

## **Estimation de la production fourragère des terres de parcours des hauts plateaux de l'oriental (Maroc) par les indices de télédétection**

**Mahyou Hamid <sup>1</sup>**

mahyouh@yahoo.com

1- Centre Régional de la Recherche Agronomique Oujda - Maroc

## **Résumé**

Les terres de parcours des Hauts Plateaux de l'Oriental constituent un appoint important à l'alimentation du cheptel ovin et caprin. L'estimation de la production fourragère de ces terres de parcours durant la saison de croissance est utile pour les gestionnaires des espaces pastoraux. L'objectif de cette étude est de tester plusieurs indices de végétation issus de la télédétection spatiale pour proposer l'indice le plus approprié à l'estimation de la phytomasse des terres de parcours marocains. A cet effet, nous avons utilisé les données collectées sur le terrain en Avril 2018 et huit indices de végétation (ARVI, DVI, IPVI, MSAVI, NDVI, RVI, SAVI et TSAVI) issus des images satellites Sentinel-2 prises en Avril 2018. Des corrélations entre la phytomasse et chacun de ces indices de végétation ont été effectuées pour identifier le meilleur estimateur. Ainsi, nous avons élaboré des modèles de régression pour l'estimation de la phytomasse en fonction des indices de végétation. Les résultats ont montré que la phytomasse des parcours a varié de 0,02 à 4,71 avec une moyenne de 0,84 tonne par hectare dans les sites étudiés. Les indices de végétation fortement corrélés avec la phytomasse sont ARVI, IPVI, NDVI, RVI et SAVI. Les modèles polynomiaux s'avèrent meilleurs que les modèles linéaires. Les meilleurs modèles d'estimation de la phytomasse sont RVI suivi par, IPVI, NDVI, ARVI et SAVI avec des  $R^2$  de 0,84 ; 0,82 ; 0,82 ; 0,81 et 0,80 respectivement.

**Mots clés :** Biomasse, Indice de végétation, Pâturage, Télédétection, Maroc Oriental.

## **Biomass estimation of rangelands in the Eastern Highlands by remote sensing indices**

### **Summary**

The rangelands of the High plateau of eastern Morocco constitute an important supplement to the feeding of sheep and goats. Estimating phytomass production from these rangelands during the growing season is useful for managers of pastoral areas. The objective of this study is to test several vegetation indices resulting from remote sensing to propose the most appropriate vegetation indices for phytomass estimation of Moroccan rangelands.

In this study, field data collected during April 2018 and eight vegetation indices (ARVI, DVI, IPVI, MSAVI, NDVI, RVI, SAVI and TSAVI) from the Sentinel-2 satellite images taken in April 2018 are used. Correlations between phytomass and each of these vegetation indices were performed to identify the best estimator. The results showed that rangeland phytomass ranged from 0.02 to 4.71 with an average of 0.84 tons per hectare in the studied sites. Vegetation indices highly correlated with phytomass are ARVI, IPVI, NDVI, RVI and SAVI. Polynomial models were better than linear models. The best model of phytomass estimation was RVI followed by, IPVI, NDVI, ARVI and SAVI with  $R^2$  of 0.84; 0.82; 0.82; 0.81 and 0.80 respectively.

**Key words:** Biomass, Vegetation index, Pasture, Remote sensing, Eastern Morocco

## تقدير إنتاج المراعي في المرتفعات الشرقية من خلال مؤشرات الاستشعار عن بعد

محيو حميد

### ملخص

تشكل مراعي النجود العليا للمنطقة الشرقية بالمغرب مكملًا هامًا لتغذية الأغنام والماعز. ويعتبر تقدير إنتاج العلف في هذه المراعي خلال فصل الربيع مهمًا لمسيري المناطق الرعوية. لذلك تهدف هذه الدراسة إلى استعمال مؤشرات الاستشعار عن بعد لتوفير المؤشر الأنسب لتقدير إنتاج المراعي.

استعملنا في هذه الدراسة البيانات التي تم جمعها في المراعي في أبريل 2018 إضافة إلى ثماني مؤشرات لصور القمر الاصطناعي Sentinel-2: ARVI، DVI، ISPI، MSAVI، NDVI، RVI، SAVI و TSAVI التقطت في أبريل 2018.

أظهرت نتائج الارتباطات بين إنتاج المراعي ومختلف المؤشرات لتحديد أفضل مؤشر لتقدير الإنتاجية أن إنتاج المراعي تراوح بين 0.02 و 4.71 طن للهكتار بمتوسط 0.84 في المناطق التي تمت دراستها. كما أظهرت النتائج أن المؤشرات الأكثر ترابطًا مع الإنتاج هي ARVI، IPVI، NDVI، RVI و SAVI. إن النماذج متعددة الحدود أفضل من الانحدار الخطي. كان أفضل نموذج لتقدير إنتاج المراعي هو RVI متبوعًا بـ IPVI و NDVI و ARVI و SAVI مع  $R^2$  يساوي 0,84 ; 0,82 ; 0,82 ; 0,81 ; 0,80 على التوالي.

الكلمات المفتاح: الإنتاج النباتي ، مؤشر الغطاء النباتي، الرعي، الاستشعار عن بعد، المغرب الشرقي

## Introduction

Les parcours représentent 65% des zones arides (MA, 2005) et leur productivité primaire nette représente environ 20% de la productivité terrestre totale. Ils constituent donc des écosystèmes naturels ou semi-naturels, utilisés principalement pour la production animale (Stoddart *et al.*, 1975 ; 1989). Ils soutiennent environ 50% du cheptel mondial et fournissent des aliments à la fois pour les animaux domestiques et pour la faune sauvage (Puigdefabregas, 1998).

Au Maroc, les terres de parcours occupent 75% du territoire du pays (Mahyou *et al.*, 2018). La plupart de ces terres sont situées dans des zones arides et semi-arides. Ces espaces pastoraux sont importants sur le plan écologique, économique et social, car ils fournissent des moyens de subsistance à des milliers de personnes et protègent le pays de la désertification.

De nombreuses études sur la production des terres de parcours ont montré le rôle de plus en plus important de ces terres de parcours (Scurlock *et al.*, 2002, Xu *et al.*, 2008). En effet, ces terres des régions arides et semi-arides sont confrontées à la désertification ou à la dégradation causée par les activités humaines et les changements climatiques. La détermination précise de la production fourragère des terres de parcours et de sa variation temporelle et spatiale est importante pour l'utilisation et la protection des ressources pastorales. Il va sans dire que l'estimation de la phytomasse à l'aide des mesures de terrain est coûteuse et prend beaucoup de temps, en particulier dans ces grandes régions semi-arides où la productivité par unité de surface est généralement faible et très variable d'une année à l'autre.

L'utilisation de la télédétection spatiale est devenue une approche importante pour l'estimation de la phytomasse (Barrachina *et al.*, 2015 ; Bella *et al.*, 2004 ; Diouf *et al.*, 2015). Ainsi, le développement d'indices spectraux dérivés de la télédétection a particulièrement intéressé les gestionnaires de pâturages en tant que moyen plus rentable pour mesurer les caractéristiques, la phytomasse et l'étendue de la végétation (Eisfelder *et al.*, 2012).

Les indices de végétation calculés à partir des réflectances peuvent refléter l'activité photosynthétique de la végétation et sont donc de plus en plus utilisés pour le suivi de la productivité des terres de parcours (Gao *et al.*, 2013). La combinaison de la télédétection et des mesures de terrain, permet d'évaluer la quantité de phytomasse produite et de mettre à la disposition des décideurs des informations d'aide à la décision en matière de gestion des ressources naturelles. Plusieurs approches pour estimer la phytomasse en se basant sur les données de télédétection dans les régions semi-arides ont été étudiées (Eisfelder *et al.*, 2012).

L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) proposé par Rouse *et al.* (1973) est l'indice le plus largement utilisé par les scientifiques (Ouyang *et al.*, 2012; Anyamba *et al.*, 2005 ; Wong *et al.*, 2003 ; Lee *et al.*, 2016). De nombreuses études ont montré la forte relation linéaire qui existe entre le NDVI et la phytomasse et l'ont utilisé dans une large gamme d'applications (Huang *et al.*, 2010 ; Anyamba *et al.*, 2005 ; Wong *et al.*, 2003). En effet, le NDVI a été utilisé avec succès pour évaluer la phytomasse dans plusieurs études (Keiji *et al.*, 2015 ; Boelman *et al.*, 2005 ; Walker *et al.*, 2003 ; Johansen *et al.*, 2014). Gaitán *et al.* (2013) ont utilisé une régression linéaire pour évaluer les relations entre les données de terrain et celles de télédétection. Les données de télédétection comprenaient NDVI et l'indice de végétation amélioré (EVI) entre 2008 et 2012 dans les steppes de Patagonie.

Mahyou *et al.* (2018) ont utilisé une régression linéaire pour évaluer les relations entre les données de terrain et les données de télédétection dans les steppes de Maroc Oriental. Cette étude indique qu'il existe un fort potentiel d'utilisation opérationnelle des données de télédétection pour estimer la phytomasse des pâturages semi-intensivement exploitées.

Cependant, dans les situations où le recouvrement est éparé, les indices de végétation perdent leur capacité de décrire les paramètres biophysiques de la végétation en raison de la contribution significative de la valeur de réflectance du sol (Boschetti *et al.*, 2007). En effet, durant la dernière décennie, une nouvelle génération d'indices de végétation a été développée pour estimer la phytomasse basée sur des données de télédétection. L'objectif de ces indices est de minimiser les effets perturbateurs, tels que la couleur et la brillance des sols nus et de rehausser le signal issu de la végétation (Yan *et al.*, 2013).

L'indice de végétation ajusté pour le sol I (SAVI), proposé par Huete (1988), permet d'éliminer l'effet sol. Il a été conçu pour réduire l'effet de brillance des sols en ajoutant deux paramètres aux différents canaux. Un autre indice est l'indice de végétation optimisé et ajusté pour le sol (MSAVI) présenté par (Rondeaux *et al.*, 1996) afin de compenser l'effet relatif du sol et de tenir compte de la quantité de végétation observée. Nous pouvons trouver le TSAVI (Transformed SAVI) proposé par Barret et Guyot (1991) ainsi que les deux versions de MSAVI (Modified SAVI) proposées par Qi *et al.* (1994). L'indice de végétation ajusté du sol transformé (TSAVI) est un indice de végétation qui tente de minimiser les influences de la luminosité du sol en supposant que la ligne du sol présente une pente et une interception arbitraires. Dans les Alpes italiennes centrales, une analyse de régression logarithmique entre la phytomasse et les différents indices de végétation, a montré que les indices de végétation du sol ajusté SAVI, TSAVI et MSAVI ont donné une meilleure corrélation par rapport à d'autres indices utilisés (Boschetti *et al.*, 2007).

D'autres scientifiques ont formulé de nouveaux indices de végétation spectraux pouvant prendre en charge une plus grande variabilité due à la réflectance atmosphérique, notamment l'indice Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) (Kaufman et Tame, 1992). ARVI peut effectivement réduire la dépendance de cet indice de végétation aux effets de l'atmosphère. Myeni et Asrar (1992) ont testé la sensibilité de cet indice et trouvé que le ARVI réagit de manière semblable au NDVI sur des données de réflectances spectrales collectées à la surface de la terre donc abstraction faite de l'atmosphère. L'indice différentiel de végétation (DVI), appelé aussi l'indice de végétation brut, est également suggéré par Richardson et Wiegand (1977) comme un indice de végétation plus facile à calculer. L'Indice de Végétation en Pourcentage Infrarouge (IPVI), est fonctionnellement identique au NDVI, mais il est plus rapide en calcul (Crippen, 1990). Le rapport simple (RVI) met en relief la présence de la végétation sur les images. Il a été décrit pour la première fois par Jordan (1969).

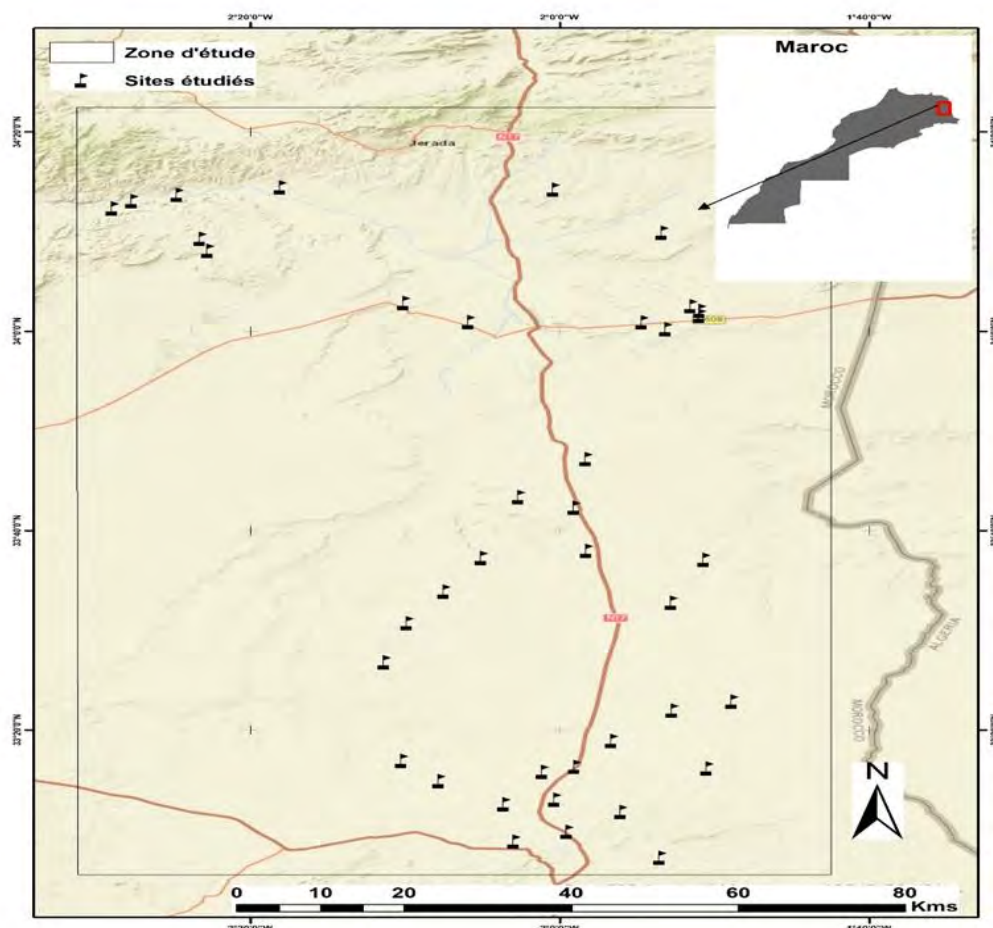
La quantité de phytomasse disponible dans les différentes zones des parcours de l'Est du Maroc, constitue un indicateur fort utile pour une meilleure planification de l'utilisation des ressources pastorales et leur exploitation raisonnable. A cet effet, ce travail a pour but d'estimer la phytomasse des parcours au niveau des hauts plateaux de l'Oriental, en combinant les données des satellites avec les données collectées sur le terrain. Dans cette étude, on analysera statistiquement la relation des indices de végétation à la phytomasse mesurée durant la saison de croissance.

## Matériels et Méthodes

### Zone d'étude

La zone d'étude est située dans les hauts plateaux de l'Oriental (34° 22' 12" / 33° 5' 24" Nord et 1° 42' 36" / 02° 31' 12" Ouest), et elle s'étend sur une superficie d'environ 1.000.000 ha (Figure. 1). Les précipitations annuelles moyennes y sont faibles et irrégulières, de l'ordre de 180 mm/an et se manifestent le plus souvent sous forme d'averses orageuses. Les températures moyennes maximales sont de l'ordre de 42.5°C en été, et les minimales peuvent atteindre -4°C en hiver. Les vents dominants soufflent de l'Ouest, du Nord-Ouest et du Sud., Ces derniers sont desséchants et amènent parfois des tempêtes de sable. Les gelées hivernales sont fréquentes.

Les sols sont battants, limoneux à argilo-limoneux, peu évolués, peu perméables, pauvres en matière organique, et très vulnérables à l'érosion hydrique et éolienne. Les formations végétales sont des steppes à base de *Stipa tenacissima*, *Thymus* sp, *Noaeamucronata*, *Stipa parviflora* et *Lygeum spartum* ; des steppes dégradées sur à base de *Peganumharmala* ou/et *Anabasisaphylla*, et des steppes à base de *Stipa tenacissima*, *Artemisia herba-alba* et/ou annuelles (*Schismusbarbatus*) en mosaïque avec *Stipa parviflora*, *Atractilisserratuloides* et *Helianthemumspp* (Mahyou et al., 2016) .

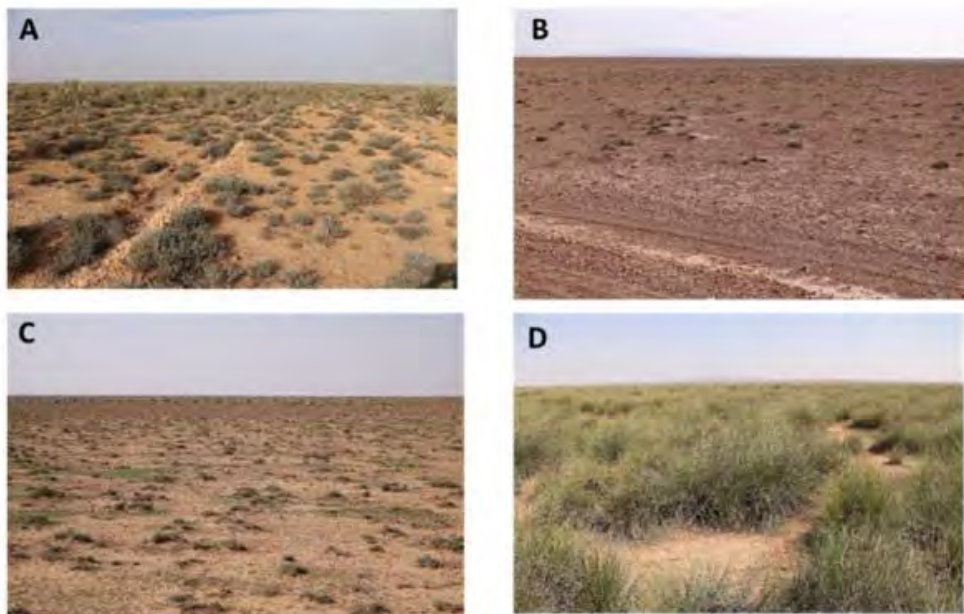


**Figure 1:** Localisation des sites d'échantillonnage dans la zone d'étude



### Collecte des données de terrain

La collecte des données a été réalisée durant le mois d'Avril 2018, correspondant à la saison de croissance de la végétation des terres de parcours. En tenant compte de l'hétérogénéité au sein des formations végétales de la zone d'étude, un échantillonnage est stratifié et aléatoire a été réalisé. Un total de 37 sites représentant les différentes formations végétales de la zone a été sélectionné. Au niveau de chaque site sélectionné, 3 relevés de 25 m<sup>2</sup> (5 X 5 m) ont été choisis pour la mesure de la phytomasse. La méthode de mesure de la phytomasse de la végétation, dépend du type la formation végétale. Pour la végétation telle que *Artemisia herba-alba*, *Stipa tenacissima*, *Stipa parviflora*, *Noaea mucronata* et *Atractylis serratuloides*, les mesures se sont basées sur la méthode de l'unité de référence (UR) (Kirmse et Norton, 1985). Pour les herbacées, les plantes d'un quadrat d'un m<sup>2</sup> à l'intérieur du relevé ont été coupées et pesées. Au laboratoire, les échantillons ont été mis dans une étuve pendant 72 heures à 60°C. L'UR des arbustes ainsi que les plantes herbacées sont desséchées et pesées pour déterminer la matière sèche (MS) (P en g/10 m<sup>2</sup>). Les coordonnées géographiques, l'altitude, le poids frais, le recouvrement total et la liste des espèces présentes dans les sites sélectionnés ont été enregistrés.



**Figure 2.** Photos montrant une steppe *Artemisia herba-alba* (A), des steppes dégradées (B et C) et une steppe à *Stipa tenacissima* (D) dans la zone d'étude pendant le mois Avril 2018.

### Traitement des images satellitaires

Trois images Sentinel-2A issus des satellites du programme d'observation Copernicus Esa d'une résolution spatiale de 10 m, Zone 30S, projection cartographique UTM WGS84 sont utilisées. Les images, acquises au mois d'Avril 2018, correspondent à la période de croissance de la végétation et coïncident avec la période de collecte des données de terrain. Les images Sentinel-2A ont déjà subi des corrections géométrique, radiométrique et atmosphérique, avant de procéder à l'extraction des indices de végétation. Les valeurs de réflectance spectrale bleu,



rouge et proche infrarouge ont été sélectionnées pour calculer les indices de végétation. Différents indices de végétation correspondants aux images Sentinel-2 ont été calculés à l'aide de SNAP Tool Box pour évaluer la phytomasse.

Le tableau 1 présente huit indices de végétation, leurs formules et leurs bandes Sentinel-2. Dans Arc GIS 10.4, un shapefile des 37 sites étudiés a été créé et superposé aux indices de végétation. Les valeurs des indices de végétation de pixels masqués par les sites étudiés ont été extraites.

**Tableau 1** : Description des indices de végétations utilisés dans l'étude.

Indice	Formule	Nom complet	Auteurs
<b>NDVI</b>	$NDVI = \frac{(PIR - R)}{(PIR + R)}$	indice de végétation par différence normalisé	(Rouse and Haas (1973); Tucker (1979))
<b>RVI</b>	$RVI = \frac{R}{PIR}$	indice de végétation par quotient	Krieger et al. (1969); Jordan (1969)
<b>DVI</b>	$DVI = PIR - R$	indice différentiel de végétation	Tucker (1979)
<b>SAVI</b>	$SAVI = \frac{(PIR - R)}{(PIR + R + L)}$	indice de végétation ajusté pour le sol	Huete (1985)
<b>MSAVI</b>	$MSAVI = (1 + L) * \frac{(PIR - R)}{(PIR + R + L)}$	indice modifié de végétation ajusté pour le sol	Qi et al. (1994)
<b>TSAVI</b>	$TSAVI = \frac{a * (PIR - a * R - b)}{(R + a * PIR - a * b)}$	indice transformé de végétation ajusté pour le sol	Baret et al. (1989)
<b>ARVI</b>	$ARVI = \frac{(PIR - RB)}{(PIR + RB)}$	Indice de végétation atmosphérique résistant	Kaufman and Tanre (1992)
<b>IPVI</b>	$IPVI = \frac{NIR}{(PIR + R)}$	Indice de végétation en pourcentage infrarouge	Crippen (1990)

PIR est la bande proche infrarouge ; R est la bande rouge ; B est la bande bleue ; L = 0,5 est Facteur d'ajustement du sol : a = pente de la droite des sols nus dans l'espace R/PIR ; b = ordonnée à l'origine de la droite des sols nus dans l'espace R/PIR.

### Analyse et validation des données

Une analyse exploratoire des données a été réalisée pour interpréter les résultats. Ainsi, des statistiques descriptives ont été produites avant l'analyse de régression. Les analyses de régression linéaire simple et polynomiale de second degré ont été utilisées pour examiner la performance de ces indices de végétation dans l'estimation de la phytomasse de la zone d'étude.

La précision des modèles d'estimation de la phytomasse a été évaluée par le coefficient de détermination ( $R^2$ ) et la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{est,i})^2}{n}}$$

Où  $X_{obs,i}$  ;  $X_{est,i}$  et  $n$  représentent respectivement la phytomasse observée, la phytomasse estimée et le nombre d'échantillons.

## Résultats et discussion

### Description de la phytomasse des terres de parcours et des indices de végétation

Le tableau 2 montre les statistiques descriptives de la phytomasse et des indices de végétation des terres de parcours dans la zone d'étude. La phytomasse moyenne des sites étudiés est de 0,84 T/ha, avec un minimum de 0,02 T/ha et un maximum de 4,71 T/ha avec une variation très importante. En effet, sur les 37 sites échantillonnés, 22 étaient à prédominance d'espèces indicatrices de dégradation, particulièrement *Atractylis serratuloides*, *Peganum harmala*, *Noaemucronata*, *Anabasis aphylla*, *Lygium spartum* avec une production et un recouvrement faible. Les autres sites sont des sites à dégradation faible ou en bon état représentés par *Artemisia herba alba*, *Stipa parviflora* ou *Stipa tenacissima*.

Ainsi, les steppes dégradées dominantes dans la zone d'étude présentaient des réflectances faibles dans la région rouge en raison de la forte absorption de la chlorophylle. Les steppes à alfa sont comparables à celles de la steppe dégradée, la courbe spectrale des steppes à alfa présente une réflectance plus élevée dans la région rouge et une réflectance plus faible dans la région PIR.

**Tableau 2 :** Description statistique des indices de végétation et de la phytomasse dans la zone d'étude

<i>Variables</i>	<i>Minimum</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Maximum</i>	<i>Ecartype</i>
<b>ARVI</b>	-0,15	-0,10	0,04	0,05
<b>DVI</b>	0,06	0,08	0,10	0,01
<b>IPVI</b>	0,54	0,56	0,62	0,02
<b>MSAVI</b>	0,08	0,25	0,59	0,22
<b>NDVI</b>	0,09	0,12	0,22	0,03
<b>RVI</b>	1,19	1,28	1,61	0,11
<b>SAVI</b>	0,07	0,10	0,16	0,02
<b>TSAVI</b>	-1,49	-0,45	-0,26	0,23
<b>Phytomasse (T/ha)</b>	0,02	0,84	4,71	1,10

### Relations entre les indices de végétation et la phytomasse

Les modèles de régression linéaire et polynomiale de la phytomasse en fonction des indices de végétations ont été comparés. Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) et la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) pour chaque modèle de régression des indices de végétation et la phytomasse totale, sont présentés dans le tableau 2. La régression entre les indices de végétation et la phytomasse estimée dans la zone d'étude montre que le modèle polynomial est globalement plus précis que le modèle linéaire, pour l'ensemble des indices de végétation.

Pour les sites étudiés, le RVI est le meilleur modèle polynomial pour estimer la phytomasse sur les terres de parcours par rapport aux autres indices ( $R^2 = 0,84$ ). Cependant, il ne diffère pas significativement des modèles NDVI, IPVI, ARVI ou SAVI. En effet, les quatre indices sont significativement corrélés à la phytomasse dans le cas du modèle polynomial avec des  $R^2$  égales à 0,82 ; 0,82 ; 0,81 et 0,80 respectivement pour NDVI, IPVI, ARVI et SAVI. Les indices MSAVI et TSAVI souvent recommandés dans les zones à faible couverture végétale en raison de son élimination de l'effet sol, ont montré une faible corrélation surtout pour l'indice MSAVI dont le coefficient de corrélation  $R^2$  est de l'ordre de 0,05 dans le cas du modèle linéaire et il est moins élevé dans le cas du modèle polynomial ( $R^2 = 0,53$ ). Le modèle polynomial TSAVI a donné des résultats moyens pour l'estimation de la phytomasse et a produit un  $R^2$  de 0,73. Il est à noter que l'indice SAVI n'a apporté aucune amélioration par rapport au NDVI pour les modèles linéaires et polynomiales.

Les modèles de régression de l'indice DVI avec la phytomasse montrent des coefficients de corrélation faibles ( $R^2$  est de 0,31 et 0,37 respectivement pour les modèles linéaires et polynomiales). Cet indice ne donne pas une bonne indication de l'état de la végétation, car il est extrêmement influencé par l'éclairement différentiel et donc par les variations topographiques. Le DVI est un bon indice pour les zones où il y a une grande activité photosynthétique (Payero *et al.*, 2004).

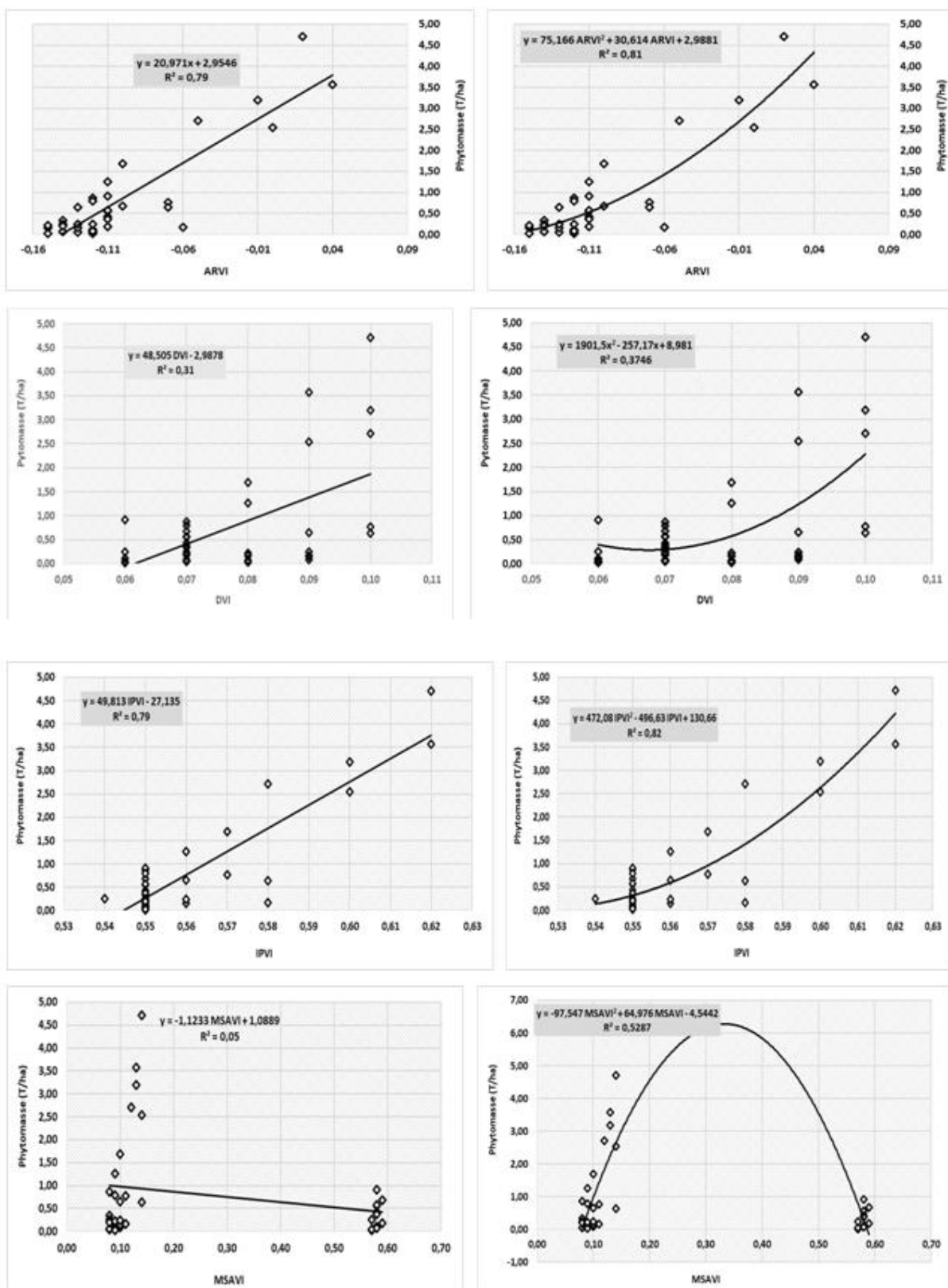
Les résultats RMSE relatifs aux différents indices de végétation et aux deux modèles de régression pour la phytomasse diffèrent d'un indice à l'autre. Toutefois, les différents modèles de régression restent globalement imprécis avec des RMSE qui varient entre 0,48 et 1,1. Ceci vient confirmer l'imprécision notée par Mahyou *et al.* (2018) sur ces relations empiriques. L'état de dégradation des terres de parcours affecte l'impact de ces indices de télédétection pour estimer la phytomasse.

En ce qui concerne l'indice RVI, la précision de l'ensemble des données est également robuste avec des RMSE de 0,47. RVI, en particulier, a montré une performance bien meilleure. Le modèle polynomial de l'indice RVI pourrait expliquer 84% de la variance de la phytomasse et améliorer la capacité d'estimation par rapport aux autres indices de végétation.

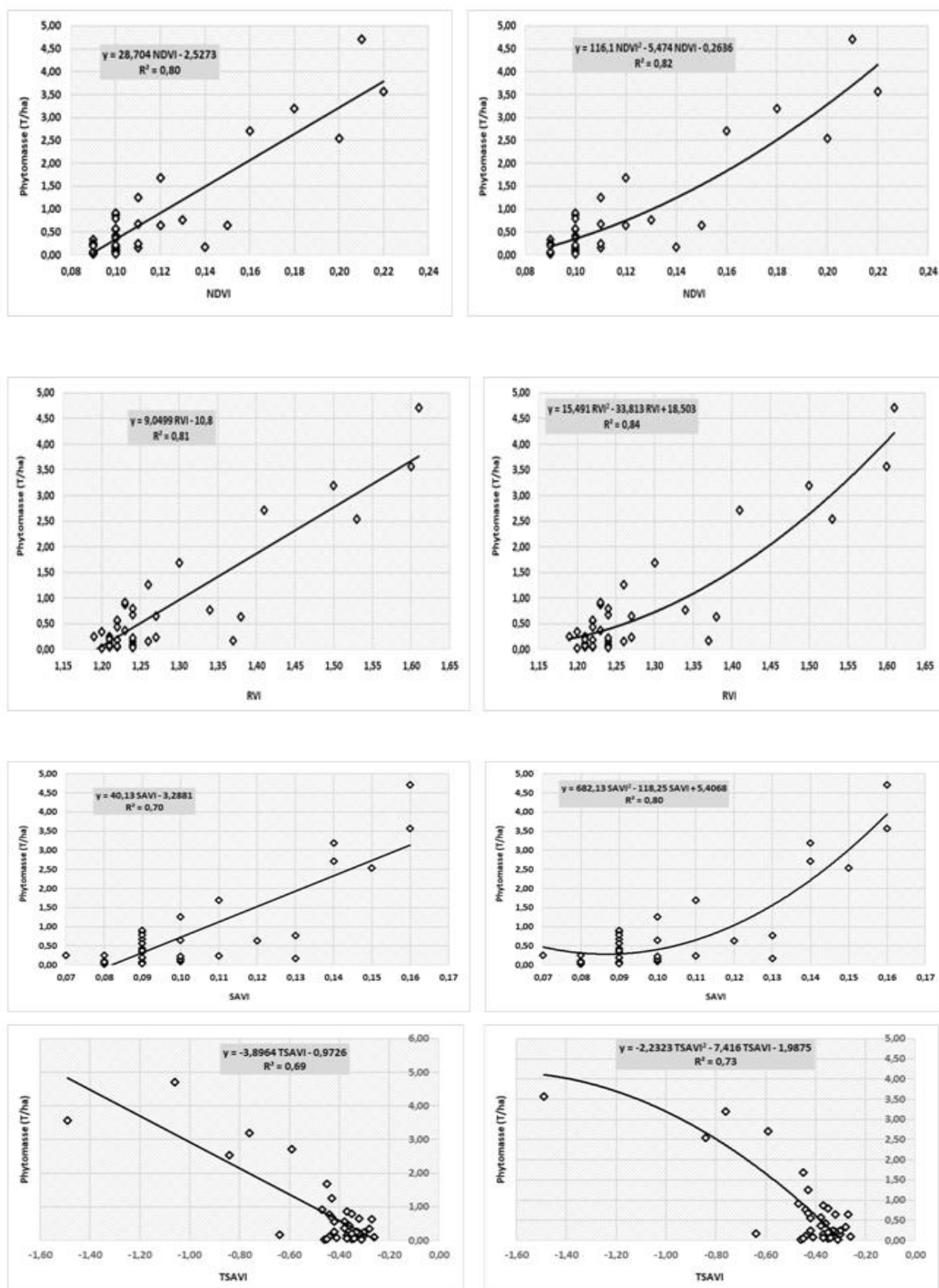
Les indices, NDVI et ARVI apparaissent aussi comme les meilleurs prédicteurs de la phytomasse dans notre zone d'étude. Par rapport aux études antérieures, ils présentent une amélioration dans la précision de l'estimation de la phytomasse. Cependant, comme le montrent de nombreuses études, une estimation précise de la phytomasse à l'aide des données de télédétection restent problématiques dans les terres de parcours arides et semi-arides en raison du faible couvert végétal et du mélange entre feuilles vertes et mortes, ce qui est le cas de *stipa tenacissima* (mahyou *et al.*, 2018). D'après nos observations sur le terrain, généralement le recouvrement de la végétation verte sur notre site d'étude est inférieur à 30%. Les résultats sont essentiellement compatibles avec les résultats de Mahyou *et al.* (2018).

**Tableau 3.** Les modèles statistiques d'estimation de la phytomasse et leurs précisions

		$R^2$	$R^2$ Adj	RMSE	Equation
<b>ARVI</b>	<b>Linéaire</b>	0,79	0,78	0,53	Phytomasse = 2,95 + 20,97*ARVI
	<b>Polynomial</b>	0,81	0,80	0,50	Phytomasse = 2,19 + 15,17*ARVI + 75,16*(ARVI-0,1027)^2
<b>DVI</b>	<b>Linéaire</b>	0,31	0,29	0,94	Phytomasse = -2,99 + 48,50*DVI
	<b>Polynomial</b>	0,37	0,34	0,91	Phytomasse = -2,62 + 39,86*DVI + 1901,45*(DVI-0,09)^2
<b>IPVI</b>	<b>Linéaire</b>	0,79	0,79	0,52	Phytomasse = -27,13 + 49,81*IPVI
	<b>Polynomial</b>	0,82	0,81	0,48	Phytomasse = 1,87 + 14,94*MSAVI - 97,55*(MSAVI-0,27)^2
<b>MSAVI</b>	<b>Linéaire</b>	0,05	0,02	1,11	Phytomasse = 1,09 - 1,12*MSAVI
	<b>Polynomial</b>	0,53	0,50	0,79	Phytomasse = 1,87 + 14,94*MSAVI - 97,55*(MSAVI-0,26)^2
<b>NDVI</b>	<b>Linéaire</b>	0,80	0,80	0,50	Phytomasse = -2,53 + 28,70*NDVI
	<b>Polynomial</b>	0,82	0,81	0,49	Phytomasse = -1,82 + 21,44*NDVI + 116,10*(NDVI-0,116)^2
<b>RVI</b>	<b>Linéaire</b>	0,81	0,81	0,49	Phytomasse = -10,80 + 9,05*RVI
	<b>Polynomial</b>	0,84	0,83	0,47	Phytomasse = -6,95 + 5,90*RVI + 15,49*(RVI-1,28189)^2
<b>SAVI</b>	<b>Linéaire</b>	0,70	0,69	0,63	Phytomasse = -3,29 + 40,13*SAVI
	<b>Polynomial</b>	0,80	0,79	0,51	Phytomasse = -1,68 + 20,76*SAVI + 682,13*(SAVI-0,10189)^2
<b>TSAVI</b>	<b>Linéaire</b>	0,69	0,68	0,63	Phytomasse = -0,97 - 3,90*TSAVI
	<b>Polynomial</b>	0,73	0,71	0,60	Phytomasse = -1,53 - 5,38*TSAVI - 2,23*(TSAVI-0,4551)^2







**Figure 2 :** Corrélation entre les indices de végétation et la phytomasse (modèle linéaire et polynomial)

## **Conclusion**

Dans la présente étude, plusieurs indices de végétation issus des images sentinel 2 ont été proposés pour estimer la phytomasse des terres de parcours pour les zones arides et semi-arides, où l'estimation précise de la phytomasse reste un défi en raison des influences du sol et des types de végétation pérennes.

Les indices RVI, IPVI, NDVI et ARVI sont apparus comme les meilleurs prédicteurs de la phytomasse dans notre zone d'étude. Le modèle polynomial de l'indice RVI pourrait expliquer 84% de la variation de la phytomasse. Les indices utilisés pour l'estimation de la phytomasse dans les parcours arides et semi-arides sont fortement influencés par l'état de dégradation des terres de parcours et les feuilles sèches et/ou sénescents, notamment les steppes à alfa. Par conséquent, les signaux spectraux du sol et des steppes à alfa ainsi que leurs variations doivent être pris en compte pour l'estimation de la phytomasse à l'aide des données de télédétection dans les parcours arides et semi-arides.

Les indices SAVI, TSAVI et MSAVI proposés pour estimer la phytomasse dans les parcours arides et semi-arides n'ont pas apporté d'amélioration par rapport aux autres indices de végétation non ajustés au sol dans les steppes arides des hauts plateaux de l'Oriental.

## Références Bibliographiques

- Anyamba A., Tucker C. J. (2005). Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003. *Journal of Arid Environments* 63. p. 596-614.
- Asrar G., Myneni R.B., Choudhury B.J. (1992). Spatial heterogeneity in vegetation canopies and remote sensing of absorbed photosynthetically active radiation: A modeling study, *Remote Sensing of Environment* 41(2-3). p. 85-103.
- Baret F., Guyot G., Major D. (1989). TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation, *Proc. Joint 12th Canadian Symposium Remote Sensing and IGARSS 4*. p. 1355-1359.
- Barrachina M., Cristóbal J., Tulla AF. (2015). Estimating above-ground biomass on mountain meadows and pastures through remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 38. p. 184-192.
- Bella D., Faivre R., Ruget F., Seguin B., Guérif M., Combal B., Weiss M., Rebella C. (2004). Remote sensing capabilities to estimate pasture production in France. *International Journal of Remote Sensing* 25. p. 5359-5372.
- Boelman N. T., Stieglitz M., Griffin K. L., Shaver G. R. (2005). Inter-Annual Variability of NDVI in Response to Long-Term Warming and Fertilization in Wet Sedge and Tussock.
- Boschetti M., Bocchi S., Brivio P.A. (2007) Assessment of pasture production in the Italian Alps using spectrometric and remote sensing information. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 118 (4). p. 267-272.
- Crippen R. E. (1990). Calculating the vegetation index faster. *Remote Sensing of Environment* 34(1). p. 71-73.
- Diouf A.A., Brandt M., Verger A., El Jarroudi M., Djaby B., Fensholt R., Ndione J.A., Tychon B. (2015). Fodder biomass monitoring in Sahelian rangelands using phenological metrics from FAPAR time series. *Remote Sensing* 7. p. 9122-9148.
- Eisfelder C., Kuenzer C., Dech S. (2012). Derivation of biomass information for semi-arid areas using remote-sensing data. *International Journal of Remote Sensing*. 33. p. 2937-2984.
- Gaitán J.J., Bran D., Oliva G., Ciari G., Nakamatsu V., Salomone J., Ferrante D., Buono G., Massara V., Humano G., Celdrán D. Opazo W., Maestre F. T. (2013). Evaluating the performance of multiple remote sensing indices to predict the spatial variability of ecosystem structure and functioning in Patagonian steppes. *Ecological Indicators* 34. p. 181-191.
- Gao T., Xu B., Yang X.C., Jin Y.X., Ma H.L., Li J.Y., Yu H.D. (2013). Using MODIS time series data to estimate aboveground biomass and its spatio-temporal variation in Inner Mongolia's grassland between 2001 and 2011. *International journal remote sensing* 34. p. 7796-7810.
- Huete A.R. (1988). A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25. p. 295-309.

- Kaufman J. Y., Tanre D. (1992). Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions* 30. p. 261-270.
- Johansen B., Tømmervik H. (2014). The relationship between phytomass, NDVI and vegetation communities on Svalbard. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 27. p. 20–30.
- Jiaguo Qi., Chehbouni A., Huete A., Kerr Y.H., Sorooshian S. (1994). A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment* 48. p.119-126.
- Jordan C.F. (1969). Derivation of leaf area index from quality measurements of light on the forest floor. *Ecology* 50. p. 663-666.
- Kirmse R.D., Norton B.E. (1985). Comparison of the reference unit method and dimension analysis methods for two large shrubby species in the caatinga woodlands. *Journal of Range Management* 38 (5). p. 425-428.
- Kushidaa K., Hobarab S., Tsuyuzakic S., Kimd Y., Watanabee M., Setiawanf Y., Haradag K., Shaverh G.R., Fukudai M. (2015). Spectral indices for remote sensing of phytomass, deciduous shrubs, and productivity in Alaskan Arctic tundra. *International Journal of Remote Sensing* 36 (17). p. 4344–4362.
- MA (Millennium Ecosystem Assessment) (2005). *Assessment. Ecosystems and Human Well-being: Desertification Synthesis*. World Resources Institute, Washington DC. 100p.
- Mahyou H., Tychon B., Lang M., Balaghi R. (2018). Phytomass estimation using eMODIS NDVI and ground data in arid rangelands of Morocco. *African Journal of Range & Forage Science* 35 (1). p. 1-12.
- Mahyou H., Tychon B., Balaghi R., Louhaichi M., Mimouni J. (2016). A knowledge-based approach for mapping land degradation in the arid rangelands of North Africa. *Land Degradation and Development* 27. p. 1574–1585.
- Ouyang W., Hao F.H., Skidmore A.K., Groen T.A., Toxopeus A.G., Wang T.J. (2012). Integration of multi-sensor data to assess grassland dynamics in a Yellow River sub-watershed. *Ecological Indicators* 18. p.163-170.
- Payero J.O., Neale C.M.U., Wright J.L. (2004). Comparison of eleven vegetation indices for estimating plant height of alfalfa and grass, *Applied Engineering in Agriculture* 20(3). p. 385-393.
- Richardson A.J., Wiegand C.L. (1977). Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric engineering and remote Sensing* 43. p. 1541-1552.
- Rondeaux G., Steven M., Baret F. (1996). Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment* 55(2). p. 95-107.
- Rouse J. W., Haas R.H., Shell J.A., Deering D.W. (1973). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, Washington, DC, USA. p. 309–317.
- Scurlock J.M.O., Johnson K., Olson R.J. (2002). Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Global Change Biology* 8(8). p.736 – 753.

- Stoddart L. A., Smith A.D., Box T.W. (1975). Range Management. 3<sup>rd</sup> ed. McGraw-Hill, New York. 532p.
- Tucker C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of the Environment 8. p. 127-150.
- Walker D. A., Epstein H. E., Jia G. J., Balser A., Copass C., Edwards E. J., Gould W. A., Hollingsworth J., Knudson J., Maier H. A., Moody A., Reynolds M. K. (2003). Phytomass, LAI, and NDVI in Northern Alaska: Relationships to Summer Warmth, Soil pH, Plant Functional Types, and Extrapolation to the Circumpolar Arctic. Journal of Geophysical Research-Atmospheres 108 (D2). p. 8169.
- Xu B., Yang X.C., Tao W.G., Qin Z.H., Liu H.Q., Miao J.M., Bi Y.Y. (2008). MODIS-based remote sensing monitoring of grass production in China. International journal remote sensing 29. p. 5313–5327.
- Yan F., Wu B., Wang Y.J. (2013). Estimating aboveground biomass in Mu Us Sandy Land using Landsat spectral derived vegetation indices over the past 30 years. Journal of Arid Land 5. p. 521–530.