

Impact sur l'environnement des travaux d'aménagement de la Station de Ski de Sierra Nevada (Espagne)

ANTONIO PULIDO-BOSCH, JUAN GISBERT & GHATAFAN AL-ALWANI

Groupe de Recherche "Recursos Hídricos y Geología Ambiental", Laboratorio de Geodinámica, Université de Grenade, Campus Fuentenueva, 18071 Grenade, Espagne

Résumé L'aménagement de la Station de Ski de Sierra Nevada a provoqué un impact sur le haut bassin de la rivière Monachil. Les travaux suivants, entre autres, ont été réalisés: élargissement de la "Pista del Río" de 10 à 60 m; tubage de la rivière Monachil sur 1500 m; construction d'un lac artificiel et de systèmes d'enneigement artificiel sur une quinzaine de km de pistes. L'impact sur les eaux souterraines est faible étant donné la faible perméabilité des matériaux de la zone d'aménagement. Les mesures de correction et de protection mises en pratique pendant les travaux ont donné de bons résultats. Ces mesures furent prises pour diminuer les matériaux en suspension, et la pollution due à la mauvaise épuration des eaux résiduelles. Le drainage adéquat des suintements dans les talus a évité également, dans certains cas, les glissements de terrain.

INTRODUCTION

La Station de Ski de Sierra Nevada a souffert d'un profond et intense changement au cours des sept dernières années, depuis sa désignation comme siège des Championnats du Monde de Ski Alpin jusqu'à la date de sa réalisation, en février-mars 1996. Cet événement demandait la réalisation d'un ensemble de travaux d'extension et d'aménagement des installations existantes dans le but de doter la station d'une infrastructure en accord avec cet événement sportif.

CETURSA, entreprise gérant la Station, a demandé les services d'une équipe de chercheurs de l'Université de Grenade pour effectuer les évaluations d'impact sur l'environnement de ces travaux (Chacón *et al.*, 1989), ainsi que le suivi des mesures de correction et de protection proposées. Les actions principales du projet soumis à l'évaluation ont été les suivantes: élargissement de la "Pista del Río", selon les normes de la Fédération Internationale de Ski (FIS); aménagement et amélioration de la plus grande partie des autres pistes; tubage de la rivière Monachil dans les tronçons où la piste occupe le lit du cours d'eau; construction d'un lac artificiel pour le stockage de l'eau qui alimente les systèmes d'enneigement artificiel, ainsi que pour doter la plus grande partie des pistes de ces systèmes; et installation de plusieurs remontées modernes et rapides (télécabine et télésièges).

LE MILIEU PHYSIQUE

La Station de Sierra Nevada est située dans une zone de grande altitude entre 2100 m

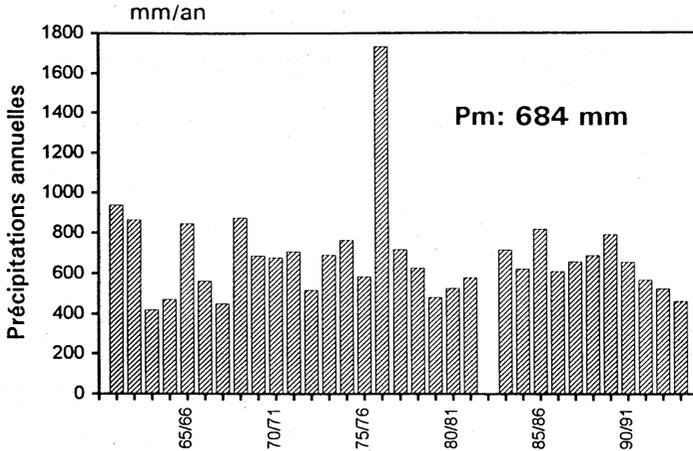


Fig. 1 Précipitations annuelles à la station d'Albergue (2550 m) pour la période 1961/62-1993/94.

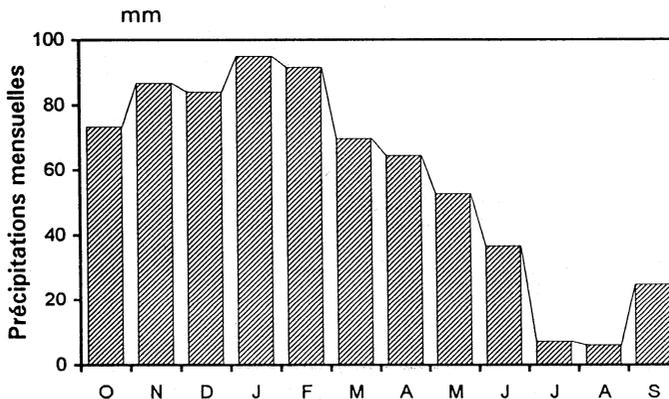


Fig. 2 Précipitations moyennes mensuelles à la station d'Albergue (2550 m) pour la période 1961/62-1993/94.

à Pradollano et 3398 m au sommet du Veleta. Elle appartient donc à la région climatique de Haute Montagne, bien que les précipitations et les basses températures n'empêchent pas que cette Station ait un grand nombre d'heures de soleil par an.

Les précipitations mesurées à Albergue (2550 m) sont de 684 mm an⁻¹ en moyenne pour une période de plus de 30 ans (Fig. 1), bien que la valeur réelle soit sous-estimée car elle doit dépasser 1000 mm (Pulido-Bosch, 1980; Castillo, 1993). La Fig. 2 montre la distribution moyenne annuelle des précipitations. Plus de 30% de ces précipitations sont sous forme de neige au-dessus de 1500 m et 95% à des altitudes supérieures à 2900 m (Rodríguez, 1985).

La température moyenne annuelle de l'air est d'environ 6.2°C (Albergue), mais les valeurs minimales peuvent descendre à -10°C (Fig. 3), favorisant les phénomènes géomorphologiques périglaciaires de gel-dégel qui dominent dans les parties culminantes de la montagne. L'action des glaciers est inactive actuellement, bien qu'elle ait laissé des traces dans les parties les plus élevées des bassins versants

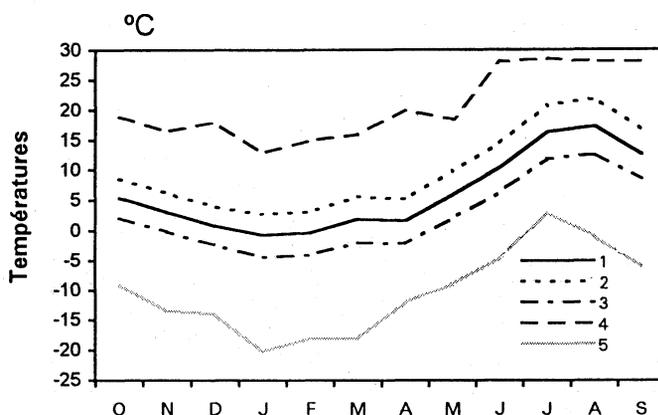


Fig. 3 Températures mensuelles de l'air à la station d'Albergue (2550 m) pour la période 1987-1993. 1: moyenne, 2: moyenne des maxima, 3: moyenne des minima, 4: maxima extrêmes, 5: minima extrêmes.

sous forme de cirques et de moraines. Roldán *et al.* (1996) proposent un gradient thermique pour la Station de $-0.62^{\circ}\text{C } 100 \text{ m}^{-1}$, valeur sensiblement supérieure à celle obtenue par Pulido-Bosch (1980), qui était de $-0.55^{\circ}\text{C } 100\text{m}^{-1}$. La neige fait son apparition quand la température de l'air est de l'ordre de -1°C et l'humidité relative de 60% (Timmermans, 1996), valeurs valables aussi pour la mise en marche du système d'enneigement artificiel. La zone couverte par la neige peut éventuellement descendre à des altitudes inférieures à 1900 m.

Bien que, d'un point de vue statistique, on ne mette pas en évidence l'existence d'une tendance claire dans l'évolution des précipitations et des températures sur une longue période, pendant les cinq dernières années on a enregistré une grande sécheresse, constatée également dans le haut bassin de la rivière Monachil, avec un grand manque de neige et des températures légèrement supérieures à la moyenne. Il faut signaler l'importance des orages, fréquents en période estivale et en période de dégel, qui produisent, directement ou par la fonte des neiges, les crues de la rivière, ainsi que la plus grande partie de l'érosion, pratiquement inexistante en période de dégel normal.

Le haut bassin de la rivière Monachil est situé sur les matériaux du Complexe Nevado-Filabride des zones internes des Cordillères Bétiques (Fig. 4). Les matériaux à l'affleurement sont représentés par de puissantes successions de micaschistes à graphites avec des niveaux subsidiaires de quartzites feldspathiques, amphibolites et gneiss (Puga & Díaz de Federico, 1978). Du point de vue hydrogéologique, ces matériaux appartiennent aux "roches cristallines" dont la perméabilité dépend des discontinuités du milieu. Parmi ces roches, les quartzites sont les seules qui peuvent jouer un rôle d'aquifère, tandis que les micaschistes se comportent comme un aquifère à faible capacité, restreint à la zone superficielle décomprimée et aux grandes fractures transmissives (Chacón *et al.*, 1989).

La rivière Monachil a des pentes très prononcées (30% en moyenne) et une différence d'altitude de 1500 m sur seulement 6 km² de bassin versant à Pradollano. Le régime de la rivière est clairement nival, avec des débits maximums de dégel entre avril et juillet qui peuvent atteindre à Pradollano plusieurs mètres cubes par

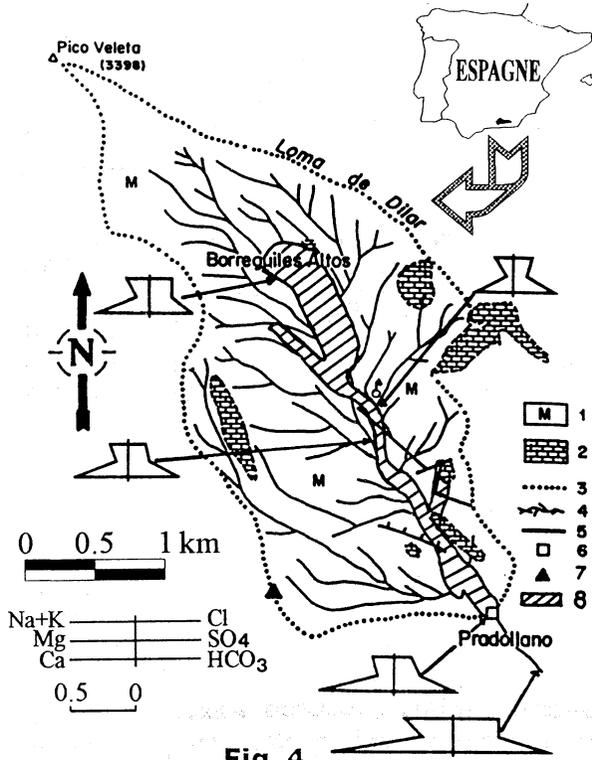


Fig. 4

Fig. 4 Carte de situation de la Station de Ski de Sierra Nevada, avec les principales caractéristiques lithologiques, situation des travaux et données hydrochimiques des eaux de la rivière Monachil (diagrammes de Stiff, en meq l^{-1}).

- 1: surface occup: micaschistes à graphites,
- 2: quartzites feldspathiques,
- 3: ligne de partage d'eau du haut bassin de la rivière Monachil,
- 4: réseau de drainage,
- 5: fractures principales,
- 6: station de jaugeage à Pradollano (2100 m),
- 7: station thermo-pluviométrique Albergue (2550 m),
- 8: surface occupée par les travaux.

seconde. A partir des observations de terrain, de l'étude de séries de débits et de l'application de modèles mathématiques d'écoulement et de dégel (Pulido-Bosch, 1980; Castillo, 1993; Al-Alwani *et al.*, 1996) on a pu déduire l'importance de l'écoulement hypodermique et souterrain (entre 35 et 52.5% des apports annuels) par rapport aux apports venant de la pluie et de la fonte des neiges.

Les apports moyens annuels de la rivière Monachil dans le secteur de Pradollano (Pulido-Bosch *et al.*, 1990) sont estimés à 6.1 hm^3 (Fig. 5), avec un débit moyen de 194 l s^{-1} , soit un débit spécifique de $30.3 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^2$. Les débits moyens journaliers maximums, obtenus pour des périodes de retour de 50, 100 et 500 ans, sont estimés à 5, 7 et $13 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectivement; logiquement, les débits instantanés doivent être bien plus élevés.

La qualité chimique naturelle des eaux de la rivière Monachil est excellente étant donnée sa condition de rivière de haute montagne. Sa teneur en sels dissous est peu

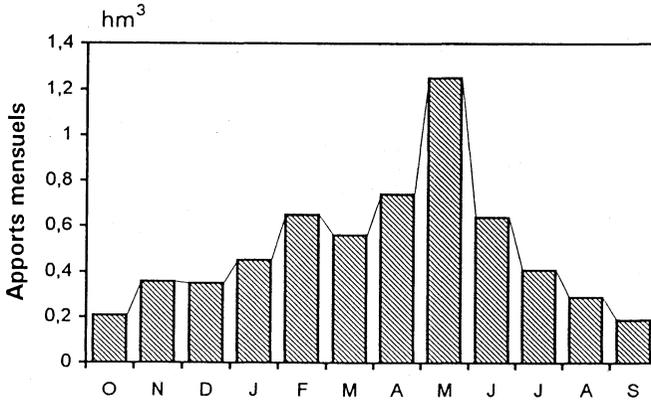


Fig. 5 Apports mensuels estimés pour la rivière Monachil à Pradollano.

élevée et varie de 70-150 mg l⁻¹, résultant d'une prédominance de matériaux peu altérables chimiquement et d'eaux venant de la fonte des neiges (Pulido-Bosch *et al.*, 1993). Les ions dominants sont le bicarbonate et le calcium (Fig. 4). La modification de l'environnement et les agglomérations de Pradollano et Borreguiles, avec près d'un million de visiteurs pendant la dernière saison, ont affecté les paramètres physico-chimiques et biologiques de l'eau (Zamora & Alba, 1992), en les dégradant notablement, notamment par une augmentation des sédiments en suspension due aux travaux et aux eaux résiduelles.

IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT ET PRINCIPAUX PROCESSUS ENGENDRES

L'impact sur les eaux souterraines, étant donnée la faible potentialité aquifère des matériaux qui affleurent, est en général peu important, c'est pourquoi nous décrivons plus spécialement les processus en rapport avec les eaux superficielles. On peut souligner l'influence du tubage de la rivière, qui représente une barrière à l'écoulement souterrain sur les premiers mètres de profondeur; l'excavation de talus produit également un risque indirect, dû à l'apparition de suintements qui ont favorisé certains glissements, et qui se répercutent à leur tour sur les eaux de la rivière en augmentant le potentiel d'érosion.

Par rapport à l'écoulement de surface, les plus grands impacts sont ceux produits par le tubage de la rivière, avec une longueur de 1.5 km et un diamètre de 3.6 m, et l'excavation et le remplissage de versants par l'élargissement des pistes. De même, l'infrastructure créée pour l'enneigement artificiel (lac, pompes, tuyaux enterrés) entraîne de grands problèmes, spécialement durant les années à faibles précipitations (saison 1994/1995), la rivière pouvant s'assécher.

Un des processus, accélérés par les activités humaines sur ce système si fragile de haute montagne, est l'érosion mécanique. En effet, le manque de protection du sol par la végétation qui tapissait ce milieu, ainsi que les mouvements de terre réalisés, et plus spécialement le mouvement des matériaux fins — absents normalement dans les zones périglaciaires, qui sont naturellement couverts de dalles — ont fourni des

matériaux mobilisables par l'écoulement de surface. Les pistes et les alentours des travaux (Fig. 4) sont donc les zones les plus affectées par les processus d'érosion. Ceci est dû au fait que la végétation (pâturages, genêts d'Espagne et herbes moutonnières liées aux petites sources) et les sols naturels de la Sierra jouent un rôle essentiel sur l'interception, l'infiltration et l'écoulement. Des travaux récents avec des simulateurs de pluie (Simón *et al.*, 1996) ont mis en évidence le taux élevé d'infiltration et la faible capacité de rétention de ce type de sols, propriétés qui limitent l'écoulement de surface et l'érosion. On explique ainsi qu'un dégel "normal" ne provoque pas une érosion importante (légère turbidité de l'eau qui peut éventuellement atteindre 1 g l^{-1}), étant donné que l'eau s'infiltré et circule dans le sol et la zone supérieure altérée de la roche où les éléments fins sont absents, avant de s'écouler dans la rivière, sans produire un écoulement direct de surface important.

Les pistes et les travaux, par contre, représentent des zones à sols nus, à pentes élevées et à faible capacité d'infiltration, dans lesquelles les écoulements incontrôlés (certains lits naturels ont été tubés) érodent et mettent en suspension les matériaux meubles fins présents dans ces zones. C'est la raison pour laquelle les premiers dégels pendant et après les travaux, les forts orages d'été et de printemps et les dégels brusques (pluie intense sur de la neige déjà existante) ont augmenté de façon alarmante l'érosion pendant les cinq dernières années. Les effets principaux sont les suivants: apparition de coulées de boue sur les pistes pendant les dégels et les pluies intenses; érosion linéaire, dans les rigoles et les ravines (dans les zones de plus grande pente) — les sillons ont atteint parfois des profondeurs d'1 m et des largeurs de plus de 1.5 m; formation de nombreux cônes de déjection au pied des versants ou au bout des ravines; toute sorte de matériaux érodés ont été déposés à différents endroits des pistes là où il existe une rupture de pente importante; eaux troublées par les sédiments en suspension, principalement après les événements cités auparavant; colmatation de coffrets, drains et canalisations; et apparition d'éboulis de roches et glissements dans les talus qui interceptent l'écoulement de surface et augmentent la charge des eaux en sédiments.

MESURES DE CORRECTION ET DE PROTECTION

De toutes les mesures proposées pendant la réalisation du projet, destinées principalement à réduire l'érosion, nous exposons ci-après seulement celles qui ont été adoptées: construction dans toutes les pistes de tranchées collectrices transversales (20 cm de profondeur et 30 cm de large), avec des pentes comprises entre 3 et 10°, qui drainent de manière ordonnée l'écoulement de surface vers les canaux latéraux, leur densité étant directement proportionnelle à la valeur de la pente; construction de canaux latéraux sur les bords des pistes; emplacement de puisards latéraux de dimensions adéquates, avec un système de grilles pour retenir les apports solides; protection artificielle de tronçons de talus vulnérables, ainsi que des points où confluent des ravines; protection adéquate des talus abrupts afin d'éviter leur érosion par les crues et qui marquerait le début d'un processus d'érosion remontante; drainage des versants instables par le biais de forages horizontaux de petit diamètre; régénération de la couverture végétale dans toute la zone affectée par le projet, afin de réduire l'érosion et de rendre au paysage son état naturel; besoin

d'épuration efficace des eaux résiduelles, spécialement pendant les périodes d'occupation maximale de la Station. La température basse des eaux résiduelles réduisait l'efficacité des boues actives.

DISCUSSION ET CONCLUSION

On peut observer que, un an et demi après la fin des travaux, les mesures mises en pratique ont maintenu les propriétés physiques du milieu et diminué les taux d'érosion. Dans ce sens, il faut mentionner le grand effort réalisé pour la régénération de la couverture végétale, 160 ha environ ayant été plantés d'espèces autochtones. Cela va constituer une des clefs pour freiner l'érosion et récupérer l'équilibre du milieu, qui ne sera pas rétabli avant 10 ans.

Le suivi systématique de l'efficacité des mesures de correction a permis de déduire que les processus érosifs — accélérés par les travaux réalisés — agissent par paliers, de telle manière qu'il existe un seuil à partir duquel les précipitations font augmenter l'érosion de manière spectaculaire; des pluies d'intensités comprises entre 10 et 20 mm h⁻¹ peuvent provoquer de vrais désastres, spécialement si elles ont lieu en pleine période de dégel.

Nous avons aussi constaté que après chaque dégel les risques de coulées de boue se réduisent grâce à la diminution de la fraction fine existant en surface après les mouvements de terre; l'occupation de la surface par des dalles — comme processus résultant de l'élimination des matériaux fins — provoque la réduction ou l'arrêt de l'érosion sur les nouvelles pistes de ski.

Remerciements A CETURSA, pour les facilités données pour l'élaboration de cet article; à la CICYT, projet AMB95-0493, dont l'un d'entre nous (AP-B) est le chercheur principal.

REFERENCIAS

- Al Alwani, G. K., Gisbert, J. & Pulido-Bosch, A. (1996) El deshielo y la escorrentía en la cabecera del río Monachil (Sierra Nevada) (Le dégel et l'écoulement à la source de la rivière Monachil (Sierra Nevada)) (en espagnol avec résumé en anglais). In: *Proc. 1st Int. Conf. Sierra Nevada* (ed. par J. Chacon & J. L. Rosua), vol. 1, 469-481. Granada.
- Castillo, A. (1993) Aguas de Sierra Nevada (Eaux de Sierra Nevada) (en espagnol). In: *Aguas de Sierra Nevada* (ed. par M. Ferrer & E. Fernández Durán), 185-245. EMASAGRA, Granada.
- Chacón, J., Ortega, F., Pulido-Bosch, A. & Rosúa, J. L. (1989) *Estudio del Impacto Ambiental del Proyecto de Reparación y Acondicionamiento de la Pista del Pío para el Campeonato del Mundo de Esquí Alpino con Instalación de Nieve Artificial y Nuevos Remontes* (Etude de l'impact sur l'environnement du projet de réparation et aménagement de la Pista del Río pour le Championnat du Monde de Ski Alpin avec installation de neige artificielle et nouvelles remontées) (en espagnol). Univ. Granada-CETURSA, Granada, Espagne.
- Puga, E. & Díaz de Federico, A. (1978) Metamorfismo polifásico y deformaciones alpinas en el Complejo de Sierra Nevada (Cordilleras Béticas). Implicaciones geodinámicas (Métamorphisme polyphasiques et déformations alpines dans le Complexe de Sierra Nevada (Cordillères Bétiques). Implications géodynamiques) (en espagnol). In: *Proc. Réun. Géod. Cord. Béticas y Mar de Alborán*, 79-112. Univ. Granada, Espagne.
- Pulido-Bosch, A. (1980) Datos hidrogeológicos sobre el borde occidental de Sierra Nevada (Données hydrogéologiques du bord occidental de Sierra Nevada) (en espagnol) *Serie Univ. Fund. March.* 123.
- Pulido-Bosch, A., Padilla, A. & Cerón, J. C. (1990) Aspectos hidrológicos del impacto ambiental del Proyecto de ampliación de las instalaciones de la Estación de Esquí de Sierra Nevada (Aspects hydrologiques de l'impact sur l'environnement du Projet d'agrandissement des installations de la Station de Ski de Sierra Nevada) (en espagnol avec résumé en anglais). In: *Proc. 11 Reunión sobre el Medio Ambiente en Andalucía* (Córdoba), 264-273. Univ. Córdoba, Espagne.

- Pulido-Bosch, A., Cerón, J. C., Padilla, A. & Al Alwani, G. K. (1993) Impactos hidrológicos de las obras de acondicionamiento de Sierra Nevada para el Campeonato Mundial de Esquí (Impacts hydrologiques des travaux d'aménagement de Sierra Nevada pour le Championnat Mondial de Ski) (en espagnol avec résumé en français). In: *Proc. V Reunión Nac. de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio, Murcia* (ed. par R. Ortiz) , vol. I, 69-175. Sociedad Española de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio.
- Rodríguez, F. (1985) *Granada: Medio Físico y Desarrollo* (Grenade: Milieu physique et développement) (en espagnol). Inst. Desarrollo regional et Univ. Granada. Granada. Espagne.
- Roldán, C., Montávez, J. P., Rodríguez, A. & Jiménez, J. I. (1996) Contribución al estudio del régimen térmico en la zona esquiable de Sierra Nevada (Contribution à l'étude du régime thermique dans la zone skiable de Sierra Nevada) (en espagnol avec résumé en anglais). In: *Proc. 1st Int. Conf. Sierra Nevada* (ed. par J. Chacon & J. L. Rosua), vol. I, 55-70. Granada.
- Simón, M., García, I., Iriarte, A., Barahona, E. & Guardiola, J. L. (1996) Propiedades hídricas de los suelos de Sierra Nevada (Propriétés hydriques des sols de Sierra Nevada) (en espagnol avec résumé en anglais). In *Proc. 1st Int. Conf. Sierra Nevada* (ed. par J. Chacon & J. L. Rosua), vol. II, 75-86. Granada.
- Timmermans, H. (1996) Nieve producida en Sierra Nevada (Neige produite à Sierra Nevada) (en espagnol avec résumé en anglais). In: *Proc. 1st Int. Conf. Sierra Nevada* (ed. par J. Chacon & J. L. Rosua), vol. V, 161-166.
- Zamora, C. & Alba, J. (1992) Caracterización y calidad de las aguas del río Monachil (Sierra Nevada, Granada) (Caractérisation et qualité des eaux de la rivière Monachil (Sierra Nevada, Grenade) (en espagnol). Grenade, Espagne.