



CARTOGRAPHIE DU COUVERT VÉGÉTAL ET MODÉLISATION DES CONTRASTES SPATIAUX PAR NDVI DANS LA RÉGION ANALAMANGA

ANDRIANANDRASANA Tolotra, RAVELOALISON Haja Nirina, RANDRIANARISON Tsirihanitra
E.P., RAKOTOSON Tolontsoa, TOVONIRINA Mamiharizo Jackie

Ecole Doctorale en INGENIERIE ET GEOSCIENCES- UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

RESUME : Cette étude analyse le couvert végétal de la région Analamanga à partir du NDVI issu des données satellitaires, en intégrant une lecture spatiale, statistique et cartographique des contrastes environnementaux. La démarche repose d'abord sur l'extraction du NDVI à l'intérieur de la limite administrative régionale, puis sur le contrôle des couches de qualité associées, notamment QUAL et ACQI, afin de consolider l'interprétation du signal végétal. Les résultats montrent une dominance de valeurs intermédiaires du NDVI, avec une moyenne de 0,3378, une médiane de 0,3041 et un écart-type de 0,1426 pour 63 595 pixels valides. Cette distribution traduit un couvert végétal globalement modéré, mais spatialement hétérogène. L'indicateur environnemental $E = -Z(NDVI)$ met en évidence les secteurs relativement moins végétalisés, tandis que le contraste spatial S révèle les discontinuités locales du couvert végétal. Les transects centraux confirment une variabilité marquée, notamment vers les parties orientale et sud-orientale. Ces contrastes suggèrent l'existence de transitions rapides entre espaces végétalisés, zones agricoles, surfaces anthropisées et secteurs localement fragilisés. L'approche proposée permet ainsi de dépasser la simple cartographie du NDVI en construisant une lecture intégrée des différenciations spatiales et des dynamiques environnementales d'Analamanga.

Mots-clés : NDVI ; couvert végétal ; contraste spatial ; télédétection ; Analamanga.

ABSTRACT: This study analyzes the vegetation cover of the Analamanga Region using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) derived from satellite data, integrating spatial, statistical, and cartographic assessments of environmental contrasts. The methodology is based first on the extraction of NDVI values within the regional administrative boundary, followed by the evaluation of associated quality layers, particularly QUAL and ACQI, in order to strengthen the interpretation of the vegetation signal. The results reveal a predominance of intermediate NDVI values, with a mean of 0.3378, a median of 0.3041, and a standard deviation of 0.1426 across 63,595 valid pixels. This distribution indicates a generally moderate but spatially heterogeneous vegetation cover. The environmental indicator $E = -Z(NDVI)$ highlights relatively less vegetated areas, while the spatial contrast indicator S reveals local discontinuities in vegetation cover. Central transects confirm significant variability, particularly in the eastern and southeastern parts of the region. These contrasts suggest the presence of rapid transitions between vegetated areas, agricultural lands, anthropogenic surfaces, and locally degraded sectors. The proposed approach therefore goes beyond simple NDVI mapping by providing an integrated framework for understanding spatial differentiation and environmental dynamics across Analamanga.

Keywords: NDVI; vegetation cover; spatial contrast; remote sensing; Analamanga.

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.21396950>

1 Introduction

L'analyse de la végétation constitue un élément central dans la compréhension des dynamiques environnementales. Le suivi du couvert végétal constitue aujourd'hui un enjeu central pour l'analyse des transformations environnementales, en particulier dans les régions soumises à une forte pression urbaine, agricole et démographique. Dans ce contexte, la télédétection offre des outils efficaces pour observer de manière continue l'état de la végétation, comparer les dynamiques spatiales et identifier les zones présentant des signes de fragilisation écologique. Parmi les indicateurs les plus utilisés, le Normalized Difference Vegetation Index, ou NDVI, occupe une place importante en raison de sa simplicité, de sa robustesse et de sa capacité à traduire l'activité chlorophyllienne à partir du contraste spectral entre le rouge et le proche infrarouge [1], [2]. Le NDVI est largement mobilisé dans les études environnementales, car il permet de caractériser la densité, la vigueur et la variabilité du couvert végétal. Des valeurs élevées sont généralement associées à une végétation plus active ou plus dense, tandis que des valeurs faibles peuvent indiquer des sols nus, des surfaces bâties, des espaces agricoles peu couverts ou des zones affectées par des contraintes environnementales. Toutefois, l'interprétation du NDVI ne peut pas se limiter à une simple lecture cartographique. Elle doit également prendre en compte la qualité du signal satellitaire, les effets atmosphériques, les conditions d'acquisition et les discontinuités spatiales internes au territoire étudié [3], [4]. La région Analamanga constitue un terrain d'étude particulièrement pertinent pour ce type d'analyse. Elle concentre à la fois des espaces urbains, périurbains, agricoles et des zones encore relativement végétalisées. Cette diversité d'occupation du sol crée des contrastes environnementaux marqués, qui peuvent être observés à travers la distribution spatiale du NDVI. Dans cette région, les résultats obtenus montrent une dominance de valeurs intermédiaires du NDVI, avec une moyenne de 0,3378, une médiane de 0,3041 et un écart-type de 0,1426 pour 63 595 pixels valides. Ces valeurs traduisent un couvert végétal globalement modéré, mais spatialement hétérogène. L'originalité de cette étude réside dans le fait qu'elle ne se limite pas à produire une carte du NDVI. Elle propose une lecture intégrée du couvert végétal à travers plusieurs niveaux d'analyse. D'abord, les couches de qualité, notamment QUAL et ACQI, sont mobilisées afin de vérifier la fiabilité des pixels utilisés. Ensuite, le NDVI est transformé en indicateur d'état environnemental relatif, noté ($E = -Z(\text{NDVI})$), de manière à faire ressortir les secteurs où le couvert végétal est relativement plus faible. Enfin, un indicateur de contraste spatial (S) est calculé afin d'identifier les ruptures locales entre un pixel et son voisinage immédiat. Cette approche permet de mieux distinguer les tendances régionales des discontinuités locales. Les cartes produites mettent en évidence des secteurs plus végétalisés, notamment vers l'est et le sud-est d'Analamanga, tandis que certaines zones centrales et occidentales présentent des valeurs plus faibles du NDVI et des niveaux plus élevés de dégradation relative. Les transects centraux horizontal et vertical confirment cette organisation spatiale contrastée. Ils montrent une progression du NDVI vers certains secteurs orientaux, accompagnée de fluctuations importantes du contraste spatial, ce qui traduit une forte hétérogénéité locale du couvert végétal. L'analyse des contrastes spatiaux s'inscrit dans une logique plus large d'étude des structures spatiales et des dépendances locales. En effet, les dynamiques environnementales ne se distribuent pas toujours de manière uniforme ; elles apparaissent souvent sous forme de gradients, de ruptures, de noyaux ou de transitions entre plusieurs types d'occupation du sol [5], [6]. Dans le cas d'Analamanga, cette lecture spatiale est essentielle, car elle permet de dépasser une interprétation globale du NDVI pour identifier des secteurs où la végétation est non seulement faible, mais aussi spatialement discontinue. Ainsi, cette étude vise à cartographier le couvert végétal d'Analamanga et à modéliser ses contrastes spatiaux à partir du NDVI. Elle cherche plus précisément à caractériser la distribution du signal végétal, à contrôler la qualité des données utilisées, à construire un indicateur d'état environnemental relatif et à mettre en évidence les discontinuités locales du couvert végétal. Cette démarche contribue à une meilleure compréhension des différenciations environnementales internes à la région et peut servir d'appui à la planification territoriale, au suivi écologique et à l'identification des zones nécessitant une attention particulière [7].

2 Matériels et méthodes

2.1 Matériels

La présente étude s'appuie principalement sur des données satellitaires issues de l'United States Geological Survey, utilisées pour caractériser le couvert végétal de la région Analamanga. Les produits exploités correspondent aux couches dérivées du NDVI, notamment la couche principale de végétation, ainsi que les couches

associées à la qualité et aux conditions d'acquisition des pixels. Ces données ont permis d'extraire le signal végétal à l'intérieur de la limite administrative d'Analamanga, tout en vérifiant la cohérence et la fiabilité des observations à partir des couches complémentaires de qualité, notamment ACQI et QUAL [8]. Les données vectorielles utilisées comprennent la limite administrative des régions, le réseau hydrographique et le réseau routier. Ces couches ont servi à délimiter précisément la région d'étude, à superposer les éléments structurants du territoire et à produire des cartes interprétables à l'échelle régionale. La limite d'Analamanga a été utilisée comme masque spatial pour découper les rasters NDVI, tandis que les rivières et les routes ont été intégrées aux cartes finales afin de faciliter la lecture géographique des contrastes environnementaux. Le traitement des données a été réalisé dans un environnement Python, choisi pour sa souplesse, sa reproductibilité et sa capacité à intégrer des traitements géospatiaux, statistiques et graphiques dans un même flux de travail. Python a permis d'automatiser la lecture des rasters, le découpage spatial, la standardisation des valeurs, la construction des indicateurs dérivés et la production des figures cartographiques et statistiques [9]. L'environnement de travail a été organisé à l'aide d'Anaconda, qui facilite la gestion des bibliothèques scientifiques et des dépendances logicielles. Ce choix a permis de disposer d'un cadre stable pour l'analyse spatiale, le traitement numérique et la visualisation des résultats. L'utilisation d'Anaconda a également favorisé la reproductibilité du traitement, notamment grâce à la possibilité d'installer et de gérer les bibliothèques nécessaires dans un environnement dédié [10]. Plusieurs bibliothèques Python ont été mobilisées. GeoPandas a été utilisée pour la lecture, la reprojection, le découpage et la manipulation des données vectorielles, en particulier les limites administratives, les rivières et les routes [11]. Rasterio a servi au traitement des données raster, notamment pour l'ouverture des fichiers NDVI, la lecture des métadonnées spatiales, le découpage par masque régional et la conservation des informations de géoréférencement [12]. Les traitements numériques ont été réalisés avec NumPy, qui a permis de manipuler les matrices raster, de gérer les valeurs manquantes, de calculer les statistiques descriptives et de construire les indicateurs dérivés du NDVI. Matplotlib a été utilisé pour produire les cartes, les courbes statistiques, les transects, les surfaces 2D et 3D, ainsi que les graphiques complémentaires nécessaires à l'interprétation des résultats. Ces outils ont permis de construire une chaîne de traitement complète, depuis la préparation des données jusqu'à la représentation graphique finale des dynamiques spatiales du couvert végétal [13]. Les matériels utilisés combinent des données satellitaires, des couches vectorielles de référence et un environnement de traitement géospatial ouvert. Cette combinaison a permis de produire une analyse intégrée du couvert végétal d'Analamanga, fondée à la fois sur la cartographie du NDVI, le contrôle de la qualité des pixels, la modélisation des contrastes spatiaux et l'interprétation statistique des indicateurs environnementaux.

2.2 Méthodes

La méthodologie adoptée repose sur une démarche géospatiale intégrée combinant télédétection, traitement raster, analyse statistique et modélisation des contrastes spatiaux. Elle a été structurée en plusieurs étapes afin de passer d'un produit satellitaire brut à une lecture interprétable du couvert végétal dans la région Analamanga. Cette approche s'inscrit dans les méthodes classiques de traitement d'images satellitaires, où l'extraction, la correction, la sélection des pixels valides et l'interprétation spatiale constituent des étapes essentielles pour produire une information environnementale fiable [14], [15]. La première étape a consisté à préparer les données d'entrée. Les couches raster issues du produit NDVI ont été inventoriées, puis seules les couches exploitables au format géoréférencé ont été retenues. Les fichiers d'aperçu, les métadonnées et les fichiers non cartographiques n'ont pas été utilisés dans l'analyse spatiale. Le NDVI a été considéré comme la variable principale pour caractériser le couvert végétal, tandis que les couches de qualité, notamment ACQI et QUAL, ont été mobilisées comme éléments de contrôle afin d'évaluer la fiabilité des pixels utilisés. La deuxième étape a porté sur la délimitation spatiale de la zone d'étude. La limite administrative d'Analamanga a été extraite à partir du shapefile régional, puis utilisée comme masque de découpage pour les couches raster. Cette opération a permis de limiter l'analyse aux seuls pixels situés à l'intérieur de la région étudiée. Les couches vectorielles relatives aux routes et aux rivières ont ensuite été reprojettées dans le même système de coordonnées que les rasters afin d'assurer une superposition correcte des informations cartographiques. La troisième étape a concerné le prétraitement du NDVI. Les valeurs manquantes, aberrantes ou non exploitables ont été retirées de l'analyse. Lorsque les valeurs du NDVI étaient stockées sous forme entière, une mise à l'échelle a été appliquée afin de retrouver des valeurs comprises dans l'intervalle attendu pour un indice de végétation. Cette étape a permis d'obtenir une couche NDVI homogène et directement interprétable. Le contrôle des couches de qualité a ensuite permis de vérifier que la majorité des pixels utilisés

présentait une cohérence suffisante pour soutenir l'analyse environnementale. La quatrième étape a consisté à construire des indicateurs dérivés du NDVI. Un indicateur d'état environnemental relatif a été produit à partir du NDVI standardisé inversé, de manière à faire ressortir les secteurs où le couvert végétal est relativement plus faible. Un second indicateur a ensuite été élaboré pour mesurer le contraste spatial local, c'est-à-dire l'écart entre chaque pixel et son voisinage immédiat. Cette démarche permet de ne pas se limiter à la valeur brute du NDVI, mais d'identifier aussi les ruptures locales et les discontinuités spatiales du couvert végétal. La cinquième étape a porté sur la construction d'un indice environnemental intégré simplifié. Celui-ci combine l'état environnemental relatif et le contraste spatial afin de produire une lecture synthétique des zones où le couvert végétal est à la fois faible et spatialement contrasté. La construction de cet indicateur s'inspire des principes généraux des indicateurs composites, qui recommandent de standardiser les variables, de contrôler leur cohérence et de justifier leur combinaison en fonction de l'objectif analytique poursuivi [16]. La sixième étape a consisté à produire les représentations cartographiques et graphiques. Les cartes du NDVI, des couches de qualité, de l'état environnemental relatif, du contraste spatial et de l'indice intégré ont été élaborées avec une mise en page homogène. Des éléments cartographiques tels que l'échelle graphique, l'orientation nord, les coordonnées, les limites administratives, les routes et les rivières ont été ajoutés afin d'améliorer la lisibilité spatiale des résultats. En complément, des histogrammes, des courbes cumulatives, des transects, des surfaces interpolées, des heatmaps, des graphiques radar et des matrices de corrélation ont été produits afin d'appuyer l'interprétation statistique et spatiale. La dernière étape a été consacrée à l'interprétation des résultats. Les valeurs du NDVI ont été analysées en tenant compte de leur distribution statistique, de leur organisation spatiale et de leur relation avec les indicateurs dérivés. Les transects ont permis d'identifier les variations selon les axes est-ouest et nord-sud, tandis que les contrastes spatiaux ont mis en évidence les zones de transition ou de fragmentation locale. Cette lecture croisée s'inscrit dans une approche d'analyse spatiale quantitative, où les phénomènes environnementaux sont interprétés non seulement à partir de leurs valeurs, mais aussi à partir de leur organisation dans l'espace [17]. La méthode adoptée permet de dépasser une simple cartographie descriptive du NDVI. Elle propose une démarche intégrée qui associe contrôle de qualité des données, extraction régionale, standardisation, modélisation des contrastes spatiaux et interprétation statistique. Cette combinaison méthodologique offre une base robuste pour caractériser le couvert végétal d'Analamanga et identifier les secteurs présentant des signes de différenciation environnementale.

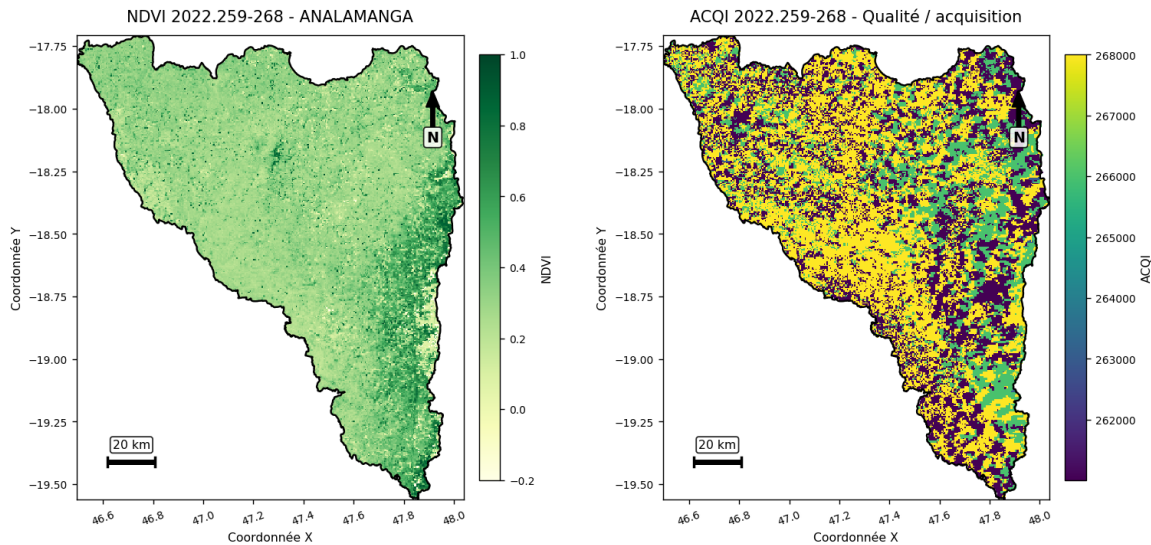
3 Résultats et discussions

3.1 Résultats

3.1.1 Distribution spatiale du NDVI et de l'indicateur ACQI dans la région Analamanga

La figure ci-dessous présente une lecture comparative de deux couches issues du produit NDVI pour la région Analamanga. La carte de gauche représente la distribution spatiale du NDVI, utilisé comme indicateur de vigueur et de densité du couvert végétal, tandis que la carte de droite montre la couche ACQI, associée aux conditions ou à la qualité d'acquisition des données. Les deux cartes sont limitées à l'emprise administrative d'Analamanga et sont accompagnées des éléments cartographiques nécessaires à leur interprétation : coordonnées géographiques, limite régionale, orientation nord et échelle graphique de 20 km.

Figure 1: Distribution spatiale du NDVI et de l'indicateur ACQI dans la région Analamanga



Source : Auteur 2026

Interprétation

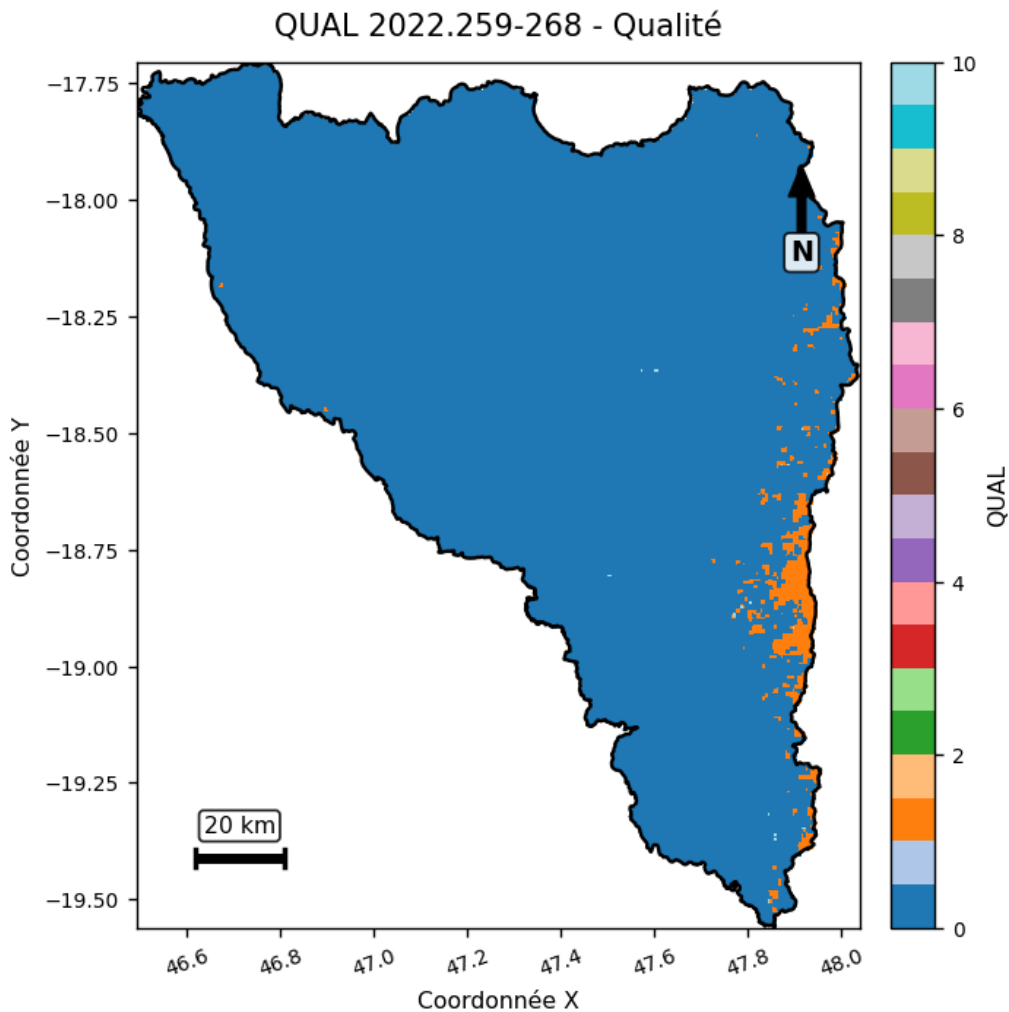
La carte du NDVI met en évidence une couverture végétale globalement modérée à élevée dans la région Analamanga. Les valeurs représentées varient approximativement entre -0,2 et 1,0, selon l'échelle de la légende. Les valeurs les plus fortes, proches de 0,6 à 0,8, apparaissent surtout dans la partie orientale et sud-orientale de la région, ce qui traduit une végétation relativement plus dense ou plus active. À l'inverse, les secteurs présentant des valeurs plus faibles, généralement inférieures à 0,2, sont plus dispersés et peuvent correspondre à des zones de faible couverture végétale, de sols nus, de surfaces bâties ou de conditions locales moins favorables à l'activité chlorophyllienne. Dans l'ensemble, la distribution du NDVI ne montre pas une homogénéité parfaite. On observe plutôt une organisation spatiale contrastée, avec des zones plus vertes et continues vers l'est et le sud-est, alors que certaines portions centrales et occidentales présentent des tonalités plus claires. Cette différenciation suggère une variation du couvert végétal à l'intérieur même d'Analamanga, probablement liée à la combinaison de facteurs topographiques, d'occupation du sol, d'urbanisation et de pression anthropique. La couche ACQI, représentée sur la carte de droite, présente une structure beaucoup plus hétérogène. Les valeurs observées s'étendent approximativement de 262 000 à 268 000. Les valeurs les plus élevées, proches de 267 000 à 268 000, apparaissent en jaune, tandis que les valeurs plus faibles, proches de 262 000 à 264 000, apparaissent en violet à bleu-vert. Cette mosaïque spatiale indique que les conditions d'acquisition ou de qualité des pixels ne sont pas uniformes sur l'ensemble de la région. La comparaison des deux cartes est importante, car elle montre que l'interprétation du NDVI doit être accompagnée d'un contrôle de qualité. Certaines variations du NDVI peuvent refléter de véritables contrastes environnementaux, mais d'autres peuvent aussi être influencées par les conditions d'acquisition du signal satellitaire. Ainsi, les secteurs où le NDVI est faible et où l'ACQI présente également des valeurs particulières doivent être interprétés avec prudence, car ils peuvent correspondre soit à une réalité environnementale, soit à une contrainte liée à la qualité de l'observation.

Globalement, la figure montre que la région Analamanga présente un couvert végétal encore relativement marqué dans plusieurs secteurs, notamment vers l'est et le sud-est, mais avec des contrastes internes notables. Ces résultats justifient l'utilisation du NDVI comme variable de base pour construire un indicateur environnemental, tout en intégrant les couches de qualité telles que l'ACQI afin de fiabiliser l'analyse spatiale. Dans le cadre de la construction d'un indice spatio-temporel intégré, cette lecture constitue donc une première étape essentielle pour distinguer les dynamiques environnementales réelles des effets potentiels liés aux conditions d'acquisition des données satellitaires.

3.1.2 Répartition spatiale de la couche de qualité QUAL dans la région Analamanga

La figure ci-après présente la distribution spatiale de la couche QUAL associée au produit NDVI 2022 pour la région Analamanga. Cette couche permet d'apprécier la qualité des pixels utilisés dans l'analyse satellitaire et constitue, à ce titre, un élément de contrôle important avant l'interprétation environnementale du NDVI. La carte est limitée à l'emprise administrative d'Analamanga et comporte une échelle graphique de 20 km, une flèche d'orientation vers le nord ainsi qu'une légende graduée de 0 à 10.

Figure 2: Répartition spatiale de la couche de qualité QUAL dans la région Analamanga



Source : Auteur 2026

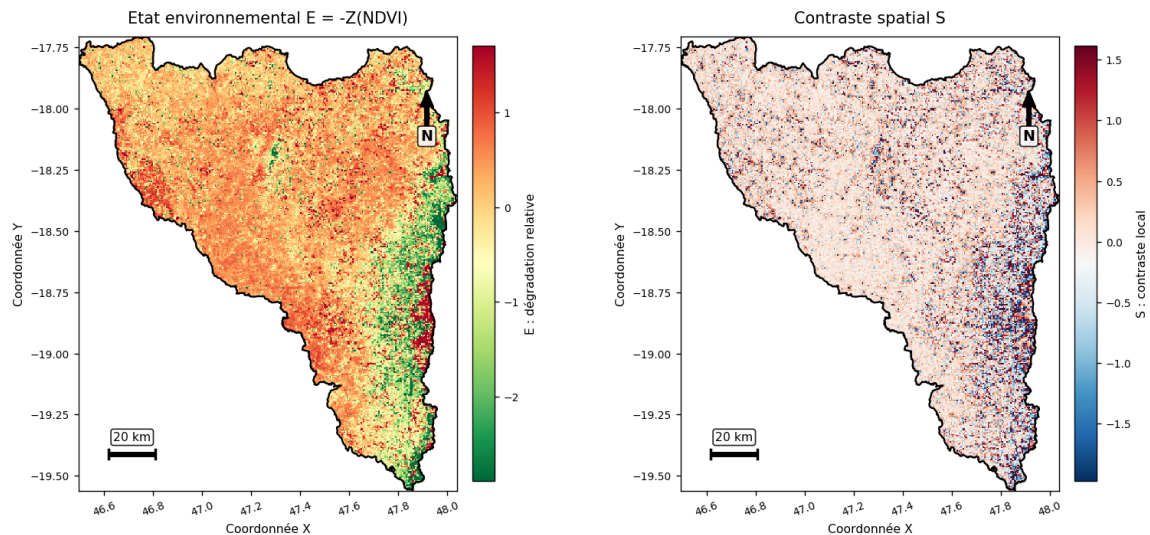
Interprétation

La carte montre une très forte dominance de la classe QUAL = 0 sur presque toute la région Analamanga. Cette valeur, représentée par la couleur bleue, couvre la quasi-totalité de l'espace cartographié, depuis la partie nord jusqu'au sud de la région. Cette homogénéité indique que la majorité des pixels appartient à une même catégorie de qualité, ce qui suggère une cohérence générale du produit satellitaire sur l'ensemble de la zone d'étude. Les variations de la couche QUAL restent très localisées. Elles apparaissent principalement sous forme de petits pixels isolés ou de bandes discontinues le long de la bordure orientale et sud-orientale de la région. Ces pixels, représentés par des teintes orangées, correspondent à des valeurs faibles mais différentes de la classe dominante, généralement proches de 1 à 2 selon l'échelle de la légende. Leur présence indique que certaines portions marginales de l'image présentent des conditions de qualité légèrement différentes du reste de la région. La légende indique une plage possible de valeurs allant de 0 à 10, mais la carte ne montre pas de fortes extensions spatiales des classes élevées. Les valeurs supérieures semblent absentes ou très peu représentées visuellement. Cette situation suggère que les anomalies de qualité sont limitées et ne concernent qu'une faible proportion des pixels, principalement concentrée à l'est et au sud-est d'Analamanga. D'un point de vue méthodologique, cette couche QUAL est importante car elle permet de vérifier la fiabilité des pixels utilisés dans le calcul du NDVI et des indices dérivés. La dominance de la classe 0 peut être interprétée comme un signe de stabilité relative de la qualité des observations sur la région. Toutefois, les pixels atypiques observés sur la marge orientale doivent être pris en compte avec prudence, notamment lorsque l'on interprète les valeurs de NDVI ou les indices environnementaux dans ces secteurs. Ainsi, la figure confirme que l'analyse du NDVI dans Analamanga repose sur une base spatiale globalement homogène du point de vue de la qualité des pixels. Les zones marginales où la valeur QUAL diffère de 0 doivent cependant être considérées comme des secteurs à contrôler, car elles peuvent influencer localement l'interprétation du signal végétal.

3.1.3 Etat environnemental relatif et contraste spatial du couvert végétal dans la région Analamanga

La figure ci-après met en relation deux indicateurs dérivés du NDVI afin de mieux lire l'organisation spatiale de l'état environnemental dans la région Analamanga. La carte de gauche représente l'état environnemental relatif ($E = -Z(\text{NDVI})$), où les valeurs élevées traduisent une diminution relative du couvert végétal. La carte de droite présente le contraste spatial (S), qui mesure l'écart entre chaque pixel et son voisinage immédiat. Ensemble, ces deux cartes permettent de distinguer les zones globalement moins végétalisées des secteurs présentant des ruptures locales plus marquées.

Figure 3: Etat environnemental relatif et contraste spatial du couvert végétal dans la région Analamanga



Source : Auteur 2026

Interprétation

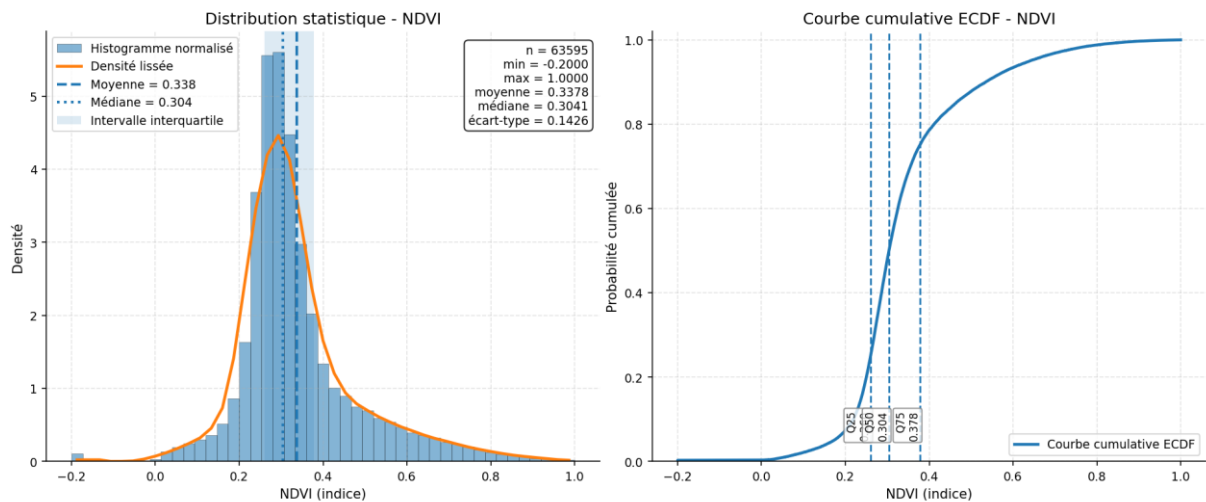
La carte de l'état environnemental ($E = -Z(\text{NDVI})$) révèle une différenciation nette de la région Analamanga. Les valeurs s'étendent approximativement de -2,5 à plus de 1,5. Les valeurs positives, représentées par les teintes jaune, orange et rouge, correspondent aux secteurs où le NDVI est relativement faible. Elles indiquent donc des espaces où le couvert végétal apparaît moins dense ou plus fragilisé. Ces valeurs dominent une grande partie du centre, de l'ouest et du sud-ouest de la région, ce qui suggère une pression environnementale plus marquée dans ces zones. À l'inverse, les valeurs négatives, visibles en vert, correspondent à des secteurs où le NDVI est plus élevé que la moyenne régionale. Elles traduisent donc un état végétal relativement plus favorable. Ces zones apparaissent surtout sur la marge orientale et sud-orientale d'Analamanga, où l'indicateur descend localement en dessous de -1, voire proche de -2 dans certains pixels. Cette organisation spatiale met en évidence un contraste entre des espaces plus végétalisés à l'est et des espaces relativement plus dégradés ou moins couverts au centre et vers l'ouest. La carte du contraste spatial (S) complète cette lecture en montrant non plus seulement le niveau relatif de dégradation, mais l'intensité des ruptures locales. Les valeurs sont comprises approximativement entre -1,8 et 1,5. Les valeurs proches de 0, dominantes sur la carte, indiquent des secteurs relativement homogènes par rapport à leur voisinage immédiat. En revanche, les valeurs positives, en rouge, signalent des pixels plus dégradés que les pixels voisins, tandis que les valeurs négatives, en bleu, indiquent des pixels relativement moins dégradés que leur environnement proche. Le contraste spatial est particulièrement visible dans la partie orientale et sud-orientale de la région, où l'alternance de valeurs positives et négatives est plus marquée. Cette structure traduit une forte hétérogénéité locale du couvert végétal. Autrement dit, certains secteurs ne se distinguent pas seulement par leur niveau moyen de NDVI, mais aussi par une fragmentation spatiale plus importante. Ce résultat peut être associé à des transitions rapides entre zones végétalisées, espaces cultivés, surfaces bâties ou sols moins couverts. Ainsi, la combinaison des deux cartes permet une lecture plus fine de la dynamique environnementale. La composante (E) identifie les zones où l'état environnemental est relativement défavorable à l'échelle régionale, tandis que la composante (S) met en évidence les discontinuités locales. Les secteurs où (E) est élevé et où (S) présente également des valeurs positives constituent donc des zones prioritaires d'attention, car ils combinent faible niveau relatif de végétation et contraste spatial marqué. Ces résultats confirment l'intérêt d'intégrer à la fois

l'état moyen du couvert végétal et son organisation spatiale dans la construction d'un indice spatio-temporel de dynamique environnementale.

3.1.4 Distribution statistique et courbe cumulative du NDVI dans la région Analamanga

La figure ci-dessous présente l'analyse statistique du NDVI extrait pour la région Analamanga. Elle combine, d'une part, un histogramme normalisé accompagné d'une courbe de densité lissée et, d'autre part, une courbe cumulative ECDF permettant d'apprécier la répartition progressive des valeurs de NDVI. Cette double lecture permet de caractériser à la fois la tendance centrale, la dispersion et l'asymétrie de la distribution du couvert végétal dans la zone d'étude.

Figure 4: Distribution statistique et courbe cumulative du NDVI dans la région Analamanga



Source : Auteur 2026

Interprétation

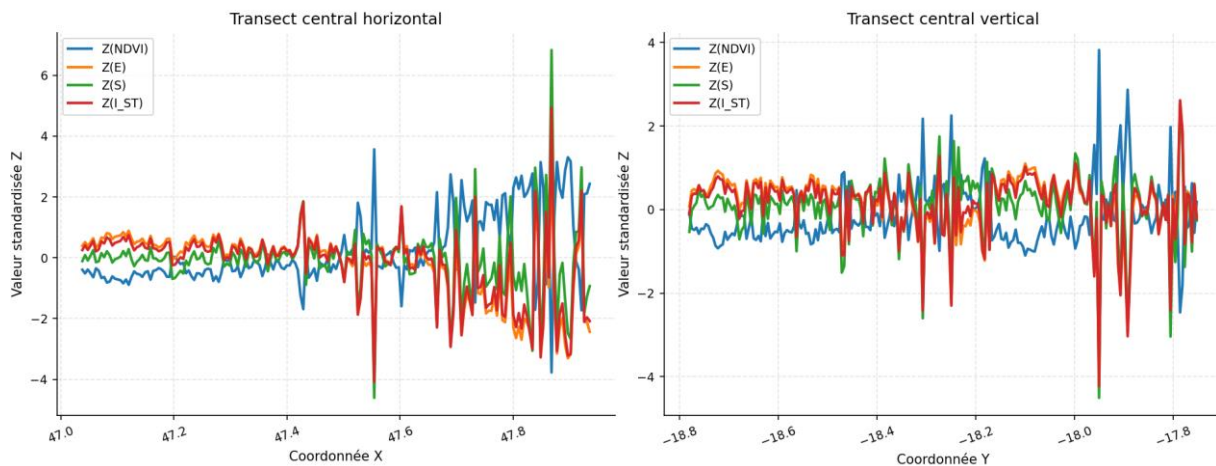
La distribution du NDVI montre une concentration importante des valeurs autour de 0,30 à 0,35, ce qui indique une dominance de pixels correspondant à un couvert végétal modéré dans la région Analamanga. L'échantillon analysé comprend 63 595 pixels valides, avec des valeurs comprises entre -0,2000 et 1,0000. La moyenne du NDVI est de 0,3378, tandis que la médiane est légèrement plus faible, avec une valeur de 0,3041. Cet écart entre moyenne et médiane suggère une distribution légèrement asymétrique vers les valeurs élevées. L'histogramme confirme cette organisation statistique. La densité maximale se situe autour de 0,30, ce qui correspond à la classe de NDVI la plus représentée dans l'ensemble de la région. La majorité des observations se regroupe dans un intervalle relativement resserré, tandis qu'une queue de distribution s'étend progressivement vers les valeurs plus fortes, jusqu'à 1,0000. Cette extension vers les valeurs élevées traduit la présence de secteurs à végétation plus dense ou plus active, même s'ils ne constituent pas la majorité de l'espace régional. La courbe cumulative ECDF précise cette lecture. Le premier quartile se situe autour de 0,261, ce qui signifie qu'environ 25 % des pixels présentent un NDVI inférieur ou égal à cette valeur. La médiane, proche de 0,304, indique que la moitié des pixels ont un NDVI inférieur ou égal à ce seuil. Le troisième quartile, estimé à environ 0,378, montre que 75 % des pixels se situent en dessous de cette valeur. Ainsi, l'intervalle interquartile, compris approximativement entre 0,261 et 0,378, révèle que la moitié centrale des valeurs de NDVI reste concentrée dans une plage assez limitée. L'écart-type, égal à 0,1426, indique une variabilité modérée du NDVI à l'échelle de la région. Cette dispersion n'est pas négligeable, mais elle reste cohérente avec une région où coexistent des surfaces végétalisées, des espaces agricoles, des zones bâties et des secteurs plus faiblement couverts. Les valeurs faibles, notamment celles proches de 0 ou négatives, peuvent être associées à des surfaces peu végétalisées, à des sols nus, à des zones artificialisées ou à des pixels affectés par des conditions particulières d'observation. À l'inverse, les valeurs supérieures à 0,5 correspondent probablement aux zones de végétation plus dense, mais elles apparaissent moins fréquentes dans la distribution. Cette analyse statistique montre que le NDVI d'Analamanga est dominé par des valeurs intermédiaires, avec une tendance centrale située autour de 0,30 à 0,34. Cette situation traduit un couvert végétal globalement modéré, mais spatialement contrasté. La présence d'une queue vers les fortes valeurs confirme l'existence de secteurs plus végétalisés, tandis que les valeurs faibles rappellent l'importance des zones moins couvertes ou plus anthropisées. Ces résultats justifient l'utilisation du NDVI comme variable de base pour

construire un indicateur environnemental dérivé, notamment l'état environnemental relatif ($E = -Z(\text{NDVI})$), utilisé pour repérer les secteurs où la couverture végétale est relativement plus faible.

3.1.5 Transects centraux des indicateurs environnementaux standardisés

La figure ci-après présente les transects centraux horizontal et vertical des principaux indicateurs dérivés du NDVI dans la région Analamanga. Les variables représentées sont le NDVI standardisé ($Z(\text{NDVI})$), l'état environnemental relatif ($Z(E)$), le contraste spatial ($Z(S)$) et l'indice intégré ($Z(I_{ST})$). Ces profils permettent d'observer la variation des indicateurs le long de deux axes majeurs de la région : un axe est-ouest, exprimé par la coordonnée X, et un axe nord-sud, exprimé par la coordonnée Y. Les valeurs étant standardisées, elles se lisent comme des écarts à la moyenne régionale.

Figure 5: Transects centraux des indicateurs environnementaux standardisés



Source : Auteur 2026

Interprétation

Le transect central horizontal met en évidence une organisation spatiale contrastée entre l'ouest et l'est de la région Analamanga. Entre les coordonnées X d'environ 47,0 et 47,4, les valeurs de ($Z(\text{NDVI})$) restent majoritairement négatives, souvent comprises entre -1 et 0. Cette situation traduit un niveau de NDVI inférieur à la moyenne régionale sur cette portion du profil. En cohérence avec la définition de l'indicateur ($E = -Z(\text{NDVI})$), la courbe ($Z(E)$) présente dans ce même secteur des valeurs plutôt positives, généralement proches de 0,3 à 0,8, indiquant un état environnemental relativement moins favorable. À partir de la coordonnée X proche de 47,5, les profils deviennent plus instables. Le ($Z(\text{NDVI})$) augmente progressivement vers l'est et atteint localement des valeurs supérieures à 2, avec certains pics approchant 3 à 3,5. Cette hausse indique la présence de secteurs où le couvert végétal est nettement supérieur à la moyenne régionale. En parallèle, ($Z(E)$) diminue fortement, parfois en dessous de -2, ce qui confirme le caractère inverse de la relation entre le NDVI et l'état de dégradation relative. Le contraste spatial ($Z(S)$) montre des fluctuations beaucoup plus marquées dans la partie orientale du transect horizontal. Alors qu'il reste proche de 0 dans la partie occidentale, il présente ensuite des pics et des creux importants, avec des valeurs pouvant dépasser +6 localement et descendre sous -4. Ces ruptures indiquent une forte hétérogénéité locale du couvert végétal. Autrement dit, certains pixels se distinguent fortement de leur voisinage immédiat, ce qui peut correspondre à des transitions rapides entre espaces végétalisés, zones agricoles, surfaces bâties ou sols plus faiblement couverts. Le profil de ($Z(I_{ST})$) suit globalement les variations combinées de ($Z(E)$) et de ($Z(S)$). Sur l'axe horizontal, l'indice intégré reste modéré dans la partie occidentale, puis devient plus contrasté vers l'est. Il présente localement des valeurs positives supérieures à 4, mais aussi des valeurs négatives proches de -3. Cela montre que l'indice intégré est particulièrement sensible aux discontinuités spatiales observées dans la partie orientale du profil. Le transect central vertical confirme également cette variabilité, mais avec une organisation moins progressive que sur l'axe horizontal. Entre les coordonnées Y d'environ -18,8 et -18,4, les valeurs de ($Z(\text{NDVI})$) restent souvent négatives, autour de -1 à 0, tandis que ($Z(E)$) reste plutôt positif. Cette configuration indique des secteurs où le NDVI est relativement inférieur à la moyenne régionale. Plus vers le nord du profil, notamment autour de -18,0 à -17,9, le ($Z(\text{NDVI})$) présente plusieurs pics marqués, dont certains atteignent environ 3 à 4. Ces pics correspondent à des zones ponctuelles de végétation relativement plus forte. Le contraste spatial vertical est également irrégulier. Les courbes ($Z(S)$) et ($Z(I_{ST})$) montrent plusieurs ruptures importantes, avec

des valeurs négatives pouvant descendre sous -4 et des valeurs positives atteignant environ 2 à 3. Ces variations traduisent une alternance de secteurs localement favorables et défavorables par rapport à leur voisinage. Le profil vertical met ainsi en évidence une forte fragmentation locale, particulièrement dans la partie nord du transect. Dans l'ensemble, les deux transects montrent que la dynamique environnementale d'Analamanga n'est pas uniforme. L'axe horizontal révèle une transition plus nette vers l'est, où les contrastes deviennent plus marqués, tandis que l'axe vertical présente une succession de variations locales plus irrégulières. La lecture conjointe de $(Z(NDVI))$, $(Z(E))$, $(Z(S))$ et $(Z(L_{ST}))$ permet donc de distinguer les tendances générales du couvert végétal des ruptures locales. Ces résultats confirment l'intérêt d'intégrer, dans l'analyse environnementale, non seulement le niveau du NDVI, mais aussi sa variabilité spatiale et son contraste par rapport au voisinage.

3.2 Discussions

La présente étude met en évidence une structuration spatiale marquée de la végétation dans la région Analamanga. Les résultats obtenus montrent que le couvert végétal de la région Analamanga présente une organisation spatiale contrastée. La distribution du NDVI, dominée par des valeurs intermédiaires autour de 0,30 à 0,34, traduit un état végétal globalement modéré. Toutefois, cette valeur moyenne ne suffit pas à rendre compte de la complexité spatiale du territoire. Les cartes et les transects révèlent en effet une hétérogénéité importante, avec des secteurs plus végétalisés vers l'est et le sud-est, tandis que certaines zones centrales et occidentales présentent des valeurs plus faibles du NDVI. L'intérêt de l'approche adoptée réside dans le passage d'une simple cartographie du NDVI à une lecture plus intégrée du couvert végétal. L'indicateur d'état environnemental relatif permet d'identifier les zones où la végétation est moins développée par rapport à la moyenne régionale. Le contraste spatial, quant à lui, met en évidence les ruptures locales entre pixels voisins. Cette information est essentielle, car elle permet de repérer des secteurs où les changements sont plus brusques, souvent associés à des transitions entre espaces agricoles, zones bâties, sols nus et formations végétales. Les couches de qualité, notamment QUAL et ACQI, renforcent la fiabilité de l'interprétation. Leur analyse montre que la majorité des pixels utilisés présente une cohérence acceptable, même si quelques variations locales doivent être considérées avec prudence. Cela rappelle que l'interprétation du NDVI dépend non seulement de la réponse végétale, mais aussi des conditions d'acquisition des données satellitaires. Dans l'ensemble, les résultats confirment que la région Analamanga ne présente pas un couvert végétal uniforme. Elle est marquée par des gradients et des discontinuités spatiales qui traduisent probablement l'effet combiné de l'urbanisation, des activités agricoles, des conditions topographiques et de la pression anthropique. L'approche proposée constitue ainsi un outil utile pour appuyer le diagnostic environnemental régional, en identifiant les zones relativement fragilisées et les secteurs où le couvert végétal reste plus favorable.

4 Conclusion

Cette étude a permis de cartographier le couvert végétal de la région Analamanga à partir du NDVI et de modéliser ses contrastes spatiaux afin de mieux comprendre l'organisation environnementale du territoire. Les résultats montrent que le NDVI présente une dominance de valeurs intermédiaires, avec une moyenne de 0,3378, une médiane de 0,3041 et un écart-type de 0,1426 pour 63 595 pixels valides. Ces valeurs traduisent un couvert végétal globalement modéré, mais marqué par une hétérogénéité spatiale importante. L'analyse cartographique met en évidence des secteurs relativement plus végétalisés, notamment vers l'est et le sud-est de la région, tandis que certaines zones centrales et occidentales apparaissent moins couvertes. L'indicateur d'état environnemental relatif a permis d'identifier les espaces où le NDVI est plus faible que la moyenne régionale. Le contraste spatial a, quant à lui, révélé des ruptures locales entre pixels voisins, soulignant l'existence de transitions entre zones végétalisées, espaces agricoles, surfaces bâties et secteurs plus fragilisés. L'intégration des couches de qualité, notamment QUAL et ACQI, a renforcé la fiabilité de l'interprétation en permettant de contrôler les conditions d'acquisition des données satellitaires. Les transects et les analyses statistiques ont également confirmé que la dynamique du couvert végétal ne se distribue pas de manière uniforme dans la région. Ainsi, l'approche proposée dépasse la simple représentation du NDVI. Elle offre une lecture plus complète du territoire en combinant cartographie, contrôle de qualité, analyse statistique et modélisation des contrastes spatiaux. Cette démarche constitue un outil pertinent pour le suivi environnemental d'Analamanga et peut contribuer à l'identification des zones nécessitant une attention particulière dans les politiques de gestion territoriale, de planification urbaine et de conservation des espaces végétalisés.

REFERENCES

- [1] . Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, NASA SP-351, 309–317.
- [2] Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. "Remote Sensing of Environment", 8(2), 127–150.
- [3] Holben, B. N. (1986). Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. "International Journal of Remote Sensing", 7(11), 1417–1434.
- [4] Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. "Remote Sensing of Environment", 83(1–2), 195–213.
- [5] Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. "Trends in Ecology & Evolution", 20(9), 503–510.
- [6] Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association—LISA. "Geographical Analysis", 27(2), 93–115.
- [7] Didan, K. (2015). "MODIS Vegetation Index User's Guide: MOD13 Series, Collection 6". NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center.
- [8] United States Geological Survey. USGS EROS Archive — Vegetation Monitoring: eMODIS and NDVI products. U.S. Geological Survey, Earth Resources Observation and Science Center.
- [9] Python Software Foundation. Python Language Reference and Python Documentation. Python Software Foundation.
- [10] Anaconda Inc. Anaconda Distribution Documentation. Anaconda Inc.
- [11] Jordahl, K., Van den Bossche, J., Fleischmann, M., McBride, J., Wasserman, J., Gerard, J., et al. (2020). GeoPandas: Python tools for geographic data. Zenodo.
- [12] Gillies, S., et al. (2013–present). Rasterio: geospatial raster I/O for Python programmers. Mapbox.
- [13] Harris, C. R., Millman, K. J., Van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., et al. (2020). Array programming with NumPy. Nature, 585, 357–362 ; Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. Computing in Science & Engineering, 9(3), 90–95.
- [14] Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). Remote Sensing and Image Interpretation. 7th edition. John Wiley & Sons.
- [15] Jensen, J. R. (2015). Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. 4th edition. Pearson.
- [16] OECD & Joint Research Centre. (2008). Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide. OECD Publishing.
- [17] Fotheringham, A. S., Brunson, C., & Charlton, M. (2000). Quantitative Geography: Perspectives on Spatial Data Analysis. Sage Publications.