

L'indice différentiel normalisé de végétation comme indicateur de la dégradation

C.L. Meneses-Tovar

*Application d'une méthode
d'interprétation des images de
télédétection à l'observation
de l'évolution de la santé des
forêts dans le temps.*

La dégradation des forêts est devenue un problème grave, en particulier dans les pays en développement. En 2000, on estimait que la superficie totale des forêts dégradées, réparties sur 77 pays, s'élevait à 800 millions d'hectares; sur ces derniers, 500 millions d'hectares étaient passés d'une végétation primaire à une végétation secondaire (OIBT, 2002). Parmi ses divers impacts négatifs, le processus de dégradation des forêts constitue une part significative des émissions de gaz à effet de serre. Il apparaît urgent de mesurer et analyser ce processus, en vue de concevoir une action susceptible de l'inverser.

Cet article décrit la façon dont a été mise en pratique une méthode associant l'analyse de données de télédétection et l'analyse de données de terrain pour

observer la dégradation des forêts. Il présente une étude menée afin d'identifier la relation existant entre les indicateurs des fonctions des forêts et l'indice différentiel normalisé de végétation (NDVI, de l'anglais *normalized difference vegetation index*). Cet indice fournit des valeurs estimées de «l'intensité de vert» des forêts, résultant de l'analyse de données satellitaires. La démarche part du principe que le NDVI est un indicateur de la santé végétale, dans la mesure où une dégradation de la végétation d'un écosystème, ou une diminution de l'intensité de vert, se traduirait par une diminution de la valeur du NDVI. Par conséquent, s'il est possible d'identifier dans divers écosystèmes forestiers une relation entre le niveau d'un indicateur

Carmen Lourdes Meneses-Tovar
est Sous-directrice de la télédétection à la
Commission nationale des forêts du Mexique.

Végétation naturelle, Mexique



donné – la biomasse aérienne – et le NDVI, il est aussi possible de suivre l'évolution du processus de dégradation.

MESURER LES CHANGEMENTS

Téledétection et phénologie

L'une des applications majeures de la téledétection est le suivi des processus advenant sur la planète.

Les images peuvent être utilisées pour analyser des processus de court terme, par exemple pour observer le cycle de croissance de certaines cultures en vue d'évaluer les rendements d'une récolte donnée. On analyse alors des images satellitaires prises à différentes étapes du cycle au cours de l'année, notamment: préparation des sols, ensemencement, établissement des plants, croissance active, floraison, fructification et translocation des nutriments ou mûrissement des fruits, et récolte.

Les images peuvent aussi servir à étudier des processus de moyen et long terme. Les analyses de la dégradation des forêts et des changements d'affectation des terres représentent des exemples majeurs d'application de cette approche. Il est en effet possible de comparer des images issues d'années différentes. Ces images doivent être prises à la même période de l'année, de façon à réduire au maximum l'expression de variables telles que la qualité de la lumière, la géométrie de l'observation et, dans le cas d'écosystèmes végétaux, les différences de comportement d'une communauté au cours de l'année (Singh, 1986; Mouat *et al.*, cité par Chuvieco, 1998).

Ces deux approches sont phénologiques. La phénologie est l'étude de la séquence des événements du cycle de vie des végétaux et des animaux, notamment en rapport avec les changements de saison et de climat. Dans le cas des cultures annuelles, l'observation des changements sur les images est relativement aisée. Les changements de réflectance de la lumière au cours de la croissance sont évidents et se produisent sur de brèves durées. Dans le cas des écosystèmes forestiers, les processus naturels, et les approches visant à les observer, sont prolongés. Le comportement d'un individu s'étend sur une longue période (de 5 à 25 ans), et la même règle s'applique aux plantations forestières qualifiées d'«écosystèmes

purs» (à savoir constituées de peuplements équiennes). Durant ce temps, on peut distinguer les phases allant de la plantation, de l'établissement des plants et de la croissance active jusqu'à celle de la maturité commerciale, au sein desquelles s'inscrit la dynamique plus complexe constituée par la floraison, la fructification, les mutations de feuilles et de branches et l'épaississement des troncs, au cours d'un processus constant de changement de la matière vivante présente au-dessus du sol, ou biomasse aérienne.

L'observation des processus phénologiques est plus compliquée dans un peuplement primaire ou naturel comprenant des individus d'âges et espèces différentes, où chaque exemplaire a son propre rythme ou comportement phénologique – floraison, fructification, perte de feuilles et de branches et repousse –, et sa stratégie de survie en termes de compétition pour la lumière, les nutriments et l'eau.

NDVI et phénologie

Il existe diverses méthodes permettant d'étudier les changements saisonniers de végétation à travers des images satellite, l'une d'entre elles consistant à appliquer des indices de végétation associés à l'intensité de vert (Chuvieco, 1998). Le NDVI est une mesure du bilan entre l'énergie reçue et l'énergie émise par les objets sur la Terre. Lorsqu'il est appliqué à des communautés végétales, cet indice établit une valeur mesurant

l'intensité de vert d'une zone donnée, c'est-à-dire indiquant la masse de végétation présente dans celle-ci, ainsi que son état de santé ou sa vigueur de croissance. Le NDVI est un indice sans dimension, aussi sa valeur est-elle comprise entre -1 et +1.

Dans la pratique, les valeurs situées en dessous de 0,1 correspondent aux étendues d'eau et aux sols nus, tandis que les valeurs plus élevées indiquent une forte activité de photosynthèse, propre aux terres arbustives, aux forêts tempérées, aux forêts humides et aux terres agricoles.

L'ÉTUDE

Contexte, séries de données

S'appuyant sur l'imagerie par téledétection et les enquêtes de terrain, l'étude visait à établir une relation entre le NDVI et la biomasse aérienne. Tout d'abord, des images devaient être recueillies. Ensuite, il fallait établir les valeurs du NDVI grâce à l'analyse de ces images. Puis ces valeurs devaient être appliquées à diverses formations végétales, à la fois pour valider la méthode et pour établir un scénario de référence pour les observations. Des observations ont ainsi été effectuées au cours du temps. Enfin, le NDVI a pu être corrélé à la biomasse aérienne – un indicateur de la santé des forêts –, au moyen de données de terrain. Cela a permis d'établir la validité de la méthode pour le suivi des forêts.

L'étude s'est concentrée sur le Mexique, dont les terres émergées s'élèvent à

TABLEAU 1. Classification des observations de terrain menées entre 2004 et 2007 et utilisées pour l'analyse du NDVI

Communauté végétale	Désignation de l'Institut national de statistiques et de géographie	Nombre de sites
Forêt de chêne vert	Chêne vert et chêne vert-pin	20 139
Forêt de pin	Pin, sapin, genévrier, cyprès, genévrier et pin-chêne vert avec prédominance de pin	6 276
Désert et dune	Terrain broussailleux désertique microphyllé	199
Mangrove	<i>Rhizophora</i> spp.	980
Terrain broussailleux	Divers types de terres broussailleuses	10 945
Forêt mésophile	Forêt de montagne très humide	1 526
Terres de parcours	Parcours naturels – présence de sodium et de craie	235
Forêt humide de haute et moyenne altitude	Forêt humide de haute et moyenne altitude (décidue ou persistante)	16 976
Forêt humide de basses-terres	Forêt humide de basses-terres (décidue ou persistante)	6 470
Joncs	<i>Thyphus</i> spp.	190
Sans couvert végétal	Sans couvert végétal	1 229

1
NDVI moyen par mois, pour les catégories de végétation établies

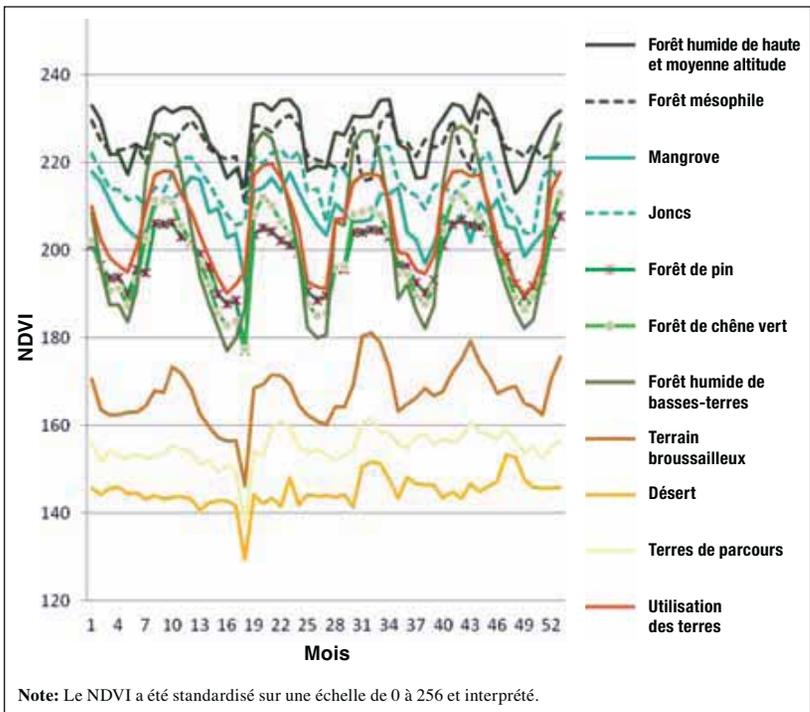
presque 2 millions de kilomètres carrés. Du fait de sa situation et de son relief particuliers, le pays présente une grande diversité d'écosystèmes et de zones écologiques, allant des zones tropicales aux zones tempérées. Les données utilisées pour l'étude comprenaient aussi bien des images satellite que des informations issues d'inventaires. Les images ont été obtenues grâce au spectroradiomètre imageur à résolution modérée (MODIS), un capteur présent à bord de deux satellites lancés par l'Administration nationale pour l'aéronautique et l'espace (NASA) des États-Unis d'Amérique, et qui est conçu pour fournir des mesures des dynamiques globales à grande échelle.

L'inventaire national des forêts et des sols (INFyS) du Mexique, entretenu par la Commission nationale des forêts (CONAFOR), a fourni les informations de base et les données de terrain pour les estimations. Les données de l'INFyS ont été collectées durant la période 2004-2007 et ont été mises à jour en 2008-2009.

Établir les valeurs du NDVI

En vue d'établir le comportement phénologique des écosystèmes boisés, on a analysé des composites d'images MODIS obtenues lors de mois non nuageux, avec une résolution spatiale de 500 m. Ces images ont été traitées par l'institut d'études informatiques avancées du Maryland – Institute for Advanced Computer Studies – (États-Unis d'Amérique). Cinquante-trois images composites, correspondant à 30 jours s'étalant entre le 16 novembre 2000 et le 13 août 2005, ont été examinées. Les valeurs du NDVI ont été calculées pour ces images.

Ensuite, il a fallu corrélérer les valeurs du NDVI aux types de végétation présents sur les divers sites. Les données issues de l'INFyS ont été obtenues à partir d'un échantillonnage stratifié systématique couvrant tous les écosystèmes du pays. Le type de communauté végétale assigné à une zone donnée indiquait la végétation la plus fréquemment observée sur le terrain pour chacun des sites étudiés. Les étiquettes employées pour cet



exercice se sont appuyées sur le système de classement de la carte de l'utilisation des terres et de la végétation adopté par l'Institut national de statistiques et de géographie mexicain dans sa Série II (INEGI, 2000). Au total, 65 165 sites ont été observés, comme on le voit dans le tableau 1.

Les sites étudiés ont été superposés sur la série de 53 images élaborées à partir des images composites MODIS mensuelles. Une valeur moyenne du NDVI a été calculée pour chaque mois et pour chaque type de communauté végétale, en vue d'en évaluer le comportement au cours de l'année.

Observations

Les valeurs de NDVI les plus élevées correspondent aux forêts humides de haute et moyenne altitude et aux forêts de montagne mésophiles, qui sont demeurées au-dessus du seuil de référence en terme d'intensité de vert tout au long de l'année (figure 1). Ce seuil a une valeur approximative de 190 (voir la note de la figure 1 relative aux valeurs du NDVI), et peut être associé à un écosystème à végétation persistante ou être employé pour distinguer les forêts des autres terres boisées.

Une tendance sinusoidale ou un comportement annuel cyclique constituent

une réponse classique à un cycle régulier de précipitations et de stockage de l'eau dans le sol. Les valeurs minimums du NDVI se situent entre février et avril chaque année, et correspondent à la période la plus sèche. Les valeurs maximums du NDVI se situent entre juillet et août, à savoir les mois où les précipitations sont les plus importantes. On observe aussi d'autres types de variations, dans la mesure où les dates de la saison des pluies varient selon la latitude et que le Mexique s'étend sur une distance considérable du nord au sud.

Les oscillations extrêmes montrent que les forêts humides de basses-terres ont le cycle de variation le plus accentué. À l'instar des forêts de chêne vert et des forêts de pin, leurs valeurs sont en dessous du seuil de référence de 190 entre février et mai au cours des années examinées. Les baisses de valeur du NDVI se produisent parce que le niveau d'intensité de vert correspondant à ces périodes est faible, du fait de la tombée ou du changement de couleur des feuilles.

Le lecteur doit garder à l'esprit que la valeur affichée est la réponse combinée de l'écosystème tout entier (sols et herbages, arbustes et couches d'arbres). Aussi peut-il arriver que durant cette période, à cause du stress hydrique

2 Comportement annuel du NDVI en saison sèche pour divers types d'écosystèmes

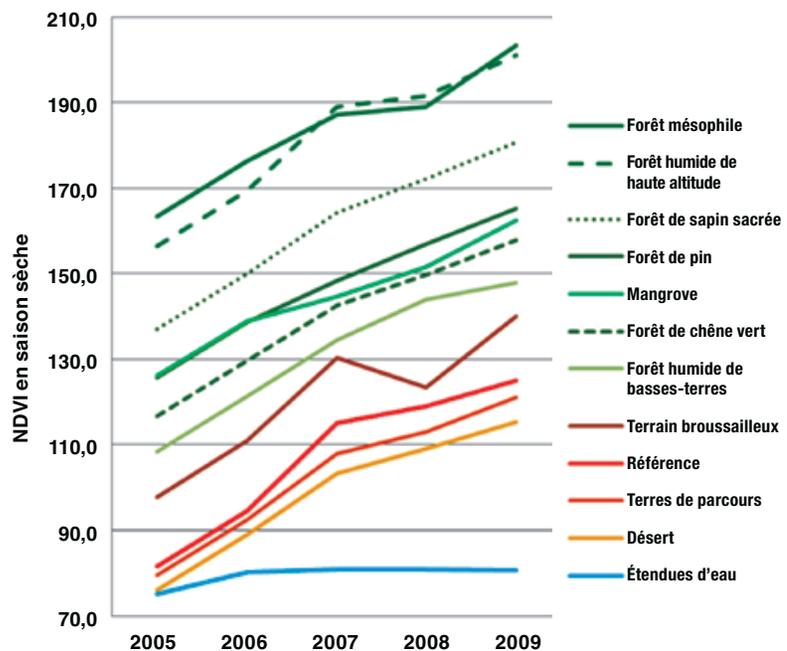
saisonnier, une partie des couches herbues s'assèche complètement dans ces forêts.

Les communautés végétales ayant les valeurs de NDVI les plus faibles sont les déserts, où les feuilles sont très clairsemées, suivis par les terres de parcours et les terrains broussailleux. Ces communautés ne présentent pas de tendance sinusoïdale, leur réponse apparaissant plutôt comme celle d'une région aux précipitations irrégulières. L'analyse des processus de dégradation dans ces formations est rendue plus compliquée par une telle fluctuation.

Les écosystèmes de mangrove et de joncs affichent un comportement extrêmement complexe en termes de valeurs du NDVI. Si ces dernières sont toujours au-dessus de la valeur de référence, elles ne suivent pas de schéma régulier, avec des pics clairement définis. Ces valeurs sont très fortement affectées par les fluctuations des niveaux hydriques.

L'échantillon comprenait une série de sites classés comme «utilisation des terres», une formulation qui correspond pour l'essentiel à une présence de l'agriculture. Ces zones montrent un comportement sinusoïdal légèrement plus étroit que celui des forêts humides de basses-terres. Les valeurs moyennes du NDVI de ces zones ne tombent jamais en dessous du seuil de référence. Ces valeurs constamment «vertes» sont difficiles à expliquer si l'on a affaire à des cultures annuelles et à une agriculture mécanisée; on pourrait en effet s'attendre à ce que, durant la période de préparation des sols, les valeurs soient proches de celles des sols nus. Le phénomène peut probablement être attribué au fait que ces terres sont cultivées sans qu'il y ait recours à aucun type de mécanisation.

L'exercice reflète le fait que, lorsque l'on mène une analyse multi-temporelle des processus, une considération importante concerne les dates auxquelles les images satellite sont prises. Il est essentiel de comparer des images correspondant aux mêmes dates, dans la mesure où la vigueur de croissance varie selon



Note: Le NDVI a été standardisé sur une échelle de 0 à 256 et interprété.

les divers mois de l'année, et que l'on observe des différences marquées entre saison sèche et saison des pluies – y compris dans les peuplements à végétation persistante.

Ce type d'analyse est en mesure de montrer les changements naturels advenant dans la végétation au cours d'une période donnée. Pour pouvoir l'appliquer à un propos tel que le suivi de la dégradation des forêts, il est nécessaire de séparer les fluctuations de l'intensité de vert résultant des oscillations naturelles de la végétation de celles causées par d'autres processus.

Le NDVI d'une année sur l'autre

L'étape suivante consistait à établir le comportement annuel du NDVI pour les diverses zones de végétation. La saison sèche a été choisie à cet effet, parce que la couverture nuageuse susceptible d'affecter les images MODIS y est moins importante et parce que les terres arables sont en générales nues, et se distinguent donc nettement durant cette période.

Un composite d'images MODIS a été élaboré avec une résolution spatiale de 250 m, en utilisant des images obtenues chaque année entre le 15 février et le 15 avril, durant la saison sèche. Les valeurs moyennes du NDVI ont été

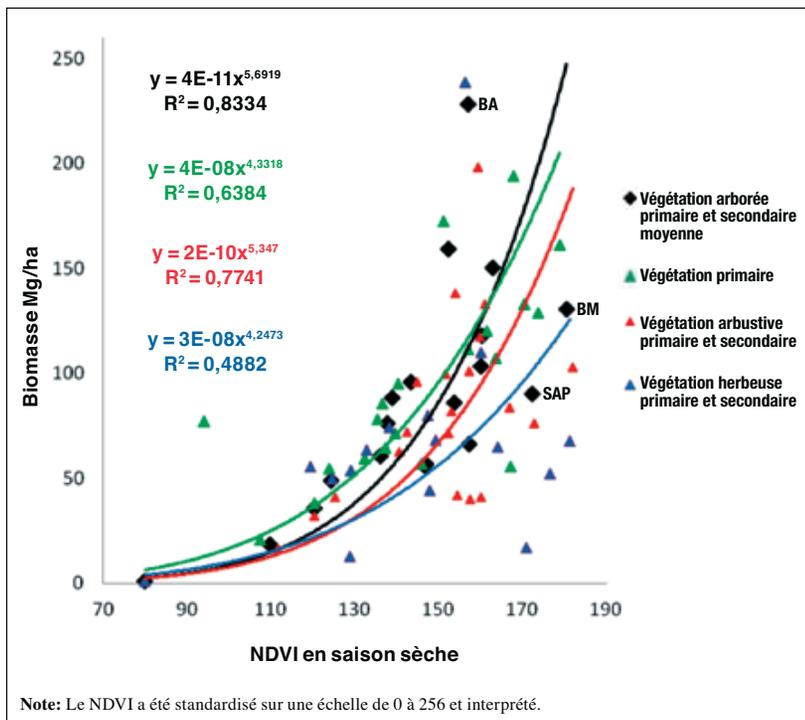
calculées pour cette période. Les points observés lors du tour précédent de l'étude ont été superposés, et le comportement moyen calculé pour chaque type de communauté végétale (figure 2).

On observe un schéma bien défini, lié au contenu de la biomasse des divers écosystèmes. Dans tous les types de végétation, on constate une augmentation presque constante du NDVI durant la période étudiée. Les exceptions concernent la forêt de montagne mésophile, la forêt humide de haute et moyenne altitude et les terrains broussailleux, qui ne présentent quasiment pas de fluctuation entre les saisons 2007 et 2008.

Liens avec la biomasse aérienne

La biomasse aérienne a été choisie comme indicateur des fonctions de la forêt, destiné à être comparé avec le comportement du NDVI. Une forêt peut en effet voir son couvert se modifier sans que cela représente nécessairement une perte par rapport à sa condition d'origine, tandis qu'un changement structurel négatif, susceptible d'affaiblir sa capacité de fournir des services et des produits, peut être considéré comme une forme de dégradation.

Vingt-cinq mille points ont été mesurés sur le terrain pour établir un inventaire. Chaque point de mesure, ou placette,



3
Comparaison entre le NDVI en saison sèche et le volume de la biomasse aérienne par type de communauté végétale

les 1 305 307 arbres observés, 1 230 127 individus ont été pris en considération (voir la figure 4; ECOSUR, 2009). Les 16 842 placettes ont été superposées aux images de NDVI et ont été classées à la fois selon le type de communauté végétale et selon la condition (primaire, primaire avec végétation arborée secondaire, et primaire avec végétation arbustive secondaire) (figure 3).

La relation entre la biomasse aérienne et le NDVI présente un comportement exponentiel, dû à la valeur du NDVI des étendues d'eau, pour lesquelles on suppose une biomasse aérienne égale à 0. Les valeurs les plus élevées en termes de biomasse correspondent à la forêt de sapin (BA), tandis que les valeurs du NDVI les plus élevées correspondent à la forêt de montagne mésophile (BM), suivie par la forêt humide de haute altitude (SAP). Pour estimer la biomasse aérienne des deux dernières formations, les équations générales suggérées dans les *Recommandations en matière de bonnes pratiques pour l'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie* du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ont été utilisées (GIEC, 2003). La relation d'ensemble affiche un coefficient de corrélation (R^2) de 0,8334.

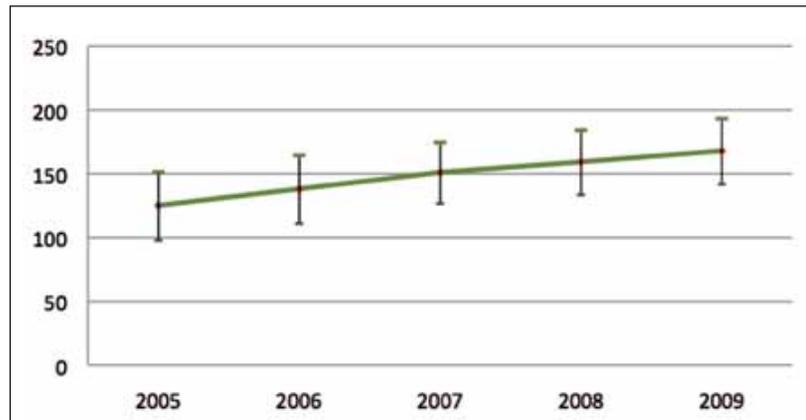
Il convient de remarquer que la morphologie des forêts humides et des forêts de montagne mésophiles diffère radicalement de la morphologie des forêts de conifères, et que ces forêts sont donc

comprenait quatre sites, ou sous-placettes. Sur chaque site, les mesures des variables ont été prises pour tous les arbres ayant un diamètre à hauteur de poitrine (dhp) supérieur à 7,5 cm. Ces variables comprenaient entre autres le nombre d'arbres, le nombre d'espèces, le nombre d'arbres vivants, le nombre de souches, la hauteur totale des arbres, la hauteur marchande, la hauteur libre, le diamètre à hauteur de poitrine et le diamètre du houppier et des surfaces terrières, ainsi que 21 autres variables quantitatives et quelque 45 variables qualitatives, liées par exemple à la régénération de la forêt, aux conditions des impacts, à l'état du sol de surface et de l'humus, et à l'utilisation des ressources (CONAFOR, 2011).

Le volume de la biomasse aérienne a été estimé – en tonnes par hectare – pour 16 842 placettes, mesurées sur le terrain pour l'établissement de l'inventaire national (ECOSUR, 2009). Des équations de biomasse ont été établies pour chaque écosystème, en s'appuyant sur la documentation existante. La plupart des équations ont été conçues à partir de matériel reflétant une perspective

commerciale, et ont trait aux écosystèmes de conifères et feuillus des régions tempérées.

Des équations allométriques ont été développées pour 120 des presque 3 000 espèces répertoriées dans l'INFyS. La plupart des modèles utilisent le diamètre à hauteur de poitrine et la hauteur en tant que variables indépendantes. Les informations issues de la mesure de la repousse n'ont pas été utilisées pour estimer la biomasse, les espèces de succulents de zone aride ont été omises, et certaines communautés (*Thalia*, savanes, joncs, palmiers, mangroves et certaines forêts humides) n'ont fait l'objet d'aucune équation évaluant la biomasse ou le volume de bois. Sur



4
Comportement général du NDVI, 2005-2009, d'après les échantillons à nouveau mesurés en 2009

sous-estimées dans le modèle. Cependant, le modèle produit par ailleurs un effet de «surestimation», dans la mesure où seuls les arbres ayant un diamètre à hauteur de poitrine supérieur à 7,5 cm sont pris en compte dans l'estimation de la biomasse, tandis que les mesures du NDVI par satellite considèrent l'ensemble de la réponse de l'écosystème (couches arborées, arbustives et herbeuses).

La figure 3 montre un déclin de la relation entre biomasse aérienne et NDVI, selon la condition ou les états successifs. Cette tendance indique que, dans une communauté végétale donnée, il y a plus de biomasse aérienne dans les écosystèmes primaires que dans ceux qui sont affectés par des perturbations.

SUIVI

Une initiative a été lancée en vue d'effectuer de nouvelles mesures sur les sites visités lors du premier tour. Les sites ont été revus en 2009 et le seront à nouveau en 2012. Ainsi, les informations sur la

croissance et l'évolution des fonctions des forêts continuent et continueront à être disponibles pour 20 pour cent des 25 000 placettes établies. Des informations sur les sols, les feux et la santé des forêts peuvent être estimées (interrogation de la base de données INFyS, 2010).

Lors de la première opération de mise à jour des mesures, on a pris en compte les valeurs du NDVI correspondant aux mesures de terrain de l'INFyS de 2009, et analysé aussi bien les points ayant subi quelque perturbation que ceux n'en ayant pas souffert.

Sur les 3 533 placettes mesurées en 2009, 3 486 indiquaient une augmentation du NDVI en regard de la mesure initiale. Le comportement général du NDVI est montré à la figure 4. Le comportement de catégories spécifiques de végétation a aussi été analysé.

L'encadré – de même que le tableau, la figure et les photographies qui l'illustrent – présente les données de l'un des points du groupe – la placette

56 890 – Campeche. Ce point faisait partie de ceux pris au hasard en vue de montrer en même temps la situation lors de la première et de la seconde mesure de terrain, et la manière dont le NDVI peut varier. Plus loin (figure 5), sont présentés les résultats pour un groupe – les terres sans couvert végétal. Il faudrait tenir compte du fait que les points mesurés sur le terrain ne permettent d'évaluer que 1 600 m² et ne sont représentatifs que de 1 hectare, alors que l'ensemble de la zone des pixels est de 6,25 hectares.

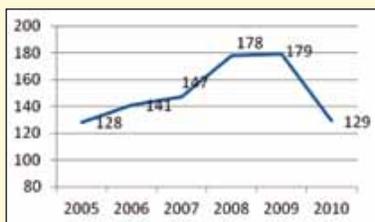
Sur les 3 533 placettes mesurées en 2009, 47 ont affiché une réduction du NDVI.

Dans l'échantillonnage de 2009, les placettes dont il a été reporté qu'elles étaient sans couvert végétal étaient au nombre de 258 (figure 5).

Au sein de ce groupe, quatre catégories ont été identifiées:

- 129 placettes n'ont pas été visitées lors du premier tour car elles

Suivi: placette 56 890 – Campeche



Comportement du NDVI, 2005-2010, placette 56 890

La placette 56 890 constituait un cas intéressant. Le NDVI en saison sèche, observé jusqu'en avril 2009, montrait que la placette avait récemment brûlé. Le comportement du NDVI sur quelques années a pu être identifié (figure), mais une analyse plus approfondie devra être effectuée.

En août 2005, la placette consistait en une forêt humide de moyenne altitude à feuilles quasi persistantes, et 192 arbres avaient été mesurés (photo de gauche). L'observation de 2009 montre une absence de couvert végétal et 0 individus (photo de droite, tableau).

Résultats d'enquête, placette 56 890 – Campeche

Visite	Nombre d'arbres	Dhp cm	Diamètre du houppier m	Couvert %	Hauteur totale m	Souches
09/08/2005	192	11,82	2,51	60,1	8,98	0
17/04/2009	0	0	0	0	0	0





5

Placettes signalées comme étant «sans couvert végétal» dans l'enquête de 2009, par cas

semblaient tomber dans la catégorie «utilisation des terres», ce qui avait été validé par l'interprétation des images; aucune réduction du NDVI n'a été relevée pour aucun de ces cas (points verts sur la carte).

- 53 placettes correspondaient à la catégorie «sans couvert végétal» en 2004-2007 et demeuraient telles en 2009; aucune réduction du NDVI n'a été relevée pour aucun de ces cas (points jaunes sur la carte).
- 61 placettes ont été étiquetées de façon incorrecte en 2004-2007. En effet, la présence de forêt avait été signalée, alors qu'un nouvel examen des photos et des données a permis d'indiquer que ces placettes étaient en réalité «sans couvert végétal»; aucune réduction du NDVI n'a été relevée pour aucun de ces cas (points rouges sur la carte).
- Pour 14 placettes, l'observation de 2004-2007 présentait un couvert végétal correspondant à quelque type de forêt, tandis que l'observation de 2009 montrait qu'elles étaient dénuées de couvert végétal (points bleus sur la carte).

CONCLUSIONS

Il existe certes des limites à l'utilisation du NDVI comme mesure de la dégradation des forêts, mais aussi des aires de perfectionnement possible. Dans la mesure où la phénologie joue un rôle important dans l'analyse des processus de changement, les dates des images MODIS employées pour évaluer ces processus doivent être sélectionnées très soigneusement. En matière de traitement des images, il convient de s'appliquer à éliminer les nuages, les ombres projetées par les nuages, les ombres créées par la topographie et les valeurs de saturation dans les nombres dues à la géométrie de l'observation du satellite ou à la présence d'eau sur les feuilles des arbres.

Les modèles de régression peuvent également être améliorés. L'un des moyens est de comparer deux mesures temporelles d'un point particulier de l'INFyS. Un autre moyen consiste à prendre en compte des facteurs tels que la repousse. L'INFyS contient d'autres variables mesurables, comme les arbres morts sur pied et les souches – qui permettraient une meilleure compréhension

de la dynamique de la forêt à chacun des points observés – ou, dans les formations de conifères, l'âge de la population examinée. La plupart des équations allométriques visant à estimer la biomasse aérienne s'appuient uniquement sur la taille de l'individu et le diamètre à hauteur de poitrine, tandis que des aspects tels que la couverture arborescente, le diamètre des branches et la surface terrière ne sont pas pris en compte. Au fur et à mesure que les estimations de la biomasse dans la forêt de montagne mésophile et les écosystèmes forestiers humides s'affineront, la méthode se révélera plus représentative du changement.

Il faudrait prêter attention à d'autres aspects tels que les anomalies climatiques ayant un impact majeur sur la vigueur de croissance. Par exemple, les années «humides» associées à des phénomènes tels que la Niña/el Niño conduiront à une augmentation du NDVI, tandis que les années «sèches»

généreront de très faibles valeurs de l'indicateur de changement.

Malgré les limites inhérentes à l'imagerie, notamment la résolution des images, et les limites de l'estimation de la biomasse aérienne, le modèle de régression de 0,83 est très satisfaisant. Les images générées par le capteur MODIS conviennent à l'analyse des changements résultant de la dégradation, lorsque l'impact a été suffisamment important pour se refléter dans la radiométrie, et donc dans le NDVI. Le NDVI a un comportement anticipé et peut par conséquent être utilisé comme indicateur. ◆



Références

- Chuvieco, E.** 1998. El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de Teledetección*, 10: 1–9.
- CONAFOR.** 2011. *Preliminary report of the National Forest and Soil Inventory, 2004–2009*. Zapopan, Mexique, Commission des forêts nationale.
- ECOSUR.** 2009. *Estimation of biomass for FRA 2010 tables*. Villahermosa, Mexique, Colegio de la Frontera Sur.
- GIEC.** 2003. *Recommandations en matière de bonnes pratiques pour l'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie*. Hayama, Japon, Institut des stratégies environnementales mondiales (IGES) pour le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (disponible aussi sur: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf_languages.html).
- INEGI.** 2000. *Land use and vegetation chart*. Aguascalientes, Mexique, Institut national de statistiques et de géographie.
- OIBT.** 2002. *Directives OIBT pour la restauration, l'aménagement et la réhabilitation des forêts tropicales dégradées et secondaires*. Série Développement de politiques OIBT n° 13. Yokohama, Japon, Organisation internationale des bois tropicaux (disponible aussi sur www.itto.int/policypapers_guidelines/).
- Singh, A.** 1986. Change detection in the tropical forest environment of northeastern India using Landsat. In: M.J. Eden et J.T. Parry, édés. *Remote sensing and tropical land management*, pp. 237–254. Chichester, John Wiley. ◆