

Réalité et contraintes d'un corridor biologique dans la zone centrale du Mexique

Antonio VILLANUEVA^{1,2}
Jacques IMBERNON¹

¹ Cirad
Umr Tetis
Campus international
de Baillarguet
34398 Montpellier Cedex 5
France

² AgroParisTech
École doctorale Abies
19, avenue du Maine
75732 Paris Cedex 15
France



Photo 1.
Forêt mixte d'oyamel, *Abies religiosa*, et pin, *Pinus* spp., dans le parc Nevado de Toluca au Mexique.
Photo A. Rees Catalán, 2013.

RÉSUMÉ

RÉALITÉ ET CONTRAINTES D'UN CORRIDOR BIOLOGIQUE DANS LA ZONE CENTRALE DU MEXIQUE

Le *Valle Central* (zone centrale) du Mexique est un espace prioritaire pour la conservation de la biodiversité du fait du haut degré d'endémisme des espèces de faune et de flore présentes. Dans cette zone où se situent plusieurs aires naturelles protégées, les autorités fédérales du Mexique envisagent la création d'un corridor biologique allant du parc Mariposa Monarca à celui du Popocatepetl. Or, le *Valle Central* fait l'objet de pressions anthropiques fortes qui sont dues aux activités minières et agricoles et à l'étalement urbain des grandes conurbations. Dans cet espace, ces pressions entraînent la fragmentation du couvert forestier et la diminution de la connectivité des écosystèmes naturels. L'étude présente une analyse à l'échelle régionale de la réalité du corridor biologique du *Valle Central* qui permettrait de relier les aires naturelles protégées. Dans un premier temps, la fragmentation du couvert forestier et arbustif a été quantifiée par des indices morphologiques issus de la théorie de l'écologie du paysage. Ensuite, un modèle de percolation est utilisé pour estimer la connectivité de ces espaces naturels et proposer une délimitation objective du corridor biologique. L'intérêt particulier de cette étude résulte de l'intégration de différents indices d'analyse du paysage révélant l'état réel du corridor biologique du *Valle central* du Mexique. L'étude met en évidence les espaces les plus sensibles pour la mise en œuvre et la durabilité de ce corridor, ce qui exigera des politiques publiques volontaristes et bien ciblées.

Mots-clés : corridor biologique, connectivité, fragmentation, pressions anthropiques, biodiversité, forêt, Mexique.

ABSTRACT

REALITY AND CONSTRAINTS OF A BIOLOGICAL CORRIDOR IN MEXICO'S CENTRAL VALLEY REGION

With its high level of species endemism, Mexico's Central Valley region is a priority zone for biodiversity conservation. The region comprises several protected natural areas, and Mexico's federal authorities are considering the creation of a "biological corridor" extending from the Mariposa Monarca Park to the Popocatepetl Park. However, the Central Valley landscape is severely affected by human pressures, particularly from mining, agricultural expansion and urban sprawl around large conurbations. These pressures are causing forest fragmentation and breaking up connectivity between natural ecosystems. This study analyses the reality of the biological corridor linking the protected natural areas of the Central Valley. First, forest fragmentation in this area was quantified using morphological indices derived from "landscape ecology" theory. A model of percolation was then applied to estimate connectivity between these natural ecosystems and to propose objectively defined boundaries for the biological corridor. Of particular interest in this study was the integration of different landscape indicators to show the actual condition of the "biological corridor" in Mexico's Central Valley. The study was thus able to identify several "hot-spots" crucial to the long-term sustainability of the corridor, which will demand proactive and well-targeted public policies.

Keywords: biological corridor, connectivity, fragmentation, human pressures, biodiversity, forest, Mexico.

RESUMEN

REALIDAD Y DIFICULTADES DE UN CORREDOR BIOLÓGICO EN LA ZONA CENTRAL DE MÉXICO.

El Valle Central (zona central) de México es un espacio prioritario para la conservación de la biodiversidad debido al alto grado de endemismo de especies de fauna y flora presentes. En esta zona, donde se sitúan varias áreas naturales protegidas, las autoridades federales de México prevén la creación de un corredor biológico desde el Parque Mariposa Monarca hasta al del Popocatepetl. El Valle central es objeto de fuertes presiones antrópicas que están ligadas a las actividades mineras y agrícolas que se desarrollan, como también al crecimiento urbano de las grandes conurbaciones. Estas presiones están fragmentando la cobertura forestal y provocando una disminución de la conectividad de los ecosistemas naturales en este espacio. El estudio presenta un análisis a escala regional de la realidad del corredor biológico del Valle Central que permite conectar las Áreas Naturales Protegidas. La fragmentación de la cobertura forestal y arbustiva ha sido cuantificada a través de índices espaciales de la teoría de la Ecología del Paisaje. Luego, un modelo de percolación ha permitido estimar la conectividad de sus espacios naturales y proponer una delimitación para el corredor biológico. El interés particular de este estudio es el de integrar diferentes índices de análisis del paisaje para describir el estado global del corredor biológico del valle central de México. El estudio de este corredor pone en evidencia los espacios cruciales más sensibles para llevar a cabo la delimitación sostenible de este corredor en el Valle Central, lo que exigirá políticas públicas específicas y determinantes.

Palabras clave: corredor biológico, conectividad, fragmentación, presiones antrópicas, biodiversidad, bosque, México.

Contexte de l'étude et objectif

Dans le *Valle Central* du Mexique, les aires naturelles protégées sont nombreuses et constituent une réserve forestière importante. Ces espaces sont protégés par décret de toute activité humaine. Dans la réalité, cette protection n'est pas totalement efficace, et les pressions anthropiques à la périphérie immédiate et dans les aires naturelles protégées elles-mêmes sont importantes (PUIG, 2001 ; MAASS *et al.*, 2006 ; BRENNER *et al.*, 2006). Ces pressions sont amplifiées par la proximité de deux grandes métropoles, Mexico D.F. et Toluca.

Les travaux scientifiques menés sur l'impact des activités humaines sur les espaces forestiers dans le *Valle Central* et sur leur connectivité sont rares et peu détaillés, alors que l'État fédéral mexicain affirme aujourd'hui sa volonté de créer un corridor biologique reliant ces aires naturelles protégées (CONAP, 2013). Cette étude¹ a pour objectif de produire des connaissances sur l'état de la fragmentation et sur la connectivité de ces écosystèmes naturels.

Divers travaux ont été conduits sur des corridors biologiques en Amérique latine. L'initiative la plus importante est le Corridor biologique mésoaméricain. Mais il ne prend en compte que le Sud du Mexique (Chiapas, Campeche, Yucatán et Quintana Roo). Ce corridor couvre un grand nombre d'aires naturelles et culturelles inscrites au patrimoine mondial et de réserves de la biosphère (ECCARDI, 2003 ; IEG, 2011). Il existe aussi quelques recherches réalisées spécifiquement sur les parcs mexicains, mais en général ces travaux ne traitent pas de la connectivité et de la fragmentation entre les parcs de l'axe volcanique central du Mexique. Les recherches menées sur la fragmentation et la connectivité des habitats dans cette région le sont à une échelle locale, au niveau des parcs eux-mêmes (EDARA AGRAMONT *et al.*, 2012 ; SUZÁN-AZPIRI *et al.*, 2011 ; CRUZ-BELLO, SOTELO-RUIZ, 2013).

Pour cette étude, la théorie de l'écologie du paysage est mobilisée de manière à intégrer à la fois la géographie et l'écologie, et à relier l'analyse des structures spatiales, objets de la géographie, aux processus écologiques (DAJOZ, 1996 ; BUREL, BAUDRY, 1999). Ce concept d'écologie du paysage est ancien (TROLL, 1939), mais il présente l'avantage d'avoir été théorisé et instrumentalisé dans les années 1980 (FORMAN, 1995 ; MAKHDOUN, 2008). De nos jours, des outils logiciels performants permettent de quantifier des indicateurs de structure, d'organisation ou de dynamique des paysages et de réduire la part de subjectivité de l'analyse.

L'innovation de cet article réside dans la manière de délimiter un corridor biologique dans un espace régional en utilisant un modèle de « percolation » qui, par similitude avec la dynamique de l'eau dans les milieux poreux, identifie les connexions entre les habitats naturels. L'utilisation conjointe des théories de l'écologie du paysage et du modèle de percolation permet d'identifier objectivement la réalité et les contraintes de ce corridor biologique et, ainsi, d'alimenter les débats sur les politiques publiques à mettre en place dans cette région pour la protection des écosystèmes.

Zone d'étude et données utilisées

La zone d'étude est située au centre du Mexique et inclut les parcs Nevado de Toluca, Mariposa Monarca, Popocatepetl, ainsi que le corridor biologique Chichinautzí et la réserve de biosphère Sierra Huautla (figure 1). Elle couvre une surface d'environ 330 000 hectares. Cette zone est à cheval sur les États de Mexico, Morelos et Guerrero, et sur le « District fédéral » qui correspond à l'agglomération de la ville de Mexico. De fait, cette zone est très peuplée et le recensement de 2010 donnait 29 192 937 habitants, soit 26 % de la population totale du pays (SEMARNAT, 2010, 2012 ; INEGI, 2010).

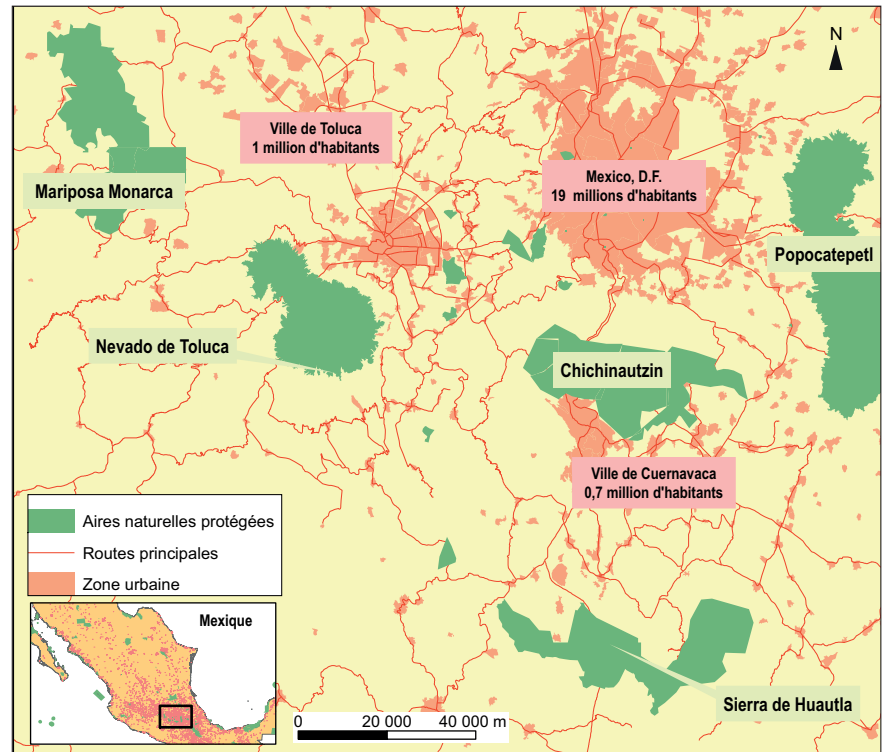


Figure 1.

Zone d'étude dans le *Valle Central* du Mexique.

Source : conception par les auteurs, d'après la carte des aires naturelles protégées du Mexique (CONABIO, 2012) et la carte d'occupation des terres du Mexique (CONABIO, 2005).

Toutes les cartes sont en projection conique conforme de Lambert et Datum (1984).

¹ Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet de recherche « Selina » soutenu par l'Anr-France et le Conacyt-Mexique et Ecos-Nord.

Tableau I.
Description des classes simplifiées d'occupation des terres.

Classe	Description
1. Bâti	Espaces dominés par des bâtiments et résidences, des zones industrielles ou commerciales.
2. Forêt	Formations végétales principalement constituées par des arbres (conifères tempérés, latifoliées à feuilles caduques tempérées, latifoliées à feuilles caduques tropicales ou subtropicales et forêts mixtes). Les espèces oyamel, <i>Abies religiosa</i> , cèdre, <i>Cedrela odorata</i> , et pin, <i>Pinus</i> spp., représentent 66 % de la forêt dans le parc Nevado de Toluca (photo 1).
3. Végétation arbustive et herbacée	Arbustes, plantes à fleurs, fougères et ligneux sous-arbustifs : <i>matorral</i> tempéré, <i>matorral</i> tropical ou subtropical). Les espèces les plus représentées sont <i>Alnus firmifolia</i> , <i>Arbustus glandulosa</i> , <i>Arbustus xalapensis</i> , <i>Alnus acaminata</i> , <i>Quercus barbinervis</i> , <i>Cupressus lindleyi</i> .
4. Sols nus et espaces urbains non bâtis	Espaces ouverts non bâtis et sans végétation.
5. Plans d'eau	Étendues d'eau, naturelles ou artificielles.
6. Agriculture	Espaces occupés par des cultures ou des prairies.

Source : conception par les auteurs d'après la carte d'occupation des terres du Mexique (CONABIO, 2010).

Pour réaliser l'évaluation quantitative de la fragmentation et de la connectivité du couvert forestier, la carte d'occupation des terres réalisée par la Commission nationale pour la biodiversité du Mexique (CONABIO, 2010) est utilisée. La nomenclature initiale de cette carte comporte treize types différents d'occupation des terres dans la zone d'étude et son échelle est de 1/250 000. Certes cette échelle spatiale est peu détaillée pour des analyses locales et précises, mais elle permet de traiter l'ensemble de la région avec un jeu de données homogène.

Pour faciliter l'analyse de la fragmentation, cette carte d'occupation des terres est simplifiée en six grandes classes d'occupation des terres : bâti, forêt, végétation arbustive, sols nus, agriculture et plans d'eau (tableau I, figure 2).

Choix des indicateurs de fragmentation du couvert forestier

Les pressions anthropiques qui s'exercent sur les forêts augmentent leur fragmentation et diminuent leur connectivité (DAJOZ, 1996). La fragmentation est donc un processus dynamique qui a un impact sur la structure du paysage et sur les habitats naturels (CLERGEAU, DÉSIRÉ, 1999 ; FORMAN, GORDON, 1986). Pour quantifier la fragmentation des paysages, cinq types d'indicateurs sont disponibles (MCGARRIGAL, CUSHMAN, 2002 ; BOTEQUILA *et al.*, 2006 ; VILA SUBIROS *et al.*, 2006) : des indicateurs de surface, de forme, d'habitat intérieur, de diversité ou de distance.

Ces indicateurs peuvent être calculés au moyen de différents logiciels qui sont libres d'accès sur Internet : Grass, V-Late, Patch Analyst et Fragstats (HAINES-YOUNG *et al.*, 1993 ; VILA SUBIROS *et al.*, 2006). Pour cette étude, il a été nécessaire d'utiliser le logiciel libre le plus complet et le plus largement en usage en écologie du paysage : Fragstats 4.0².

Le choix des indicateurs (tableau II) a été réalisé en fonction de notre objectif d'évaluation de la fragmentation, mais aussi de leur simplicité à interpréter.

Ces trois indicateurs simples ont d'ailleurs été déjà utilisés dans de nombreuses études et ont montré leur intérêt (IMBERNON *et al.*, 2005 ; SKUPINSKI *et al.*, 2009).

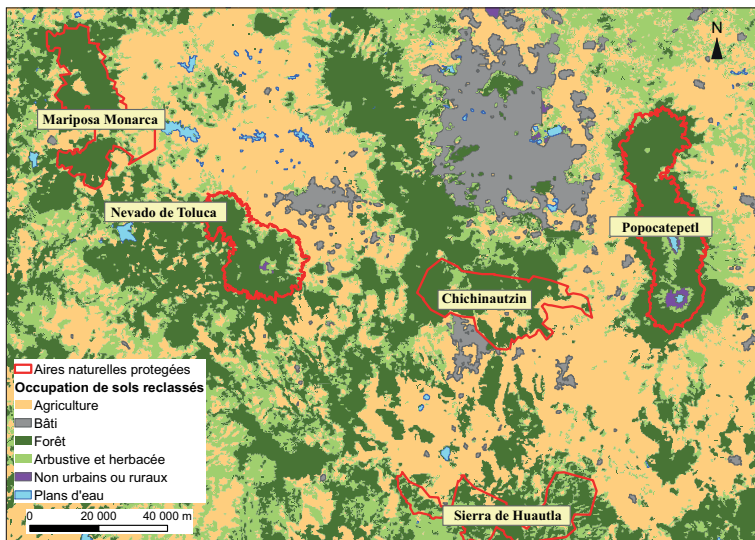


Figure 2.
Carte simplifiée de l'occupation des terres dans le Valle Central du Mexique.

Source : conception par les auteurs d'après la carte d'occupation des terres du Mexique (CONABIO, 2005).

² Site de téléchargement du logiciel Fragstats : http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/downloads/fragstats_downloads.html

Tableau II.
Les indicateurs de fragmentation du paysage.

Indice	Description	Valeur
PLAND	Pourcentage de la surface de la classe dans le paysage.	$0 \leq \text{PLAND} \leq 100$
LPI	Pourcentage de la part du patch le plus vaste de chaque classe dans le paysage.	$0 \leq \text{LPI} \leq 100$
PDEN	Nombre de patches par 100 hectares	$\text{PDEN} \geq 0$

Modélisation de la connectivité du couvert forestier

Pourcentage de la surface de la classe dans le paysage (PLAND)

Cet indice quantifie la composition du paysage. Il approche 0 quand la classe est très peu présente dans le paysage et il est égal à 100 lorsque l'ensemble du paysage est occupé par cette classe.

$$\text{PLAND}_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} (100)$$

Avec :

N, nombre total de patches de la classe i ;

a_{ij} , surface du patch j de la classe i ;

A, surface totale du paysage.

Indice de plus grand patch (LPI)

Cet indice quantifie la dominance d'un patch dans une classe du paysage par rapport aux autres, en calculant la part du patch le plus vaste de chaque classe dans le paysage.

$$\text{LPI}_i = \frac{\max_{j=1}^n (a_{ij})}{A} (100)$$

Avec :

N, nombre total de patches de la classe i ;

a_{ij} , surface du patch j de la classe i ;

A, surface totale du paysage.

Densité des patches (PDEN)

Cet indice de densité des patches quantifie le nombre de patches de chaque classe dans le paysage rapporté à la superficie totale du paysage. Il est directement lié à l'état de la fragmentation de chaque classe.

$$\text{PDEN}_i = \frac{n}{A}$$

Avec :

n, nombre total de patches de la classe i ;

A, superficie totale du paysage.

Plus les patches de forêt sont éloignés les uns des autres, plus la connectivité de l'espace forestier est faible (BENNET *et al.*, 1994). Or c'est cette connectivité qui permet le déplacement de populations et maintient la biodiversité génétique. Pour assurer la conservation de la biodiversité, le concept de corridor biologique (parfois appelé écologique) a été fréquemment utilisé (BLANC-PAMARD, RAKOTO-RAMIARANTSOA, 2008). Un corridor biologique peut être défini par « un ensemble d'éléments du paysage qui permettent la circulation des espèces végétales et animales et relient les réserves de biodiversité » (CLERGEAU, DÉSIÉ, 1999). Quatre types de corridors sont le plus souvent différenciés : corridors linéaires, corridors de bandes, corridors de cours d'eau et corridors en réseau. C'est un corridor en réseau qu'on a tenté de mettre en évidence dans cette zone d'étude où l'on cherche à connecter cinq aires naturelles protégées entre elles.

Si certains indicateurs issus de la théorie de l'écologie du paysage permettent d'évaluer la connectivité, aucun ne permet vraiment de délimiter spatialement les corridors. Le modèle mathématique de percolation (BROADBENT, HAMMERSLEY, 1957), issu de travaux en dynamique des fluides en milieux poreux, permet d'identifier les corridors. Ce modèle évalue la probabilité qu'un être vivant se déplace dans l'espace entre des « cellules » en fonction de la proportion de son habitat dans chacune des cellules. Si la proportion de son habitat atteint ou dépasse le seuil de 0,59, alors la percolation (le déplacement) a lieu (WITH, CRIST, 1995 ; BUNN *et al.*, 2000 ; DECAMPS, DECAMPS, 2007 ; BEN AMOR, BUI, 2009 ; BEN AMOR *et al.*, 2006). En dessous de ce seuil, cet être vivant reste confiné dans le patch où il se situe, sans pouvoir se déplacer.

Ce modèle de percolation est illustré sur les deux grilles A et B de la figure 3 représentant deux types de paysage, avec en foncé l'habitat favorable à un individu pour se déplacer d'un point 1 à un point 2. Dans le paysage B, où le seuil de percolation est inférieur à 59 %, l'individu ne peut pas se déplacer d'un point à l'autre. Dans le paysage A, le nombre de pixels foncés correspondant à l'habitat de cet individu est plus important et le seuil de percolation dépasse 59 % : l'individu peut alors se déplacer d'un point à l'autre. Ce modèle de percolation permet, de plus, d'identifier des habitats connectés mais isolés, qui n'aboutissent nulle part, appelés alors des « bras morts » (LAST, THOULESS, 1971).

Ce modèle a été appliqué à l'ensemble de la zone d'étude du *Valle Central* pour délimiter le corridor biologique en réseau qui relie les écosystèmes naturels, forestiers et arbustifs. Pour appliquer ce modèle, la carte d'occupation des terres a été numérisée sous forme de pixels avec une résolution de deux kilomètres de côté. Pour chaque cellule, le seuil de percolation des écosystèmes naturels a été calculé à partir de la surface de l'habitat forestier et arbustif de la cellule :

$$pc = \frac{Y_j}{X_j}$$

Avec :

pc , seuil de percolation ;

Y_j , surface de l'habitat forestier et arbustif de chaque cellule j ;

X_j , surface totale de chaque cellule j .

Résultats et discussion

Bien que des travaux en analyse spatiale aient été menés en Amérique latine et dans le Sud de l'Amérique centrale, les résultats obtenus à l'aide du modèle de percolation semblent être les premiers publiés se rapportant à la connectivité des zones naturelles existant entre les parcs mexicains.

Ainsi, l'analyse des cellules transformées par le modèle de percolation, c'est-à-dire révélant où les habitats naturels sont connectés, permet de produire la carte des espaces naturels connectés. L'espace ainsi connecté représente 31 834 km², soit 50,5 % de la surface totale de la zone d'étude (figure 4). Mais des bras morts subsistent qui ne sont pas connectés au réseau de corridors et qui ne mènent nulle part. En supprimant ces bras morts, la surface du réseau de corridors est alors de 27 708 km², soit 44,5 % de la surface totale (figure 5). C'est cette proposition de corridor qui est retenue par la suite.

L'espace situé hors de ce réseau de corridors est occupé par l'agriculture (69 %) et les zones urbanisées (7 %). Dans cet espace non connecté, le couvert forestier et arbustif reste relativement important et représente encore 23,6 % de la superficie (tableau III). Ces reliquats forestiers mériteraient certainement une analyse détaillée de leur biodiversité et de leur dynamique spatiale, à une échelle beaucoup plus fine que l'échelle régionale.

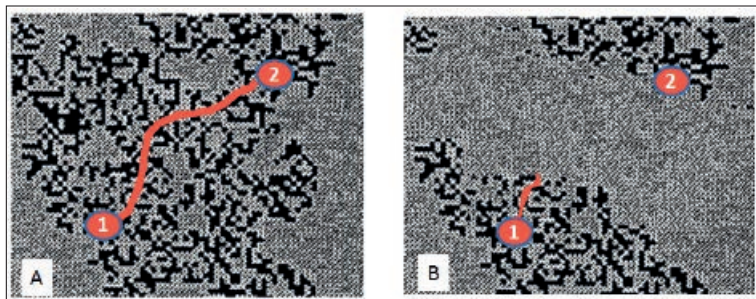


Figure 3.

Illustration du modèle de percolation entre un point 1 et un point 2 selon la densité d'habitat favorable.
Source : d'après BUREL et BAUDRY (1999).

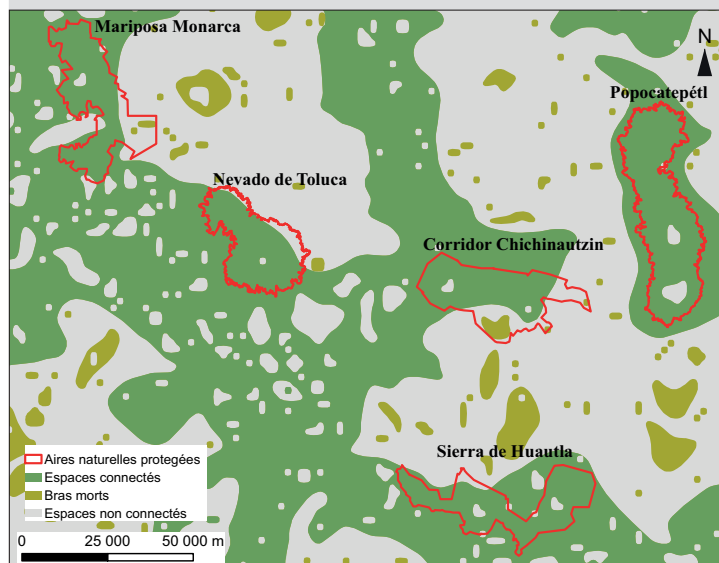


Figure 4.

Les espaces forestiers connectés par le modèle de percolation.



Figure 5.

Le réseau de corridors biologiques du *Valle Central*.

Cette modélisation du corridor biologique met aussi en évidence des barrières à la connectivité dans le *Valle Central*. C'est le cas en particulier de l'espace situé entre le réseau de corridors et le parc national Popocatepétl, qui ne permet pas la connectivité entre les deux. Cet espace devrait attirer l'attention des autorités mexicaines, et nécessiterait une politique volontariste de reboisements pour rattacher ce parc au reste du corridor du *Valle Central*.

Ce corridor biologique dans le *Valle Central* est donc une réalité ; mais c'est une réalité fragile, car le corridor est soumis à de multiples pressions anthropiques. Le parc Nevado de Toluca, qui se trouve au centre du corridor biologique, illustre l'importance de ces pressions : extraction le plus souvent illégale de graviers et de sables (photo 2), développement de l'horticole sous serre (photo 3), pratiques agri-

Tableau III.
Occupation des terres dans les espaces non connectés.

Classe	Surface (km ²)	Proportion (%)
Bâti	2 096	6,80
Agriculture	19 020	61,69
Forêt	4 157	13,48
Végétation arbustive et herbacée	5 165	16,75
Espaces nus urbains ou ruraux	38	0,13
Plans d'eau	355	1,15
Total	30 831	100



Photo 2.
Activité extractive de sable en bordure de forêt, *matorral* au premier plan, dans le secteur Nord-Est du parc Nevado de Toluca.
Photo J. Imbernon, 2013.



Photo 3.
Floriculture sous serre dans le secteur Sud du parc Nevado de Toluca.
Photo J. Imbernon, 2013.

coles à la périphérie liées essentiellement à la culture de pomme de terre (photo 4) ou pression foncière exercée par la ville de Toluca toute proche. Ces pressions risquent d'isoler le parc du reste des écosystèmes forestiers de la région et pourraient avoir des impacts négatifs sur l'habitat des espèces locales. De plus, autour du parc Nevado de Toluca, les routes constituent des barrières à la connectivité et traversent le réseau de corridors (figure 6). Toutes ces pressions anthropiques autour du parc Nevado de Toluca constituent donc un risque important pour le corridor du *Valle Central*.

Pour analyser la pression qui s'exerce dans ce corridor biologique, sa fragmentation a été quantifiée à l'aide des indicateurs PLAND, LPI et PDEN. Le pourcentage de la surface de la classe dans le paysage (PLAND), qui quantifie la composition du paysage, illustre l'importance de la couverture forestière dans le corridor (plus de 50 % de forêts) et le rôle majeur des aires naturelles protégées de cette zone dans la conservation des habitats (figure 7). Mais, à l'exception du parc Popocatepetl où les forêts et les formations arbustives représentent presque 100 % de la superficie, toutes les aires naturelles protégées sont aussi le lieu d'activités agricoles qui peuvent représenter jusqu'à 20 % de la superficie (cas du corridor biologique Chichinautzli). Dans le corridor lui-même, les espaces de végétation arbustive (*matorral*, encadré I) sont relativement présents et occupent environ 20 % du corridor.

Encadré I.

Le *matorral*, un espace naturel fragilisé par l'anthropisation, entre forêts arbustives buissonnantes et épineuses xérophiles et steppes subdésertiques.

Le terme *matorral* (se traduisant par buisson) désigne des formations végétales buissonnantes d'aspect divers. Il peut être qualifié de fourré épineux ou steppe subdésertique suivant l'ouverture de la formation (SCHNELL, 1987). Le *matorral* mexicain à *Yucca* et Cactacées peut prendre une physionomie très particulière. PUIG (1973) distingue quatre formes de *matorral* parmi les formations semi-arides : la steppe subdésertique microphyllle, la steppe subdésertique rosettophyllle, le fourré succulent avec des Cactacées, le fourré épineux à arbustes caducifoliés. SCHNELL (1987) englobe ces quatre formations dans les formations arborescentes et arbustives épineuses. Il pourrait s'agir d'une végétation ayant remplacé une forêt décidue. MIRANDA et HERNÁNDEZ XOLOCOTZI (1963) ont créé une terminologie détaillée, comprenant la physionomie et l'élément floristique dominant.

Cette végétation arbustive occupe quasiment 30 % du Mexique. Elle fait donc partie du paysage mexicain. Le *matorral* peut prendre diverses formes : *matorral* xérophile, *matorral* épineux, *matorral* à petites feuilles, « magueyales », « chaparrales ». Sur l'axe volcanique central du Mexique où se situe le parc Nevado de Toluca, il s'agit le plus souvent d'un *matorral* subtropical secondaire, dominé par palo blanco, *Ipomoea arborescens*, tabachín, *Caesalpinia pulcherrima*, tepame, *Acacia pennatula*, ocotillo macho, *Fouquieria macdougalii*, et des cactus comme pitahaya, *Stenocereus thurberi*. Cette végétation fournit de nombreux services environnementaux : régulation des éléments minéraux, pollinisation, habitats, refuge d'espèces endémiques, production d'aliments, de combustibles, de textiles, de remèdes médicinaux et de plantes ornementales.

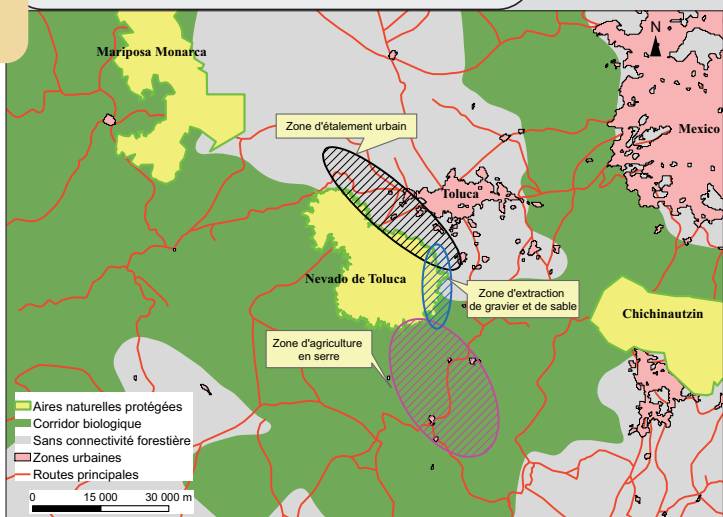


Figure 6.
Les pressions anthropiques sur le parc Nevado de Toluca qui menacent la connectivité du corridor biologique.

L'indice de plus grand patch (LPI) représente le pourcentage de surface du patch le plus grand par classe et il traduit la fragmentation du paysage. Il indique en particulier que les patches de forêt dans le corridor biologique sont plus petits que dans les aires naturelles protégées et qu'elle y est plus fragmentée. Plus surprenant est le fait que les patches d'agriculture soient plus grands dans ces aires naturelles que dans le corridor lui-même où l'espace agricole reste relativement plus fragmenté.

Enfin l'indice de densité des patches (PDEN) montre que la fragmentation forestière des aires naturelles est inférieure à la fragmentation forestière du corridor biologique, à l'exception de l'aire naturelle protégée Sierras de Huautla (figure 8). Les indicateurs de fragmentation sont plus élevés pour les espaces occupés par la végétation arbustive et sont plus exposés aux pressions anthropiques que les espaces forestiers eux-mêmes.

En ce qui concerne la fragmentation et la connectivité forestière, il existe bien une forte différenciation entre les aires naturelles protégées et le réseau de corridors. Mais en fait, la pression exercée par les activités humaines sur les espaces forestiers de cette région du *Valle Central* est si intense qu'elle

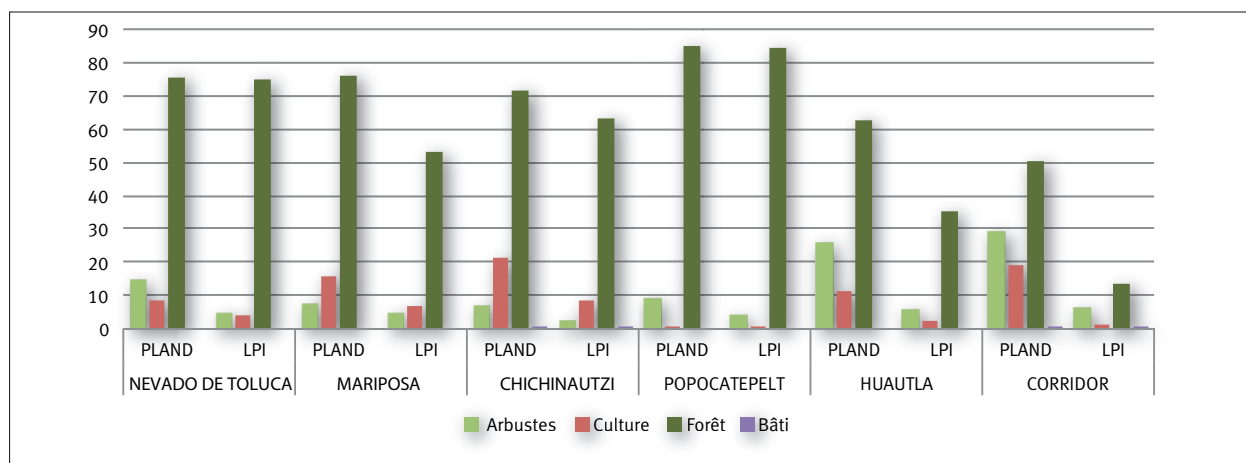


Figure 7.
Indicateurs de fragmentation PLAND et LPI dans les aires naturelles protégées et dans le corridor biologique.

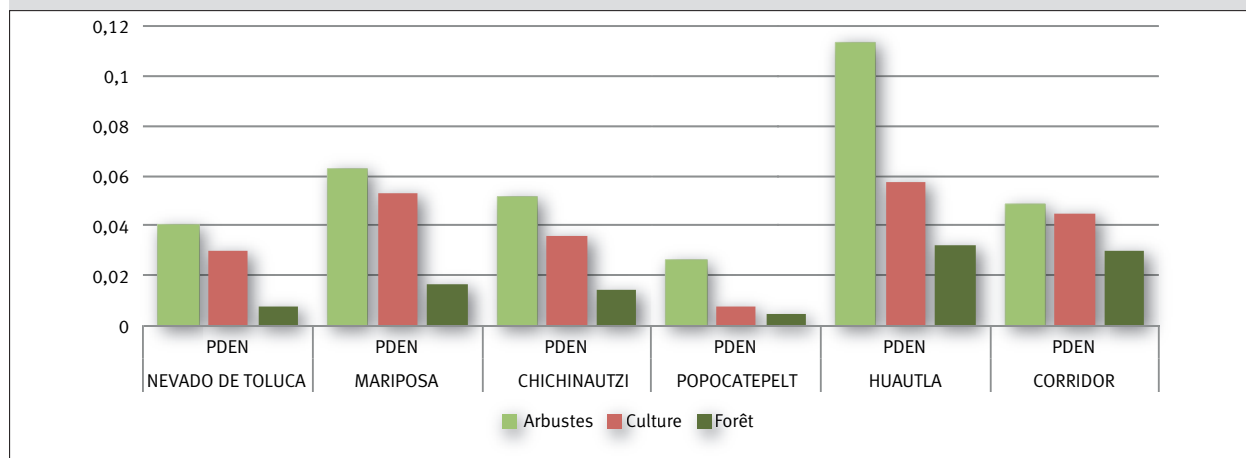


Figure 8.
Indicateur de fragmentation PDEN dans les aires naturelles protégées et dans le corridor biologique.

menace la connectivité du corridor lui-même. Au sein de ce corridor biologique, identifié et délimité, les aires naturelles protégées jouent un rôle essentiel pour maintenir la connectivité et leur protection est indispensable ; mais des efforts sont aussi à consentir dans les espaces qui relient ces aires naturelles entre elles pour assurer la connectivité des habitats. En particulier, la continuité de ce corridor biologique avec le parc du Popocatepétl va sans doute imposer des politiques publiques environnementales volontaristes. C'est bien le rôle de la végétation arbustive, le *matorral*, qui s'avère primordial pour assurer au mieux la connectivité des écosystèmes. Certes, ce type de végétation représente une valeur plus faible que les forêts en termes de production de biomasse, de séquestration du carbone ou de signification symbolique et culturelle, mais sa disparition entraînerait de nouveaux écueils vis-à-vis du corridor du *Valle Central*.

Conclusion

La modélisation de la connectivité des habitats naturels dans le *Valle Central* du Mexique permet de confirmer de facto l'existence d'un corridor biologique. Mais ce corridor se trouve soumis à une intense activité humaine qui menace l'équilibre de ces écosystèmes naturels.

Sans conteste, l'agriculture représente la plus forte pression anthropique pour le corridor biologique du *Valle Central*. Son impact pourrait être atténué au cas où seraient mises en œuvre de meilleures pratiques agricoles en adéquation avec les exigences requises par les écosystèmes naturels. Mais l'agriculture n'est pas la seule pression exercée sur ce corridor : l'étalement urbain et l'exploitation minière constituent

aussi d'autres épées de Damoclès menaçant la conservation et la protection des espaces naturels.

L'application d'un modèle de percolation pour identifier et délimiter spatialement le corridor biologique du *Valle Central* s'avère une méthode innovante, pertinente et facile à mettre en œuvre. Parmi les aires naturelles protégées qui constituent l'ossature du corridor du *Valle Central* identifié, le parc Popocatepétl, peu fragmenté et en principe assez bien conservé, apparaît malencontreusement être déconnecté du reste du corridor biologique. Le fait de le connecter au corridor constituera un enjeu majeur imposant des politiques volontaristes de reboisement et de protection de l'espace intermédiaire fortement anthropisé.

Les espaces naturels arbustifs (le *matorral*) sont très présents dans ce corridor biologique, et jouent un rôle important dans la connexion des écosystèmes ; mais ils apparaissent fortement fragmentés. Ce sont, sans conteste, les écosystèmes les plus fragiles de ce corridor face aux pressions anthropiques exercées par l'agriculture, l'urbanisation et les exploitations minières, c'est pourquoi une attention particulière devrait être accordée à ces formations végétales.

D'une manière générale, cette étude met en évidence que le concept de corridor biologique est une approche efficace pour définir des priorités de gestion et de conservation des écosystèmes naturels de cette région du *Valle Central* du Mexique. Les résultats obtenus sont certes liés à l'échelle spatiale et à la précision de la carte d'utilisation des sols mise à profit. Une analyse plus fine de la connectivité et de la fragmentation du corridor, à des échelles détaillées est à présent essentielle pour élaborer des politiques publiques et des plans d'actions devant prendre en compte les services environnementaux que fournissent les écosystèmes naturels et en particulier ce corridor biologique.



Photo 4.
Pratiques agricoles à la périphérie Est et Ouest du parc Nevado de Toluca.
Photo A. Rees Catalán, 2013.

Références bibliographiques

- BEN AMOR S. B., BUI M., LAVALLÉE I., 2006. Complexité, percolation et optimisation stochastique. 7^e congrès de la Société française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision (ROA-DEF07), Lille, France.
- BEN AMOR S., BUI M., 2009. Généralisation des processus de percolation discrets. *Informatica Universalis*, 7 (1) : 79-93.
- BENNET F., HENEIN K., MERRIAM G., 1994. Corridor use and the elements of corridor quality: chipmunks and fecerows in a farmland mosaic. *Biological Conservation*, 68 : 155-165.
- BENNETT A. F., 1990. Habitat corridors: their role in wildlife management and conservation. Department of Conservation and Environment, Victoria, Arthur Rylah Institute for Environmental Research, Melbourne, Australie, 36 p.
- BLANC-PAMARD C., RAKOTO RAMIARANTSOA H., 2008. La gestion contractualisée des forêts en pays betsileo et tanala (Madagascar). *Cybergeo : European Journal of Geography*, 426 [en ligne].
- BOTEQUILA A., MILLER J., MCGARIGAL K., 2006. *Measuring Landscapes: A Planner's Handbook*. Washington, DC, États-Unis, Island Press.
- BRENNER L., 2006. Áreas Naturales Protegidas y Ecoturismo: El caso de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Relaciones. Colegio de Michoacán*, 27 (105): 237-265.
- BROADBENT S., HAMMERSLEY J., 1957. Percolation processes. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 53: 629-641.
- BUREL F., BAUDRY J., 1999. *Écologie du paysage. Concepts, méthodes et applications*. Paris, France, Tec et Doc Lavoisier, 358 p.
- BUNN A. G., URBAN D. L., KEITT T. H., 2000. Landscape connectivity: A conservation application of graph theory. *Journal of Environmental Management*, 59 (4): 265-278.
- CLERGEAU P., DÉSRÉ G., 1999. Biodiversité, paysage et aménagement : du corridor à la zone de connexion biologique. *Mappemonde*, 55 : 19-23.
- CONABIO, 2010. Cobertura del suelo de México, 2005, a 250 metros. Portal de geoinformación, catalogo de metadatos geográfico. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- CONAP, 2013. Presentación del proyecto Conectividad y Servicios Ambientales del Eje Neo Volcánico. Mexico DF, Mexique.
- CRUZ-BELLO G., SOTELO-RUIZ E., 2013. Coupling spatial multiattribute analysis and optimization to identify reforestation priority areas. *Mountain Research and Development*, 33 (1): 29-39.
- DAJOZ R., 1996. *Précis d'écologie*. 6^e édition. Paris, France, Dunod, 551 p.
- DEBRAY A., 2011. La notion de réseau écologique en France : construction scientifique, appropriation par les politiques publiques et traduction territoriale. *Vertigo – La revue électronique en sciences de l'environnement. Débats et Perspectives*.
- DECAMPS H., DECAMPS O., 2007. Organisation de l'espace et processus écologiques. *Économie Rurale*, 297-298 : 41-54.
- ECCARDI F., 2003. El Corredor Biológico Mesoamericano México. *Biodiversitas*, 47: 4-7.
- EDARA AGRAMONT A., FRANCO MAASS S., NAVA BERNAL G., 2012. Effect of human disturbance on the structure and regeneration of forests in the Nevado de Toluca National Park, Mexico. *Journal of Forestry Research*, 23 (1): 39-44.
- FORMAN R., 1995. Some general principles of landscape and regional ecology. *Landscape Ecology*, 10 (3): 133-142.
- FORMAN R. T. T., GORDON M., 1986. *Landscape ecology*. New York, États-Unis, J. Wiley and Sons, 619 p.
- HAINES-YOUNG R., GREEN D. R., COUSINS S., 1993. *Landscape Ecology and Geographic Information Systems*. Londres, Royaume-Uni, Taylor and Francis.
- HERNÁNDEZ L. S., 1997. Estudio florístico y descripción de la vegetación del municipio de Asunción Cuyotepeji, distrito de Huajuapán de León, Oaxaca, México. *Polibotánica*, 5: 37-75.
- HERNÁNDEZ M. A., GRANADOS D., 2006. El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl-Zoquiapan y el impacto ecológico-social de su deterioro. *Revista Chapingo, Serie Ciencias forestales y del ambiente*, 12 (2): 101-109.
- IEG (Independent Evaluation Group), 2011. *Regional Program Review: The Mesoamerican Biological Corridor*. Washington, DC, États-Unis, Banque mondiale.
- IMBERNON J., VILLACORTA J., ZELAYA C., VALLE A., 2005. Fragmentación y conectividad del bosque en El Salvador: aplicación al corredor biológico mesoamericano. *Bois et Forêts des Tropiques*, 286: 15-28.
- INEGI, 2010. Censo de Población y Vivienda. Cuestionario básico. Mexico DF, Mexique, Instituto Nacional de Estadísticas.
- LAST J., THOULESS J., 1971. Percolation Theory and Electrical Conductivity. *Physical Review Letters*, 27 (25): 1719-1721.
- MAASS S. F., REGIL GARCIA H. H., GONZÁLEZ ESQUIVEL C., NAVA BERNAL G., 2006. Cambios de uso del suelo y vegetación en el Parque Nacional Nevado de Toluca, México, en el período 1972-2000. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 61: 38-57.
- MAKHDOUM M. F., 2008. Landscape ecology or environmental studies (Land Ecology) (European versus Anglo-Saxon schools of thought). *Journal of International Environmental Application and Science*, 3 (3): 147-160.
- MAS J.-F., VELÁZQUEZ A., PALACIO-PRieto J.-L., BOCCO G., 2003. Cartographie et inventaire forestier au Mexique. *Bois et Forêts des Tropiques*, 275 : 5-15.
- MCGARIGAL K., CUSHMAN S. A., 2002. The Gradient Concept of Landscape Structure: Or, Why Are There so Many Patches. [En ligne]
- MIRANDA F., HERNÁNDEZ XOLOCOTZI E., 1963. Los tipos de vegetación de México y su clasificación. Mexico DF, Mexique, Colegio de Postgraduados, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 176 p.
- MYERS N., RUSSELL A., MITTERMEIER C. G., MITTERMEIER G., DA FONSECA A. B., KENT J., 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403: 853-858.
- PÉREZ-REA M., HORTA-RANGEL J., LÓPEZ-CAJÚN C. S., LÓPEZ-LARA T., HERNÁNDEZ-ZARAGOZA J. B., CASTAÑO V. M., 2009. Modelo híbrido de percolación y elemento finito para el análisis micromecánico de suelos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26 (2): 335-346.
- PUIG H., 2001. Diversité spécifique et déforestation : l'exemple des forêts tropicales humides du Mexique. *Bois et Forêts des Tropiques*, 268 : 41-56.
- PUIG H., 1976. *Végétation de la Huasteca, Mexique. Études mésoaméricaines. Mission archéologique et ethnologique française au Mexique. In : Schnell R. La flore et la végétation de l'Amérique tropicale. Tome I*. Paris, France, Masson, 480 p.
- RAMADE F., 2005. *Éléments d'écologie. Écologie appliquée*. 6^e édition. Paris, France, Dunod, 824 p.
- SCHNELL R., 1987. *La flore et la végétation de l'Amérique tropicale*. Paris, France, Masson, 2 volumes, 928 p.
- SERMARNAT, 2010. *Indicadores Básicos del Desempeño Ambiental de México*. México DF, Mexique.
- SERMARNAT, 2012. *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales*. México DF, Mexique.
- SKUPINSKI G., BINHTRAN D., WEBER C., 2009. Les images satellites Spot multi-dates et la métrique spatiale dans l'étude du changement urbain et suburbain – Le cas de la basse vallée de la Bruche (Bas-Rhin, France). *Cybergeo : European Journal of Geography. Systèmes, Modélisation, Géostatistiques*, document 439. cybergeo.revues.org/21995.
- SUZÁN-AZPIRI H., MALDA G., CAICEROS A., SÁNCHEZ A., GUEVARA A., GARCIA O., 2011. Spatial analysis for management and conservation of Cactaceae and Agavaceae species in Central Mexico. *Procedia Environmental Sciences*, 7: 329-334.
- TROLL C., 1939. Luftbildplan und ökologische Bodenforschung. *Zeitschrift der Gesellschaft: für Erdkunde zu Berlin*, 7/8: 242-298.
- VILA SUBIRÓS J., VARGA LINDE D., LLAUSÀS PASCUAL A., RIBAS PALOM A., 2006. Conceptos y métodos fundamentales en ecología del paisaje (*landscape ecology*). Una interpretación desde la geografía. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 48: 151-166.
- WITH A. K., CRIST O. T., 1995. Critical thresholds in species' responses to landscape structure. *Ecology*, 76 (8): 2446-2459.