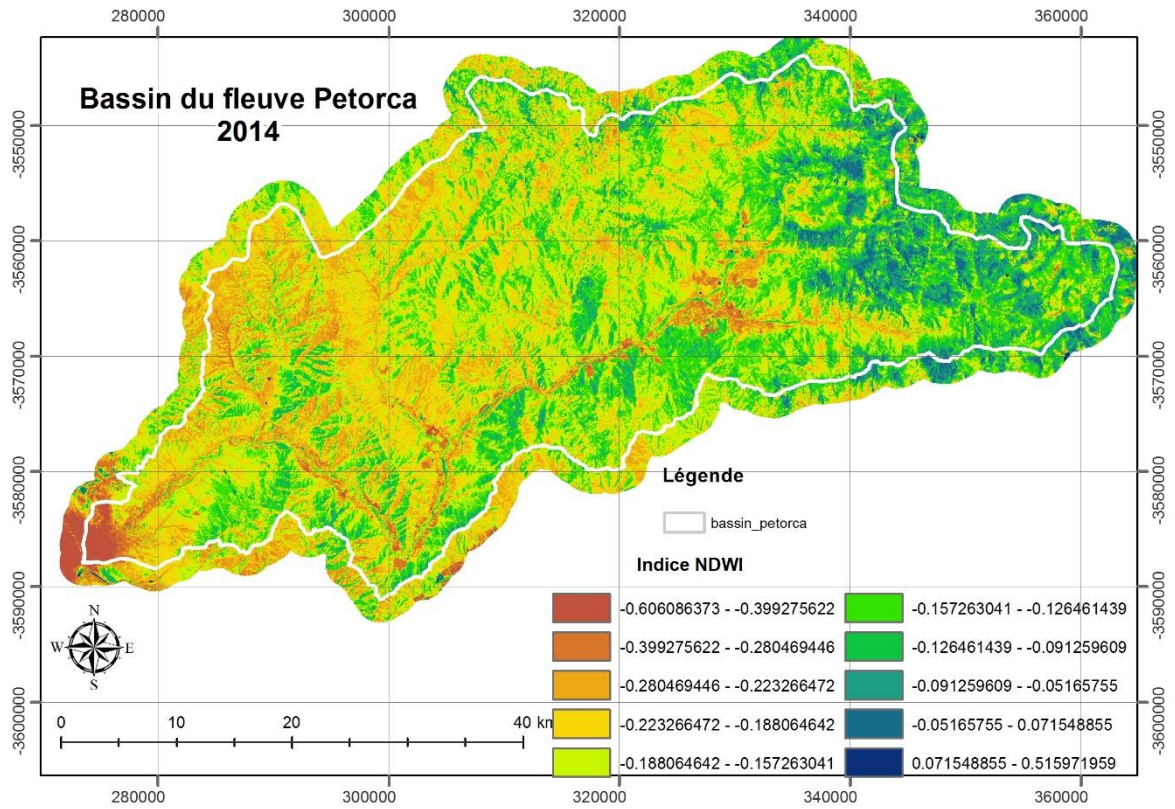


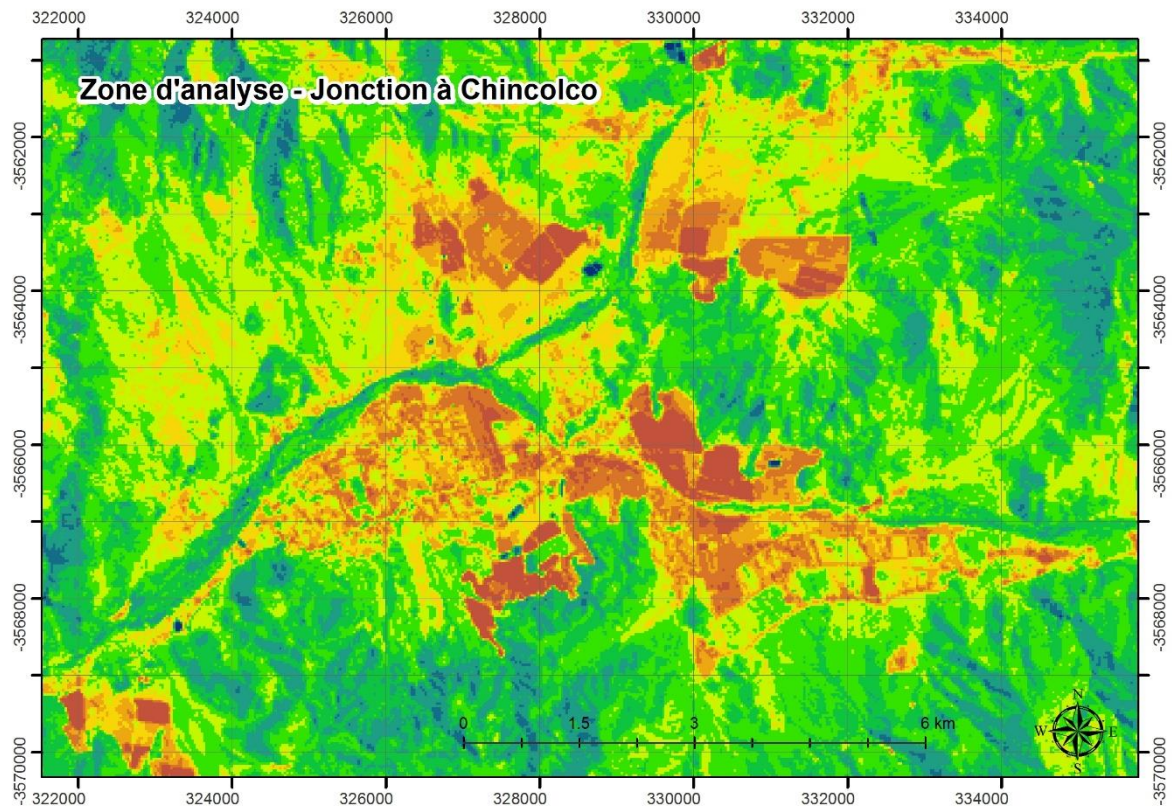
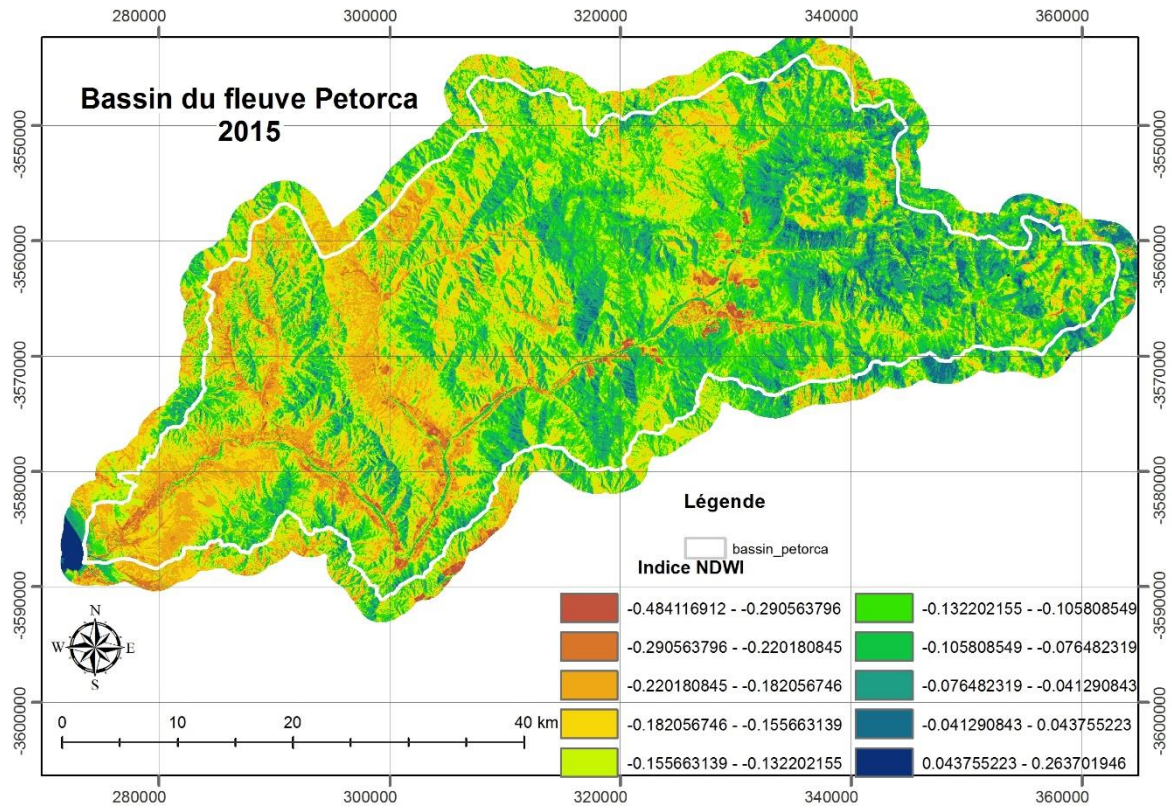


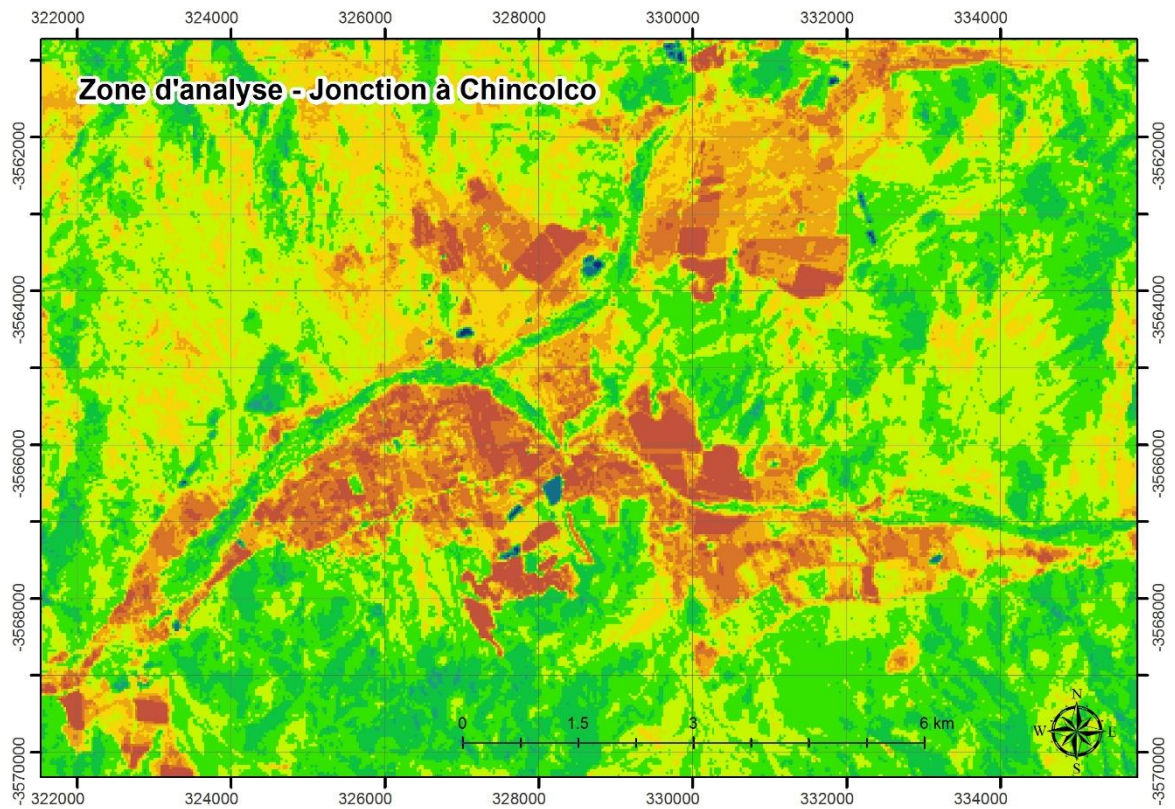
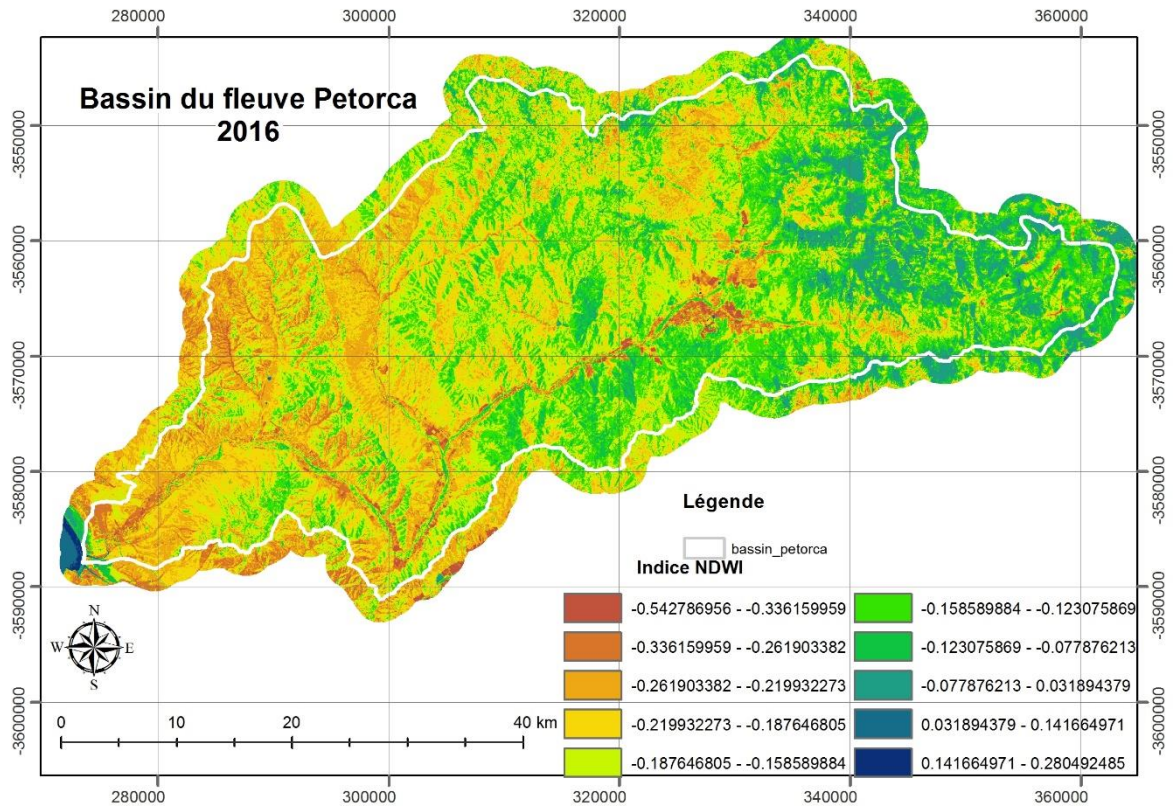


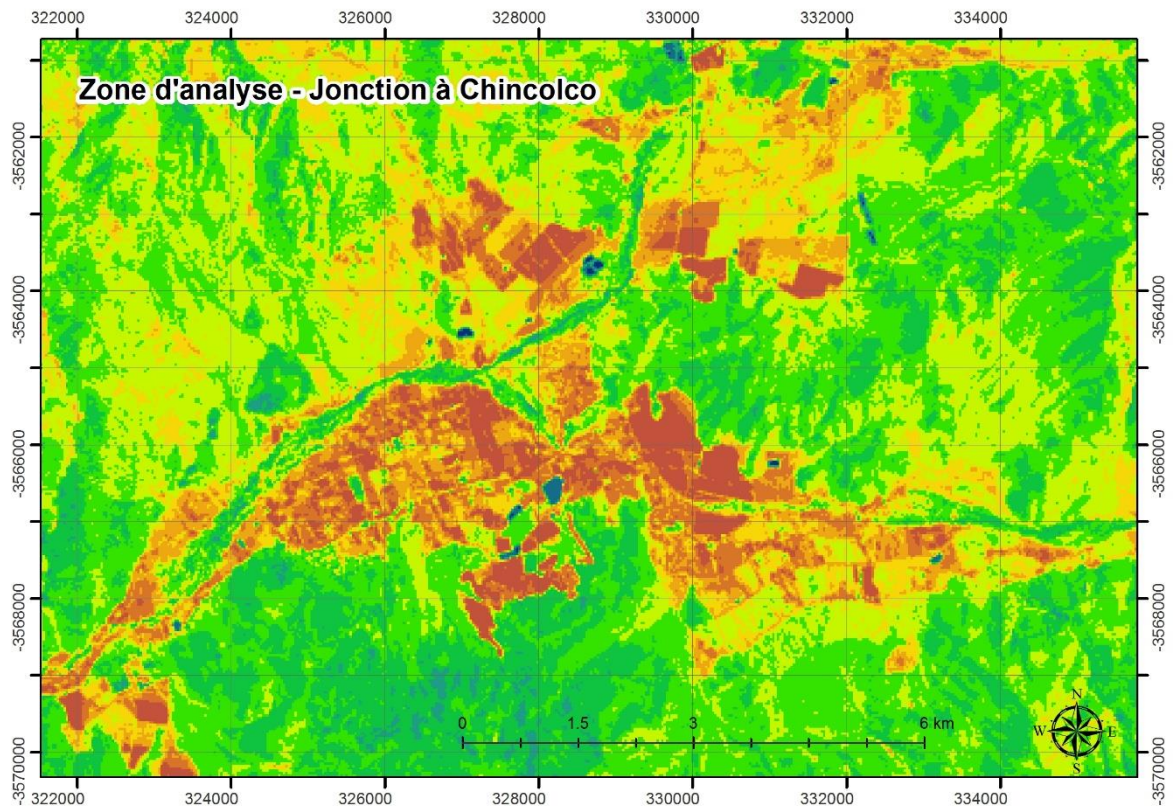
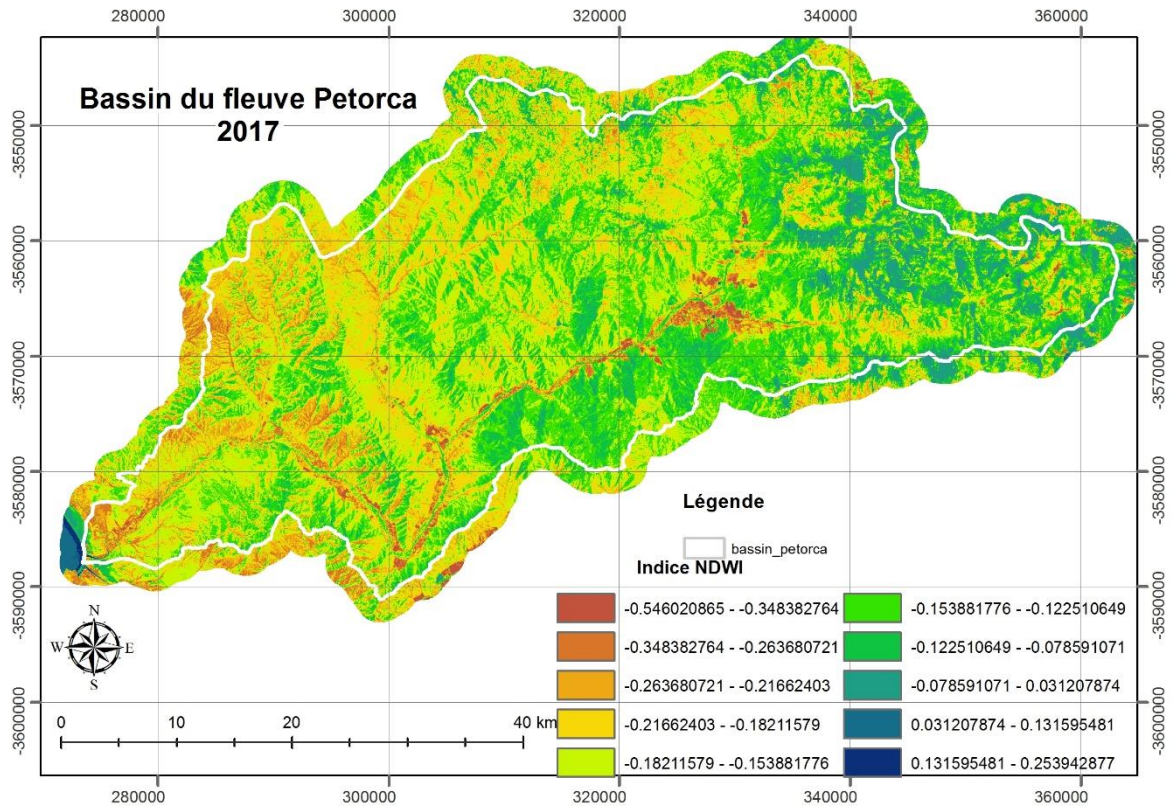










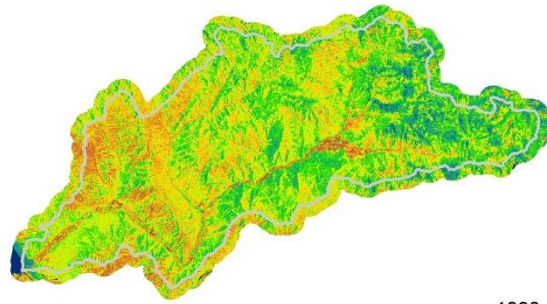


k. Bassin hydrographique Petorca (NDWI)

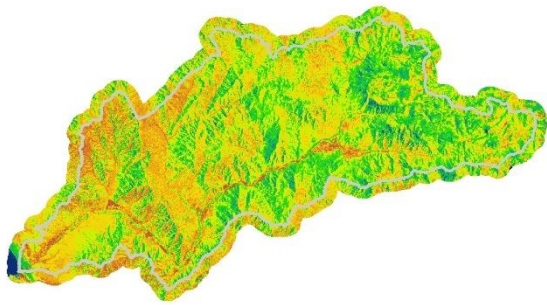
Province de Petorca (NDWI)



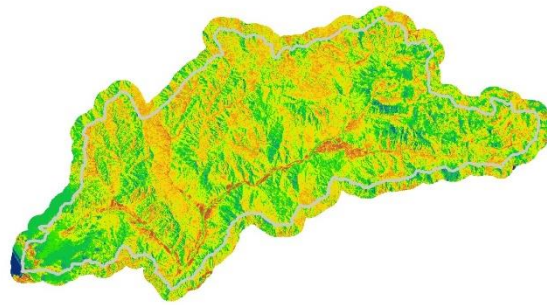
1990



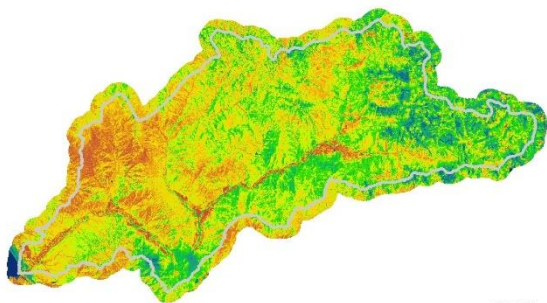
1993



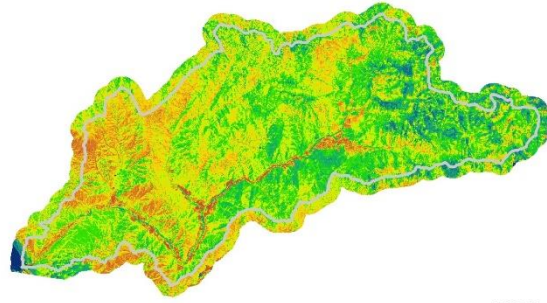
1996



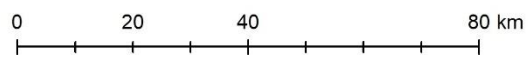
1999



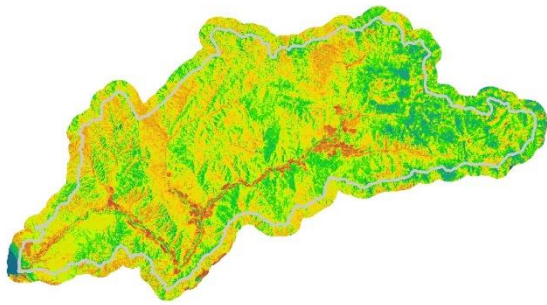
2002



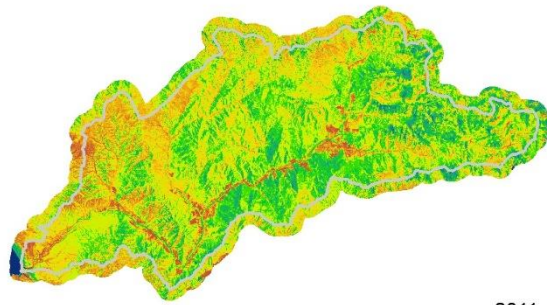
2005



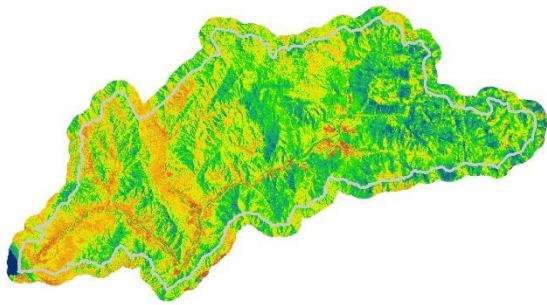
Province de Petorca (NDWI)



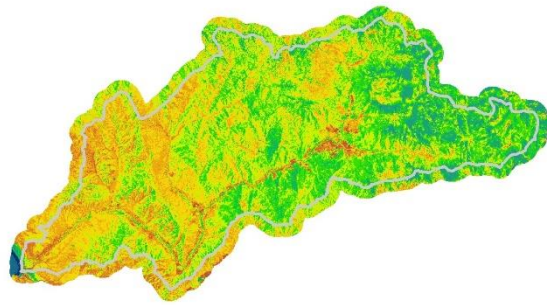
2008



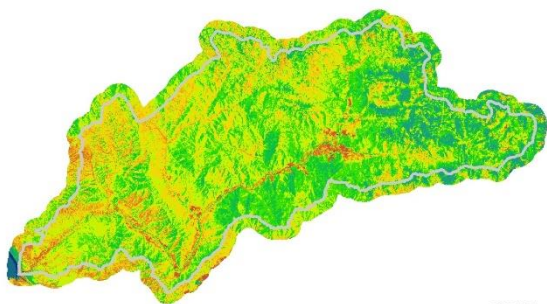
2011



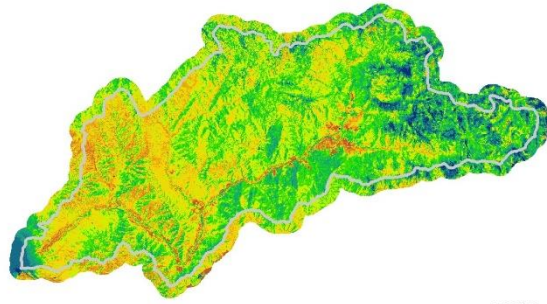
2015



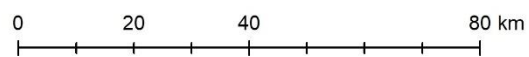
2016



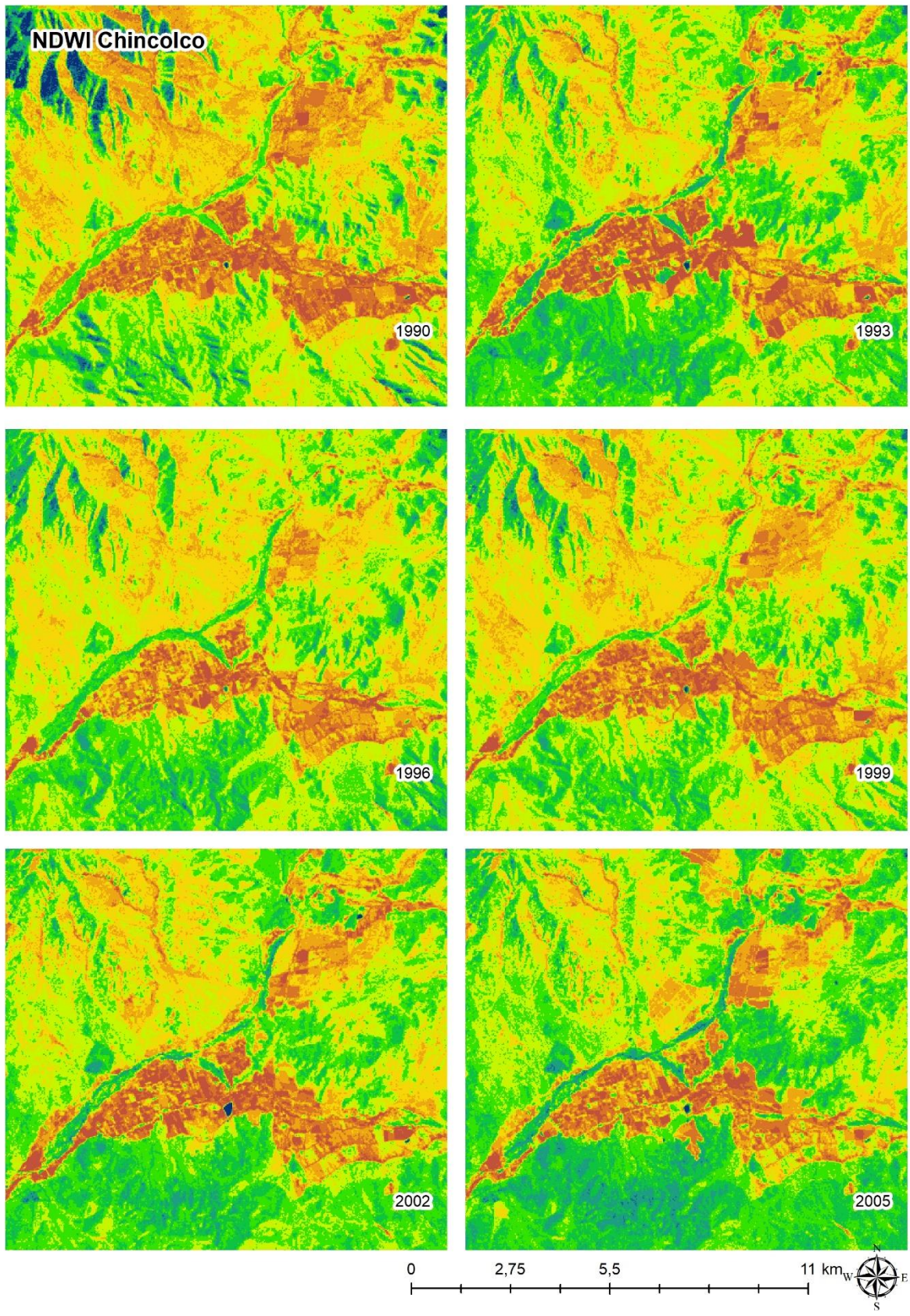
2017

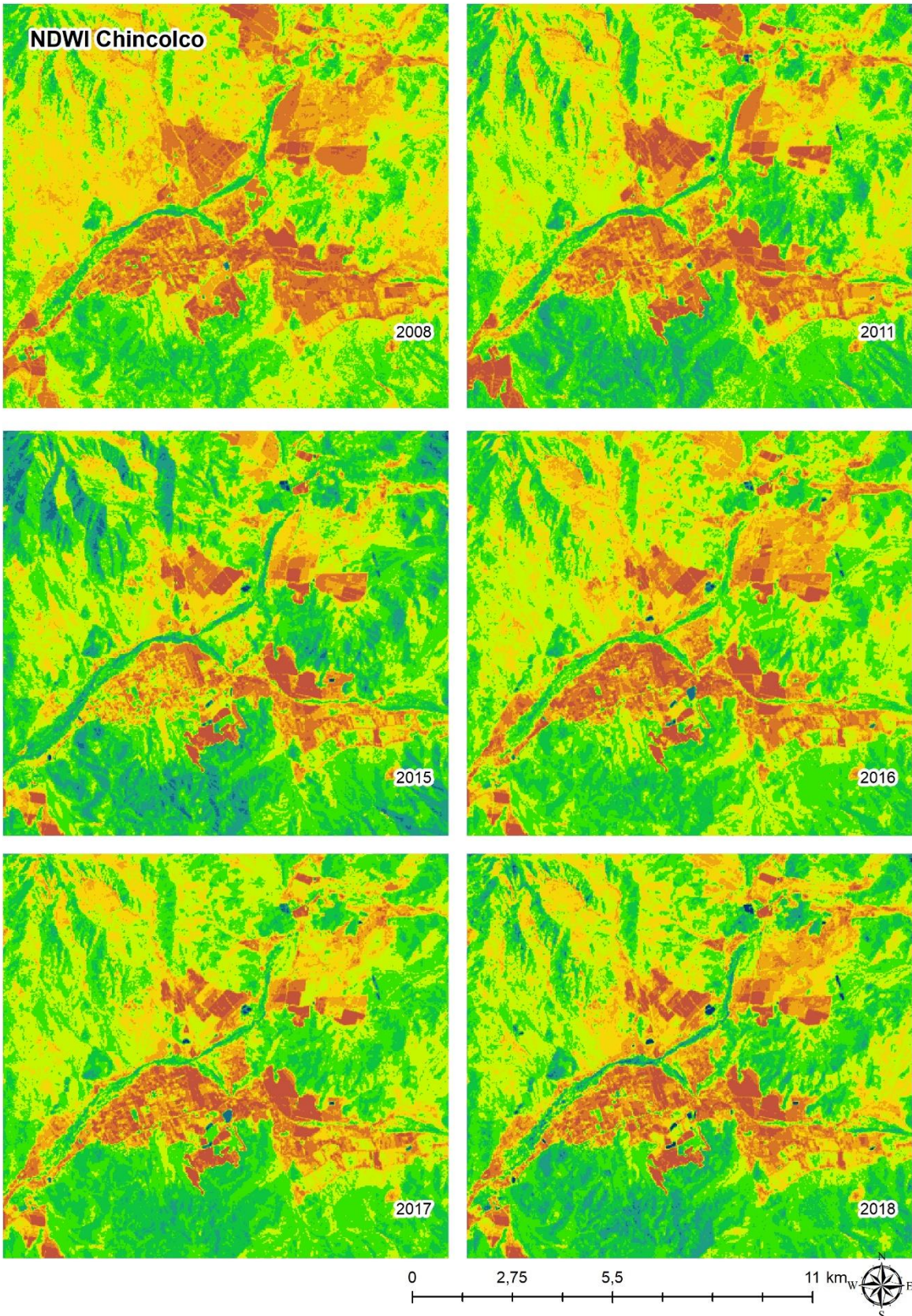


2018

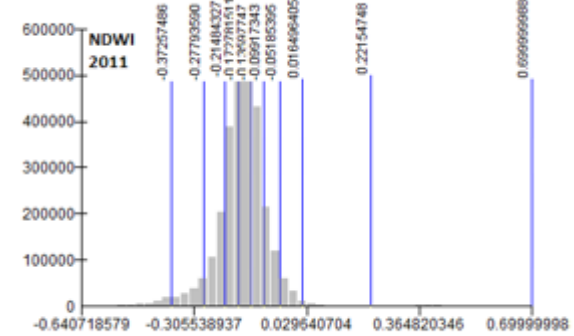
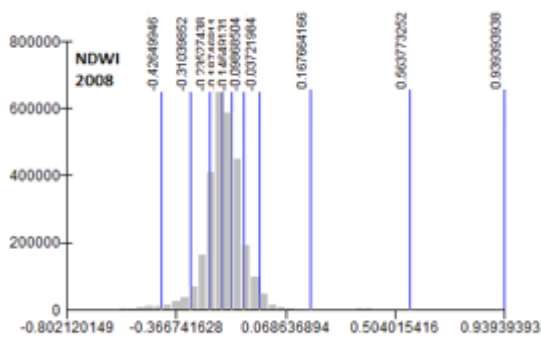
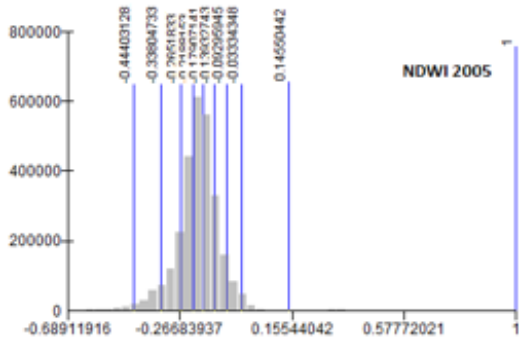
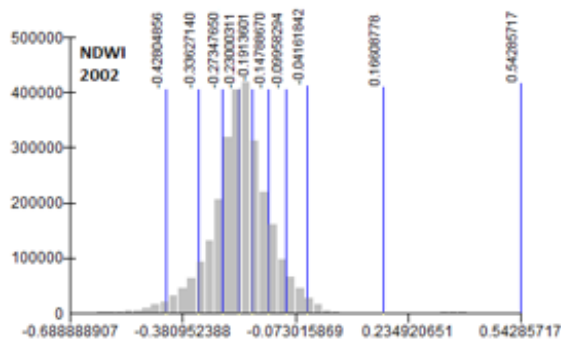
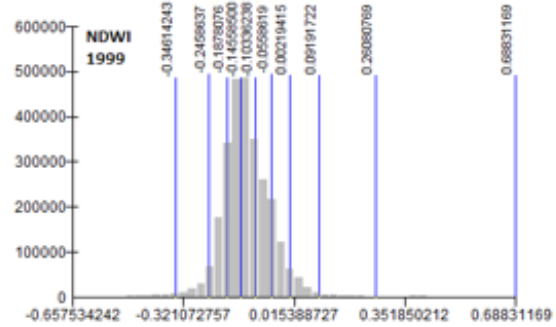
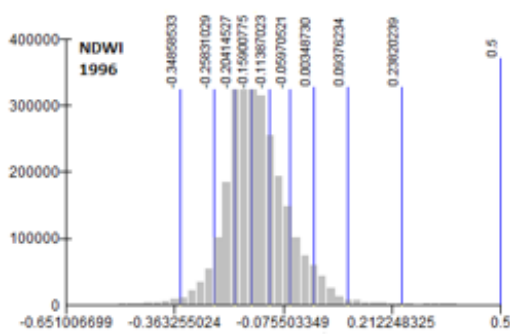
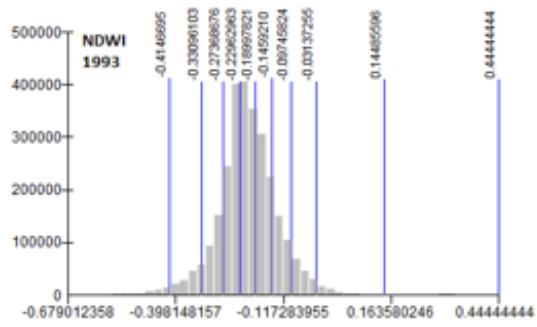
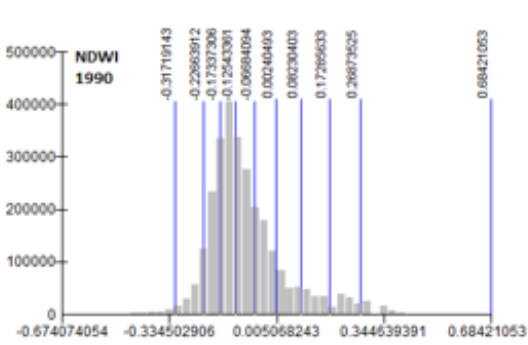


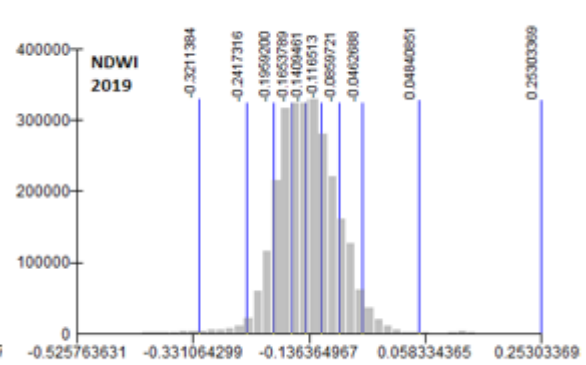
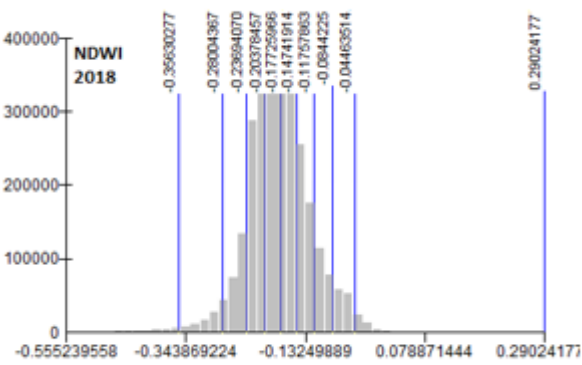
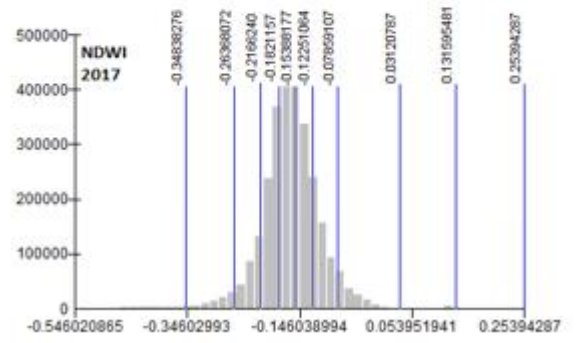
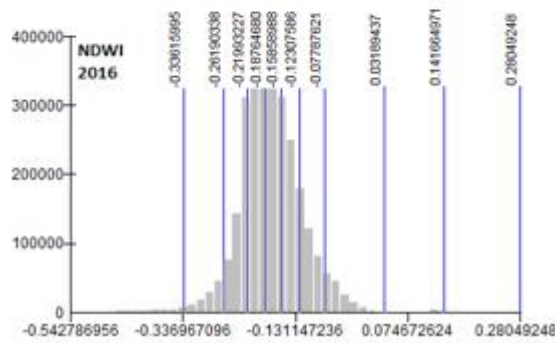
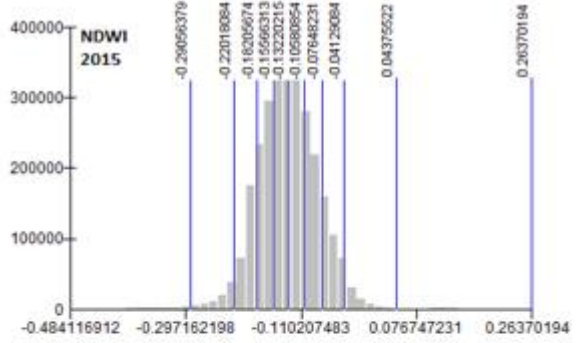
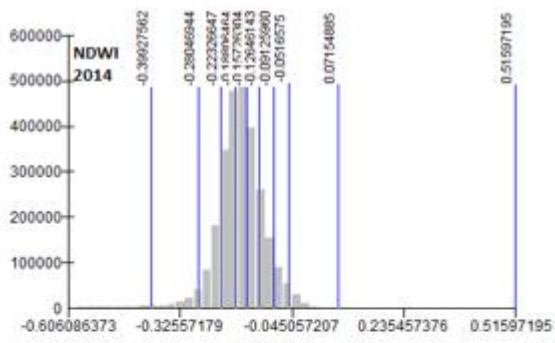
l. NDWI zone de Chincolco



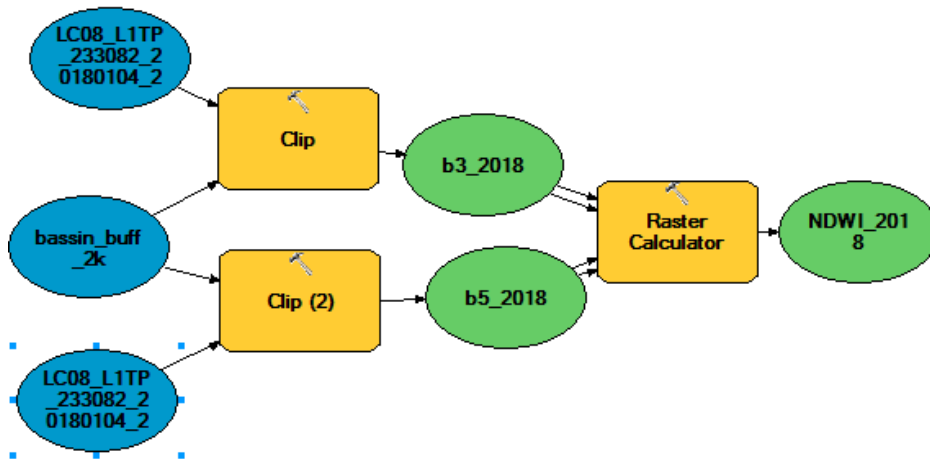
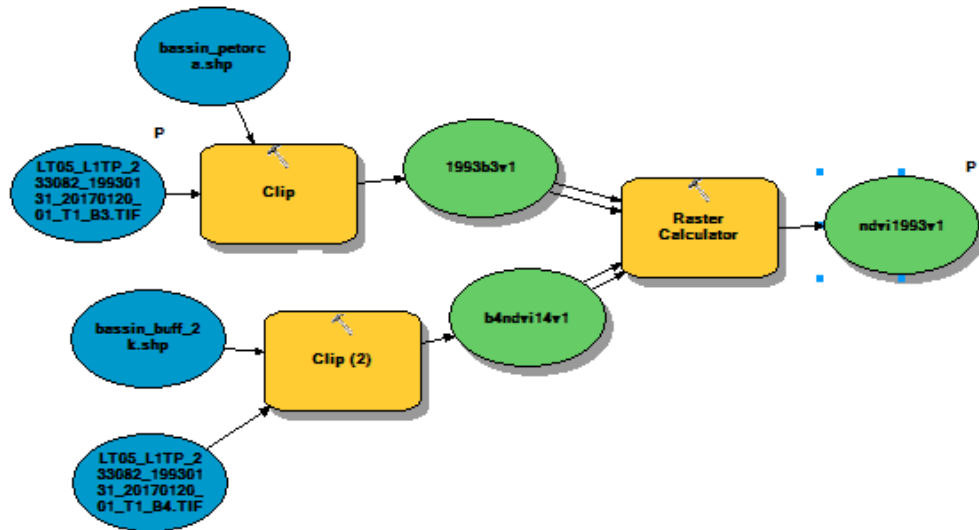


m. Histogrammes NDWI





n. Model Builder NDVI et NDWI



m. Classifications des images

