

Caractérisation et formation de la *cangahua* en Équateur

Analyse préliminaire (chimie, minéralogie, pétrographie) de quelques types de *cangahua*

Paul QUANTIN, Claude ZEBROWSKI

Abstract

This study concerns the indurated horizons of some volcanic ash soils in the Interandine Valley of the Ecuador. These indurated horizons were cropped out by erosion on the piedmont of the sierras, under a subarid to subhumid climate, and then they have been called cangahua. The soils within they are intercalated are composed of several various pyroclastic deposits. The soil profiles show one, two or several indurated horizons. The present observations concern a soil climo-toposequence near Bolívar, viz : downward a soil profile with 2 cangahua horizons; at the midslope a profile with only one horizon of weathered tuff; a little above, another soil with a weakly weathered consolidated ash fall layer; and finally, at the summit on the páramo, an andosol profile with two horizons of weathered tuff; as well as three cangahua samples from other parts of Ecuador, but located downward of the piedmont. The aim of this study is to compare the properties of these various indurated soil materials. We will show hereafter the first data about some chemical, mineralogical and microscopic features of these soils and especially their indurated horizons.

We determined the composition in major elements of the fine earth and of the less than 2 μm fraction, at first from a «triacid» extract which dissolved mainly the weathering products, and further on the residue of unweathered volcanic glasses and minerals. This later one can give us good information on the parent pyroclastic material, which is varying from an alkaline trachyte to a dacite and a rhyodacite within the same soil profile or from a site to another one. The chemical composition of the weathering product varies according to the rainfall regime and its progressive increase from down to upward (climotoposequence). The molar silica/alumina ratio of this product is decreasing from the values 5-4 downward, to 3 at mid-slope, and 2-1.5 upward. Indeed the silica content decreases according to the increase in rainfall intensity. This fact is also parallelly enlightened by the clay mineral composition, made downward of smectites and badly crystallized 2:1 clays, then at mid-slope of 1 nm halloysite, and upward only of allophane. Downward of the piedmont the outcropping cangahua is made of silica-rich 2:1 clay minerals; it doesn't contain any allophane but often a little of calcite and probably of opal. However, as well as upward as downward, all soils and indurated horizons keep a high amount of almost unweathered volcanic glasses and minerals.

The optical microscopy showed that the indurated horizons keep the original massive fabric of tuff or consolidated ash fall in their matrix. But this original shape is more or less broken or cracked into polyhedral fragments, as well as it is modified by the

glass weathering into a clay plasma and some pedofeatures like biological cavities, clay coatings, ferruginous pseudonodules, calcite infillings, but no opal coatings were clearly observed. Downward the toposequence, the upper layer of cangahua shows a strong evidence of pedofeatures like a high density of cracks and biofeatures as well as frequent calcite infilling and superficial laminar calcite crusts, but rather few clay coatings and ferruginous nodules. At the midslope in the weathered tuffs the clay coatings and ferruginous nodules are more abundant, but the cracking of the matrix is less developed. Upward near the top of the toposequence, the weathered tuff is none or little cracked, does not show clay coatings and only presents scarce ferruginous nodules.

The ^{14}C dating of lime crust in the upper cangahua layer is at least 14,000 BP; then the parent tuff was probably deposited between 15,000 and 20,000 years ago. This lime crust testify a more arid period about between 15,000 and 13,000 BP than during the former tuff weathering or the present soil formation.

Keywords: Cangahua - Ecuador - Chemistry - Mineralogy - Petrography - Genesis

INTRODUCTION

Le mot quechua *cangahua* dans les pays andins d'Amérique du Sud signifie « terre dure et stérile » (Custode *et al.*, 1992). Il s'agit de couches dures qui apparaissent souvent à la surface des terres cultivées, après érosion du sol superficiel. Ce nom est largement utilisé depuis la Colombie jusqu'au Chili, et particulièrement en Équateur. Il désigne une large variété de matériaux fins, consolidés ou cimentés : sédiments, grès, tufs pyroclastiques, sols de cendres volcaniques indurés.

En Équateur, les affleurements de *cangahua* sont observés dans les formations volcaniques pyroclastiques du Quaternaire récent de la vallée interandine, entre les deux *Sierras* orientale et occidentale. Ils s'étendent depuis la Colombie au nord jusqu'à la région de Chunchi au sud (Zebrowski, 1996). La *cangahua* affleure surtout sur les piémonts des *Sierras* et des appareils volcaniques, entre 2 200 et 3 200 m d'altitude, en climat tempéré subaride et subhumide. Cette relation topo-climatique a amené certains pédologues à l'idée d'horizons indurés de sols volcaniques. Mais Vera et López (1992) ont reconnu et classé cinq types de formation de *cangahua*, à savoir : de retombée de cendre volcanique consolidée (tuf), de coulée boueuse (lahar), de coulée pyroclastique (tuf), « pédogénique » (sol induré de cendre volcanique), « mixte colluvial » (sédiment consolidé de cendres et sols).

En réalité sur le terrain il est souvent difficile de distinguer un tuf volcanique altéré (horizon C), à la base ou dans un profil de sol, d'un horizon de sol induré, du seul fait de la pédogenèse (horizon Bm ou Cm). Les formations volcaniques et volcano-sédimentaires sont complexes, étant constituées de dépôts (voire séries de dépôts) successifs sur lesquels alternativement s'est appliquée la pédogenèse. Il y a généralement au moins deux, sinon plusieurs, horizons indurés de matériau et d'âge différents. En outre les conditions de climat et de pédogenèse ont varié d'un dépôt à l'autre et d'un lieu à l'autre.

En Équateur tous les auteurs s'accordent sur la formation de la *cangahua* à partir d'un matériau volcanique pyroclastique fin (Vera et López, 1992; Hall et Beate, 1991; Custode *et al.*, 1992; Winckell et Zebrowski, 1992). Ils observent qu'il s'agit de dépôts

du Quaternaire récent. Cependant les *cangabuas* affleurantes ou sub-affleurantes ne se sont développées que sur des formations antérieures à l'Holocène : de 11 000 à plus de 49 000 BP (Vera et López, 1992; Winckell et Zebrowski, 1992). Elles sont recouvertes par les cendres récentes (holocènes) mais se sont déposées puis altérées en climat différent de l'actuel. C'est pourquoi certains auteurs pensent qu'une période antérieure plus aride aurait favorisé la cimentation des cendres altérées par de la silice et/ou du calcaire (Winckell et Zebrowski, 1992; Hall, 1995) ; mais cela n'a pas été démontré. En revanche, l'altération des cendres ou tufs volcaniques augmente suivant un gradient topo-climatique altitudinal vers l'amont des versants, tandis que l'induration s'accroît vers l'aval, où en bas des piémonts la *cangabua* est généralement recouverte d'une croûte calcaire, voire fortement imprégnée de calcite. S'agit-il d'un processus contemporain ou postérieur à la pédogenèse initiale ?

L'accumulation de silice dans la *cangabua*, souvent invoquée comme ciment, n'a pas encore été clairement démontrée. L'impact d'une accumulation d'argile n'a pas non plus été bien élucidé jusqu'à maintenant.

C'est pourquoi nous avons repris quelques observations de sols à *cangabua* d'une climo-toposéquence près de Bolívar (Carchi) au nord de l'Équateur, ainsi que quelques échantillons de *cangabua* d'autres régions. Le but de cette étude est de préciser leur caractérisation, espérant ainsi apporter une contribution nouvelle quant à leur formation. Nous ne présenterons que les premiers résultats d'analyse chimique élémentaire, de minéralogie et de pétrographie, d'autres observations et analyses étant en cours.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les échantillons de *cangabua* étudiés

Dans un premier temps nous avons observé une toposéquence de sols à *cangabua* dans la province de Carchi au nord de l'Équateur sur le versant de la *Sierra* occidentale suivant le transect Bolívar - El Ángel - Páramo de El Ángel entre 2 600 et 3 500 m d'altitude. Nous avons d'abord prélevé le profil QZI, en aval du piémont (altitude : 2 600 m), qui présente les horizons les plus caractéristiques de *cangabua*, puis un peu en amont (altitude : 2 820 m) seulement 3 échantillons du profil QZII, dont un de tuf altéré équivalent supposé de la première *cangabua* du profil aval, puis encore plus en amont (altitude : 3 150 m), un horizon de cinérite consolidée du profil QZIII, supposé équivalent de la première formation à *cangabua*, mais recouvert par un andosol.

Profil	Échantillon	Horizon
QZI	(figure 1)	
QZII	1	2Btg colonnaire
	2	3Ctg tacheté
	3	3Ctx tuf brun- <i>cangabua</i> , non calcaire, altéré
QZIII	1	2Cx cinérite brune consolidée et altérée

Nous avons en outre prélevé et étudié un profil d'andosol du *páramo* appelé PAR, comportant deux horizons de tuf peu altéré, dans la région nord, mais sur le versant de la *Sierra* orientale, à Pimampiro (Ibarra) vers 3 700 m d'altitude.

PAR	1	A	Andosol noir
	2	2 C/R	tuf gris altéré, tacheté
	3	3 C	tuf brun altéré, tacheté

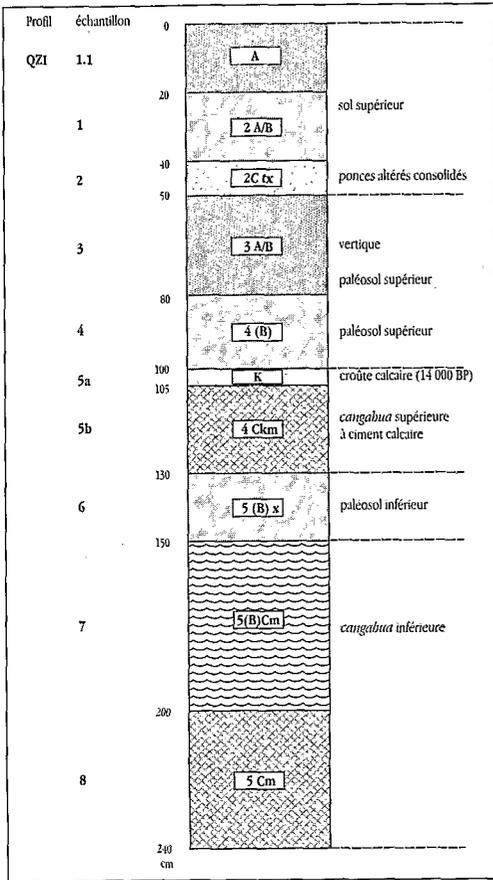


Figure 1
Profil schématique de sol à cangahua (QZ1)
du bas piémont, Bolívar

Enfin, nous avons étudié trois échantillons de *cangahua*, d'autres régions, à savoir :

CAN : *cangahua* superficielle, revêtu de calcaire, près du village Cangahua sur le piémont du Cayambe (altitude : 2 800 m) horizon 2 C km ;

AMB : *cangahua*, non calcaire, près d'Ambatillo (Ambato), mi-versant (altitude : 3 300 m) du piémont du Chimborazo horizon 2 Cm ;

LIC : *cangahua* superficielle revêtu de calcaire, près du village de Licto (Riobamba), horizon 2 Ckm.

Nous avons également étudié un échantillon de boule de cinérite accrétonnée, appelé CIN, qui accompagne localement la formation de tuf du village de Cangahua. Cela peut être un indice de formation « phréatomagmatique » du tuf à l'origine de la *cangahua* (à ne pas confondre avec les nids fossiles de scarabée dans certains sols de cendre volcanique).

Les méthodes d'analyses appliquées

Composition chimique élémentaire (éléments majeurs), sur la fraction extraite par le réactif « triacide » qui correspond essentiellement aux produits d'altération, puis sur le résidu des minéraux inaltérés les plus stables

La composition du résidu de matériaux volcaniques peu altérés reflète assez bien celle du matériau originel et permet de déterminer le type de roche volcanique par un simple calcul (Rittmann, 1963).

Composition minéralogique, par diffraction de rayons X

L'analyse a été appliquée d'abord sur une poudre du matériau global pour déterminer l'ensemble des minéraux primaires et argileux. Puis, sur un extrait de la fraction argileuse, nous avons déterminé les minéraux secondaires, par comparaison de traitements : en poudre, orienté, chauffé à 100 °C, puis à 300 °C et 500 °C, ou glycérolé, suivant la composition des minéraux argileux.

Observation pétrographique en microscopie optique sur lame mince

Nous avons observé et déterminé la composition du squelette minéral, de la matrice, ainsi que l'organisation structurale, les traits pédologiques et biologiques.

Analyse sélective de minéraux non cristallins

Des extraits par l'oxalate d'ammonium (pH3 - obscurité) de Al, Fe et Si ont été faits pour déterminer l'allophane sur 3 échantillons de la séquence de Bolívar et 3 échantillons

du sol du *páramo*. Un extrait de Al, Fe et Si par le pyrophosphate de sodium a été fait sur l'andosol du *páramo*.

Les phases de silice et d'alumine rapidement solubles ont été également extraites par la soude 0,5 N à 20 et à 50° (méthodologie dans Hidalgo *et al.*, 1995)

Datation de la cangahua

Deux dosages de ^{14}C ont été faits (M. Fournier, ORSTOM) sur deux *cangahuas* encroûtées de calcaire, près de Bolívar.

RÉSULTATS

Composition chimique élémentaire

COMPOSITION CHIMIQUE ET TYPE DE MATÉRIAU VOLCANIQUE ORIGINEL (tableau 1)

Il s'agit de la composition du résidu de la dissolution sélective par le réactif « tri-acide », à savoir les silicates primaires inaltérés (phénocristaux, microlithes et verres). Cette composition peut être apparentée à un type de matériau volcanique ; elle permet de faire une hypothèse sur la nature du matériau originel et d'observer les variations de ce matériau dans un profil de sol volcanique complexe.

Echant. n°	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO ₂	P ₂ O ₅	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Ki	R
OZI 1	67,82	16,71	1,85	0,20	0,05	0,02	5,47	1,46	1,23	5,23	6,90	D
OZI 2	68,82	16,28	1,74	0,16	0,04	0,02	4,80	1,53	1,60	5,01	7,19	D
OZI 3	63,88	18,05	1,33	0,12	0,04	0,03	4,88	1,18	2,22	8,28	6,02	T
OZI 4	70,00	15,56	1,48	0,13	0,05	0,03	4,44	1,48	1,94	4,35	7,65	RD
OZI 5b	74,19	14,62	1,72	0,13	0,05	0,04	4,30	1,50	1,29	2,37	8,23	RD
OZI 6	69,15	15,86	1,96	0,19	0,06	0,04	4,71	1,65	1,65	4,71	7,41	D
OZI 7	69,30	16,02	1,91	0,18	0,06	0,03	4,59	1,41	1,69	4,80	7,35	D
OZI 8	68,34	16,52	1,67	0,15	0,04	0,02	4,80	1,46	1,89	5,09	7,03	D
OZII 1	73,32	14,23	1,16	0,09	0,04	0,02	3,71	1,00	2,01	4,49	8,76	RD
OZII 2	67,51	17,00	1,60	0,13	0,04	0,03	5,39	1,43	1,52	5,30	6,75	D
OZII 3	67,81	16,75	1,54	0,19	0,04	0,01	4,24	1,39	2,56	5,49	6,88	D
OZIII 1	60,98	19,88	1,46	0,20	0,05	0,02	5,49	1,22	4,63	5,98	5,21	L
PAR 1	71,53	15,00	2,38	0,26	0,02	0,03	3,71	1,94	1,76	3,35	8,56	RD
PAR 2	73,54	15,12	1,72	0,22	0,02	0,01	3,18	0,93	2,45	2,78	8,27	RD
PAR 3	70,91	16,01	2,01	0,19	0,02	0,02	3,55	1,53	1,92	3,83	7,53	RD
CAN	63,87	18,33	2,62	0,28	0,06	-	7,00	1,92	1,67	4,25	5,92	D
CIN	66,56	18,05	2,46	0,22	0,03	0,05	5,34	1,78	1,44	4,07	6,27	D
AMB	64,96	17,31	3,57	0,41	0,09	-	6,39	1,70	1,76	3,80	6,38	D
LIC	67,02	16,90	2,78	0,28	0,03	0,10	5,47	2,12	1,63	3,67	6,74	D

R : Type de matériau ; D : Dacite ; T : Trachyte alcalin ; RD : Rhyodacite ; L : Latite

Tableau 1 - Composition chimique élémentaire du « résidu-triacide », normalisée à 100 %, sur la fraction inférieure à 2 mm

Séquence de Bolívar

- **Profil QZI** : On distingue au moins quatre séries de matériaux qui correspondent probablement à quatre séries d'émissions pyroclastiques :

- (1) horizons 1 et 2, dont la composition moyenne (68,3 % SiO₂ - 16,5 % Al₂O₃ - 1,8 % Fe₂O₃ - 5,1 % CaO - 1,5 % MgO - 1,4 % K₂O et 5,1 % Na₂O) est de type « dacite claire » ;
- (2) horizon 3, dont la composition est de type « trachyte alcalin sodique » ;
- (3) horizons 4 et 5, dont les compositions sont de type « rhyodacite » ;
- (4) horizons 6, 7 et 8, dont les compositions sont à nouveau de type « dacite claire ».

Tous ces matériaux sont calco-alcalins et presque tous particulièrement riches en sodium. Les deux *cangabuas* proviennent de deux émissions pyroclastiques bien différentes ; la première et la plus récente (horizon 5b) de rhyodacite, la seconde (horizons 7 et 8) de dacite claire. La première est plus siliceuse (74,2 % SiO₂) et moins alcaline (1,3 % K₂O et 2,4 % Na₂O) ; la seconde est moins siliceuse (68,3 % SiO₂) et plus alcaline (1,9 % K₂O et 5,1 % Na₂O).

- **Profil QZII** : les trois horizons analysés du paléosol semblent provenir de deux matériaux pyroclastiques différents, successivement dans l'échantillon 1 de type « rhyodacite » (à 73 % SiO₂), dans les échantillons 2 et 3 de type « dacite claire » (à 68 % SiO₂). Le dernier est celui de tuf altéré. Sa composition l'apparente à la deuxième *cangabua* du profil QZI (horizon. 8) ; les deux pourraient provenir de la même émission pyroclastique.
- **Profil QZIII** : Le seul horizon analysé, d'un paléosol de cinérite consolidée, friable, a une composition particulière de « latite claire ». Celle-ci est proche de l'horizon 3 du profil QZI, donc bien différente de celle des horizons de *cangabua* ou de tuf des profils QZI et QZII.

Profil du páramo

Les trois horizons successifs de l'andosol et des deux tufs, pourtant bien différenciés par leur morphologie et leur degré d'altération, ont une composition très semblable de type rhyodacite. Dans ce cas les trois émissions pyroclastiques successives ne peuvent pas être distinguées par leur composition. Vu l'éloignement de Bolívar, un apparentement du matériau originel des deux tufs du *páramo* et de la première *cangabua* de Bolívar est peu probable.

Cangahuas (CAN, AMB, LIC) et cinérite accrétonnée (CIN) du site Cangahua

Bien que les *cangabuas* ne proviennent probablement pas de la même émission, leur composition est assez voisine et de type « dacite claire ».

COMPOSITION CHIMIQUE DU PRODUIT D'ALTÉRATION

Il s'agit de l'extrait triacide du sol global (< 2 mm) – tableau 2. Nous avons aussi fait des extraits sur la fraction argileuse (< 2 µm) – tableau 3 – qui a servi pour l'analyse minéralogique des argiles. En fait, dans nos échantillons la composition des extraits sur sol global et sur la fraction argileuse est semblable ou peu différente. On note que la fraction argileuse comporte aussi un résidu important (4 à 23 %) de minéraux primaires très siliceux (quartz, cristobalite et feldspaths).

Dans l'ensemble des sols à *cangabua*, horizons meubles et indurés, le fort résidu insoluble (34 à 75 %) de l'extraction triacide indique une altération partielle du matériau pyroclastique originel, quelle que soit la position altitudinale et le régime plus ou moins humide du climat actuel, ou la position stratigraphique et l'âge du matériau. C'est le rapport

SiO₂/Al₂O₃ mol. (Ki) qui est le plus significatif du type et du degré d'altération, car il varie suivant les conditions pédoclimatiques et la durée d'altération. Il diminue de bas en haut de séquence et est élevé dans les échantillons de *cangahua*.

Echantillon n°	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO ₂	P ₂ O ₅	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Ki	Kr	Taux ¹ résidu	Taux ² extrait
OZI 1	54,79	22,19	13,87	1,73	0,23	0,21	2,67	2,29	0,97	1,04	4,18	2,98	64,95	28,84
OZI 2	54,84	21,86	13,34	1,67	0,57	0,21	2,63	2,37	1,11	1,41	4,25	3,05	68,80	26,99
OZI 3	56,00	28,44	10,33	0,82	0,12	0,08	1,44	1,52	0,77	0,47	3,34	2,70	33,80	57,14
OZI 4	57,26	23,65	11,20	1,24	0,24	0,14	2,41	2,04	0,82	1,00	4,10	3,14	54,00	40,17
OZI 5b	25,11	7,26	4,03	0,42	0,02	0,15	59,30*	2,82	0,40	0,50	5,86	4,32	23,25	49,59*
OZI 6	59,41	18,86	12,26	1,23	0,31	0,14	2,96	2,36	0,94	1,54	5,34	3,76	63,70	31,81
OZI 7	58,03	17,70	13,18	1,46	0,23	0,26	3,34	2,71	1,06	2,05	5,55	3,76	70,85	25,42
OZI 8	58,80	19,70	12,77	1,71	0,24	0,15	2,12	2,48	1,17	1,64	4,99	3,52	68,70	27,41
OZII 1	55,23	26,05	12,16	1,98	0,09	0,14	2,54	1,88	0,63	1,04	3,59	2,76	64,65	28,79
OZII 2	50,18	28,27	14,70	1,75	0,27	0,12	1,53	1,84	0,62	0,71	3,01	2,25	59,40	35,37
OZII 3	47,62	24,54	16,90	2,18	0,23	0,13	1,34	3,64	1,96	1,45	3,29	1,85	68,35	27,51
OZIII 1	43,11	39,48	11,31	1,58	0,14	0,51	1,24	1,47	0,51	0,64	1,85	1,56	41,00	46,86
PAR 1	36,18	38,43	16,85	2,34	0,08	0,76	0,99	2,11	0,49	1,75	1,59	1,24	56,55	22,25
PAR 2	39,35	30,18	15,68	2,48	0,12	0,69	0,71	3,79	2,01	4,97	2,21	1,66	75,40	16,90
PAR 3	48,72	33,45	11,32	1,87	0,08	0,45	0,95	2,05	0,29	0,82	2,47	2,03	52,15	37,97
CAN	49,29	18,29	16,86	1,77	0,30	0,51	5,71*	4,86	0,86	1,57	4,57	2,87	60,00	35,00*
CIN	50,77	20,67	17,44	1,97	0,30	0,32	4,72	1,94	0,56	1,29	4,16	2,70	59,00	35,55
AMB	43,35	16,26	11,65	1,25	0,19	0,19	16,26*	7,86	1,38	1,63	4,52	3,10	54,00	36,91*
LIC	54,80	18,07	12,65	1,66	0,20	0,28	5,00*	4,70	0,90	1,63	5,14	3,54	61,25	33,21*
OZI 5b**	59,88	17,32	9,62	1,01	0,04	0,35	2,69	6,73	0,96	1,20	4,16			
AMB**	49,20	18,45	13,22	1,41	0,22	0,23	4,92	8,92	1,57	1,84	4,52			
CAN**	48,78	18,47	17,03	1,79	0,30	0,52	4,16	5,48	0,86	1,59	5,14			

1 : taux de résidu en % de sol sec à 105 °C * : présence de CaCO₃; OZI 5b = 51,5 % ; AMB = 7,9 % ; CAN = 1 % ; OZI et LIC < 1 %
 2 : taux de produit dissous en % de sol sec à 105 °C ** : après déduction du calcaire
 Ki = SiO₂/Al₂O₃ mol ; Kr = SiO₂/Al₂O₃ + Fe₂O₃

Tableau 2 - Composition chimique élémentaire de l' « extrait-triacide », normalisée à 100 %

échantillon	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO ₂	P ₂ O ₅	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Ki	Kr	Taux extrait**
OZI 1	59,78	22,83	12,23	1,22	0,05	0,09	1,22	1,43	0,83	0,33	4,44	3,30	73,60
OZI 3	56,22	28,49	10,60	1,09	0,03	0,03	0,95	1,66	0,68	0,24	3,34	2,70	78,26
OZI 4	61,92	21,57	10,27	1,09	0,06	0,13	1,57	2,31	0,63	0,45	4,86	3,72	73,48
OZI 6	59,80	18,72	11,20	1,00	0,07	0,03	1,11	2,31	0,71	0,51	5,42	3,91	71,86
OZI 8	64,45	19,28	10,52	1,16	0,07	0,03	1,08	2,24	0,69	0,50	5,66	4,19	74,17
OZII 1	55,44	26,85	11,76	1,67	0,04	0,13	1,72	1,59	0,41	0,40	3,50	2,73	62,95
OZII 2	56,87	30,42	10,72	1,41	0,06	0,11	0,83	1,62	0,50	0,47	3,00	2,45	74,62
OZII 3	51,30	29,27	11,98	1,18	0,12	0,14	1,49	2,83	1,29	0,39	2,97	2,35	75,15
OZIII 1	43,42	42,26	8,23	1,13	0,05	0,73	2,79	0,82	0,20	0,37	1,74	1,56	73,47

* : taux de produit dissous en % de sol sec à 105 °C (y compris H₂O)
 Ki = SiO₂/Al₂O₃ mol ; Kr = SiO₂/Al₂O₃ + Fe₂O₃ mol

Tableau 3 - Composition chimique élémentaire de l' « extrait-triacide », normalisée à 100 %, sur la fraction inférieure à 2 µ

Séquence de Bolívar

Dans le profil QZI, le rapport $Ki (SiO_2/Al_2O_3, \text{ mol})$ du produit extrait du matériau global et de la fraction argileuse est respectivement de 4,2 et 4,4 dans le sol actuel, 3,0 et 3,3 dans le premier paléosol, 4,0 et 4,9 dans le deuxième paléosol, 5,9 dans la première *cangabua* (qui bien qu'encroûtée de calcaire paraît un peu plus siliceuse que le sol sus-jacent), 5,3 et 5,4 dans le troisième paléosol, 5,5 à 5,0 et 5,7 dans la deuxième *cangabua*, qui ne semble pas significativement plus siliceuse que le sol sus-jacent. On remarque que l'extrait de la fraction argileuse est légèrement plus siliceux que celui de sol total, peut-être parce que l'argile contient un peu de silice non cristalline.

Dans le profil QZII, le taux de résidu inaltéré est un peu plus élevé dans le tuf (68,35) que dans le sol au-dessus (59,4) qui dérive probablement de la même émission pyroclastique. Le tuf est un peu moins altéré que le sol ; son degré d'altération est proche de la deuxième *cangabua* du profil QZI.

Cependant, les produits d'altération du profil QZII sont nettement plus désilicifiés que ceux du profil QZI : le rapport Ki de l'extrait du sol global et de la fraction argileuse est respectivement de 3,6 et 3,5 dans l'horizon 1, 3,0 et 3,0 dans l'horizon 2, 3,3 et 3,0 dans l'horizon de tuf. Le premier paléosol est un peu moins altéré et désilicifié que le second. Dans celui-ci il n'y a pas de différence dans l'argile d'altération du sol et du tuf altéré sous-jacent. Ce qui distingue donc les produits argileux d'altération des deux *cangabuas* du profil aval et du tuf dans le profil amont, c'est surtout la proportion de silice, plus élevée à l'aval, et inversement celle d'alumine, plus élevée à l'amont. En outre, il y a une certaine accumulation de calcaire à l'aval, tout particulièrement dans le deuxième paléosol et la première *cangabua*. On remarque que la composition de l'extrait argileux est très proche de l'extrait du sol global dans le profil QZII ; la présence de silice non cristalline y est moins probable que dans le profil QZI.

Dans le profil QZIII, proche du *páramo*, l'horizon de cinérite du paléosol n'est encore que partiellement altéré : son taux de résidu inaltéré est de 41 %, mais le rapport Ki dans l'extrait du sol global et dans la fraction argileuse est respectivement de 1,85 et 1,74. Le produit argileux d'altération est donc plus fortement désilicifié à la partie supérieure de la séquence en condition climatique très humide. C'est sans doute la cause de la friabilité de cette formation et de l'absence de formation indurée de type *cangabua* à l'amont de la séquence (Winckell *et al.*, 1993).

Profil du páramo (PAR)

Le taux de résidu inaltéré dans l'extrait de sol global est successivement dans l'andosol, le premier tuf et le deuxième : 57, 75 et 52 %. L'altération n'est donc encore que partielle. Le rapport Ki de l'extrait du produit d'altération va croissant du sol au deuxième tuf, de 1,6 à 2,2 et 2,5. La désilicification est plus marquée dans le matériau très poreux de l'andosol en surface que dans les tufs sous-jacents, qui ont conservé encore leur caractère consolidé et peu perméable.

Autres *cangahuas*

- *Cangahua CAN et cinérite accrétonnée CIN du site de Cangahua*
Ces deux matériaux présentent un taux de résidu inaltéré respectif de 60 et 59 %, un rapport Ki de l'extrait de sol global de 4,6 et 4,2. Cette *cangahua* est aussi altérée, mais un peu plus désilicifiée et moins calcaire que la première *cangabua* du profil QZI de Bolívar.
- *Cangahuas AMB et LIC d'Ambatillo et de Licto*
La *cangabua* d'Ambatillo est un peu calcaire. Son taux de résidu inaltéré est de 54 % et la valeur Ki de l'extrait de sol global est de 4,5. Sa composition est donc très proche de celle du site Cangahua. La *cangabua* de Licto a un taux de résidu inaltéré de 61 % et une valeur Ki de l'extrait du sol global de 5,14. Sa composition est peu différente de celle d'Ambatillo, mais plus proche de la deuxième *cangabua* du profil QZI de Bolívar.

Composition minéralogique

Les différents horizons de sol, *cangabua* et tuf altéré sont constitués de verres et minéraux volcaniques, ainsi que de leurs produits d'altération : argiles, oxyhydroxydes de fer et éventuellement calcite et opale.

MINÉRAUX VOLCANIQUES PRIMAIRES

La *microscopie optique* montre l'abondance de verres incolores (dacitiques et rhyolitiques) et de feldspaths ; il s'agit surtout de plagioclases de type *labrador* et andésine,

et éventuellement de feldspaths sodi-potassiques proches de l'anorthose et de la sanidine. Il y a aussi une quantité importante (10 à 20 %) de minéraux ferro-magnésiens, toujours un peu de magnétite et souvent du quartz, mais en traces ou en petite quantité. Parmi les ferro-magnésiens prédomine une amphibole sodique, la hornblende verte ; il y a fréquemment un peu ou très peu d'un pyroxène verdâtre et un peu sodique, de type augite-ægyrine, plus rarement de la biotite, très rarement de l'augite incolore (calcique) et de l'olivine, exceptionnellement de l'hypersthène ; ces trois derniers minéraux ne sont présents qu'en très faible quantité. Les minéraux volcaniques de haute température, feldspaths, pyroxènes et amphiboles, sont souvent craquelés, signe probable d'un refroidissement brusque lors d'une éruption « phréato-magmatique ». La présence (plutôt rare) de verres basaltiques altérés en palagonite de couleur orange limpide pourrait renforcer cette hypothèse.

On observe souvent un mélange de flux magmatiques, à savoir dans un ensemble à prédominance dacitique, la présence parfois de quelques « clastes » (fragments) de lave basaltique (à augite et olivine) ou andésitique, ou bien un mélange de clastes de laves dacitiques et de ponces rhyolitiques. La plupart des phénocristaux et clastes de laves sont intacts ou peu altérés, seules les particules de verre les plus fines étant transformées en argile.

La diffraction de rayons X sur poudre globale permet de détecter essentiellement les feldspaths, la hornblende, le quartz et la biotite, mais pas les pyroxènes, ni l'olivine, ni la magnétite, sans doute en quantité trop faible pour être différenciés nettement dans ce mélange. Parmi les feldspaths ne ressortent clairement que les raies de plagioclase de type *labrador*, probablement mêlé à l'andésine, mais pas ou peu les feldspaths sodi-potassiques (petite raie à 0,324 - 0,325 nm). La présence éventuelle de cristobalite n'a été différenciée des plagioclases (par un accroissement relatif de raie à 0,405 nm) que dans le résidu de dissolution acide de certaines fractions argileuses.

La comparaison des diffractogrammes de rayons X sur poudre globale permettent de caractériser différentes séries de matériaux originels dans un même profil, par exemple QZI de Bolívar, ainsi que différencier ou apparenter les divers types de *cangabua* étudiés.

- **Profil QZI** : Les minéraux essentiels sont les plagioclases et la hornblende. On note une variation de la hornblende : abondante dans le sol actuel (horizons 1 et 2) ; elle disparaît dans le premier paléosol (horizon 3), puis réapparaît mais faiblement dans le deuxième paléosol (horizons 4 et 5), notamment la *cangabua* supérieure encroûtée de calcite ; enfin elle augmente sensiblement dans le troisième paléosol (horizons 6, 7 et 8), notamment la *cangabua* inférieure (horizons 7 et 8). La quantité de quartz est très faible ; elle n'est appréciable que dans le sol actuel (horizons 1 et 2) et dans la deuxième *cangabua* (horizons 7 et 8) ; ailleurs, elle est nulle. La biotite apparaît seulement en traces dans le sol superficiel.
- **Profil QZII** : Les plagioclases demeurent les minéraux majeurs. Dans les trois horizons étudiés il y a peu de différence. Il y a une quantité notable de hornblende et de quartz. Cependant, ces deux minéraux augmentent sensiblement dans les horizons 2 et 3, surtout dans le tuf (horizon 3), en même temps qu'apparaissent des traces de biotite altérée (raie à 1 nm masquée par celle d'halloysite) ; ceci indique un gradient d'altération du tuf au sol au-dessus.
- **Profil QZIII** : Dans l'horizon de cinérite n'apparaissent quasiment que les plagioclases. Il n'y a que des traces de hornblende, de quartz et de biotite altérée.
- **Profil du páramo** : Dans les trois horizons (andosol / tuf gris / tuf brun), les feldspaths (surtout plagioclases et un peu de sodi-potassiques probable) prédominent encore, mais la hornblende est abondante, le quartz toujours présent augmente dans le tuf inférieur. La biotite altérée n'est détectée qu'en traces dans l'horizon 2.
- **Cangabua CAN et cinérite CIN du site de Cangahua** : Ces matériaux présentent essentiellement des plagioclases. Il y a un peu de hornblende dans le tuf, seulement des traces dans la cinérite accrétonnée. On ne détecte pas de quartz sinon des traces, ni de biotite.
- **Cangabua AMB de Ambatillo et LIC de Licto** : Ces matériaux ne présentent quasiment que des plagioclases, et seulement des traces de hornblende, mais pas de quartz ni de biotite, si ce n'est des traces dans la *cangabua* de Licto.

MINÉRAUX SECONDAIRES D'ALTÉRATION

Les produits secondaires sont essentiellement des minéraux argileux (aluminosilicatés). Il s'y ajoute éventuellement de la calcite, ainsi que des oxyhydroxydes de fer et d'aluminium et des oxydes de silice, mais ces derniers sont mal cristallisés ou paracrystallins. La diffraction de rayons X sur poudre globale et sur la fraction argile (< 2 µm) n'a permis de déterminer que certaines argiles assez bien cristallisées et la calcite quand elle est suffisamment abondante (en petite quantité, la raie vers 0,303 nm est commune avec le *labrador*, toujours abondant). Toutefois, il n'a pas été possible ainsi de déterminer l'allophane, ni l'opale, ni les oxyhydroxydes de Fe et Al qui semblent toujours mal cristallisés. L'allophane a été déterminée par extraction à l'oxalate sur quelques échantillons du sol au-dessus de la *cangabua* en position aval, puis d'un andosol, d'une cinérite et de deux tufs altérés en position amont. L'opale n'a pas été observée en microscopie, elle a été analysée par extraction sélective. La calcite n'est abondante que dans le profil QZI de Bolívar dans la *cangabua* supérieure, qui est fortement encroûtée de calcaire en surface et dans la masse. Dans d'autres *cangabuas* (CAN, AMB, LIC) elle a été observée en microscopie et déterminée par dosage chimique.

Détermination des minéraux argileux

Dans les matériaux étudiés, les minéraux argileux sont le plus souvent désordonnés ou mal cristallisés et difficiles à déterminer. Dans les *cangabuas* des piémonts subarides (position aval), il semble que prédomine une argile 2:1 désordonnée à comportement de smectite (argile gonflante), voire parfois une argile mal cristallisée (« allophane-siliceuse et ferrifère », présentant une seule raie distincte vers 0,445 nm). Plus en amont se révèle mieux des argiles 1:1 de type halloysite (à 0,7 et 1,0 nm), mêlées ou non d'argile 2:1. En amont, près du *páramo* et sur le *páramo*, prédomine l'allophane (alumineuse, Si/Al = 0,5), mais des argiles 1:1 (halloysite 1,0 nm) et 2:1 (smectite, illite, illite-vermiculite) peuvent apparaître en petite quantité dans des tufs altérés de formations pyroclastiques « anciennes », sous l'andosol. Ceci est visible dans la séquence de Bolívar et le sol du *páramo*.

Séquence de Bolívar

- *Profil QZI* : Dans le sol actuel (horizons 1 et 2), l'argile est surtout constituée d'une smectite désordonnée, d'un peu d'illite (biotite altérée) et d'halloysite à 0,7 nm. L'horizon 3 du premier paléosol contient au moins deux fois plus d'halloysite à 0,7 nm que de smectite, et seulement des traces infimes d'illite. Cet horizon étant plus altéré et désilicifié que le sol actuel, sa formation se serait faite en climat plus humide et peut être aussi pendant une durée plus longue. Dans les horizons 4 et 5 du deuxième paléosol, la smectite désordonnée prédomine ; il n'y a que des traces d'halloysite à 0,7 nm et pas d'illite ; la *cangabua* est riche en calcite. Ce sol se serait donc formé en climat subaride (peut être plus aride que l'actuel). Dans les horizons 6, 7 et 8 du troisième paléosol, se retrouve la même composition des argiles, mais sans la calcite, si ce n'est des traces ; ce sol se serait aussi formé en climat subaride, mais sans l'épisode terminal plus aride qui, dans la *cangabua* supérieure, a provoqué l'accumulation de calcite.
- *Profil QZII* : Dans les trois horizons prédomine l'halloysite à 0,7 nm. Cette formation correspond plus à un climat subhumide. Cependant, dans le premier horizon étudié (premier paléosol), il y a un peu de smectite mal cristallisée, mais il n'y en a pas (sinon des traces dans le deuxième horizon) dans le sol sous-jacent (deuxième paléosol) et notamment dans le tuf altéré, où l'on note aussi de l'illite (biotite altérée).
- *Profil QZIII* : L'horizon de cinérite altérée contient surtout de l'allophane et seulement des traces d'halloysite hydratée à 1 nm. Cette formation profonde s'est altérée en climat humide.

Profil du *páramo* de Pimampiro (PAR)

L'argile de l'andosol actuel (PAR.1) est constituée uniquement d'allophane. Dans le tuf gris (PAR 2) sous-jacent prédomine encore l'allophane, mais il contient une argile 2:1 à comportement

d'interstratifié illite-vermiculite (raie à 1,12 nm stable au glycol, qui passe à 1,01 nm après chauffage à 500 °C), qui serait une altération de la biotite. Dans le tuf brun (PAR 3) inférieur, outre l'allophane, apparaît une quantité importante de minéraux argileux à prédominance d'halloysite à 1,0 nm et seulement des traces d'une argile 2:1 désordonnée à 1,4 nm. Tous les horizons semblent présenter des traces de cristobalite.

Détermination de l'allophane (tableau 4)

Les produits non cristallins d'Al, Fe et Si ont été extraits par l'oxalate d'ammonium pour déterminer l'allophane (sur la base Si-ox). Dans le cas d'andosols, les mêmes éléments ont été extraits en outre par le pyrophosphate de sodium pour évaluer les formes complexées par des acides humiques, qui ne viennent pas de l'allophane.

Echantillon	Pyrophosphate						Pyrophosphate			
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Ki	Al + 1/2 Fe	Allophane	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Alp/Alo
QZI 1	0,05	0,12	0,26	-	0,18	0,18	-	-	-	-
QZII 1	0,04	0,11	0,22	-	0,16	0,16	-	-	-	-
QZIII 1	5,61	0,68	9,25	1,03	5,14	19,35	0,09	0,06	0,44	0,05
PAR 1	3,27	1,85	7,70	0,72	4,73	11,28	0,09	0,73	1,48	0,19
PAR 2	2,65	0,42	4,30	1,05	2,42	9,14	-	0,03	0,30	0,07
PAR 3	0,69	1,11	1,53	0,77	1,16	2,38	0,08	0,23	0,42	0,27

Ki = SiO₂/Al₂O₃ mol. ; Allophane = taux calculé sur base Si-ox (SiO₂ x 3,45 pour allophane Al type imogolite ; Alp/Alo = Al pyrophosphate / Al oxalate

Tableau 4 - Extraits Oxalate et Pyrophosphate d'éléments Al, Fe, Si (en % sol sec à 105 °C)

Dans les sols à l'aval du piémont (horizons QZI 1 et QZII 1), il n'y a quasiment pas d'allophane et très peu d'oxydes non cristallins d'Al et de Fe.

Le sol amont (QZIII 1) et celui du *páramo* (PAR 1) contiennent 19 et 11 % d'allophane (alumineuse Ki = 1) et un peu d'oxyde de fer non cristallin. La fraction d'alumine complexée par l'humus est relativement faible (Alp/Alo < 0,2).

Le tuf gris du *páramo* (PAR 2) contient 9 % d'allophane, mais pas d'oxyde d'Al complexé. Le tuf brun (PAR 3) ne contient que 2,4 % d'allophane, car il contient des minéraux argileux, mais également peu d'oxyde d'Al complexé. Peut-être le deuxième tuf s'est altéré en climat moins humide, ou plus probablement la formation d'argile s'explique par un moindre drainage à la base du sol actuel (signes d'oxy-réductimorphie).

Formes de Si et Al extraites par la soude, NaOH 0,5 N, à 20 et 50 °C (tableau 5)

En plus des échantillons déjà mentionnés, nous avons également déterminé les formes de silice sur deux échantillons supplémentaires de *cangahua* (ZE-1 prélevé à Cangahua et ZE-3 prélevé à La Tola)

La soude à 20 °C permet de discriminer une phase a rapidement soluble à l'état de gel de silice, éventuellement mêlée à de l'allophane, d'une phase b lentement soluble et mieux cristallisée.

Echantillons de *cangahua* du piémont sub-aride (QZI-5, 6 et 8 + AMB + ZE-1 et 3)

La phase a ne contient pas ou seulement des traces d'Al, donc pas (ou des traces) d'allophane, ni d'alumine ; il s'agit surtout d'un gel de silice (légèrement alumineux), au taux de 0,1 à 0,3 % de SiO₂. Les

valeurs les plus élevées de 0,2 à 0,3 % sont observées dans la *cangabua* inférieure de Bolivar et les *cangabuas* de Cangahua et de La Tola.

La phase b contient un peu plus d'Al, mais surtout encore de la silice ; le rapport Silice/Alumine molaire (Ki) varie de 6 à 9 et il est bien supérieur à celui d'allophane et de minéraux argileux. Il ne s'agit pas de verres volcaniques dont la dissolution est très lente dans ces conditions, mais donc d'un mélange d'opale non cristalline (opale A de très petite taille) et de traces d'allophane. Ce produit ne représente que 0,3 à 0,7 % du sol.

Echantillon de tuf altéré à la base d'un sol à mi-pente, en climat sub-humide, QZII 3

La phase a est presque nulle ; il n'y a que des traces de gel de silice. La phase b ne représente que 0,35 % du sol ; donc elle n'est pas plus abondante que dans les *cangabuas* du piémont inférieur, mais elle est relativement un peu plus alumineuse (Ki de 3,3).

Echantillon de tuf altéré à la base d'un andosol du páramo, en climat perhumide, PAR-3

Les phases a et b sont abondantes (respectivement 1,64 à 1,31 % du sol). La phase a est très alumineuse ; le rapport Ki de 0,7 suggère un mélange d'un gel d'alumine et d'allophane. La phase b est plus siliceuse. Le rapport Ki de 1,7 suggère une prédominance d'allophane ou halloysite fine.

La soude à 50°C permet de mieux discriminer dans la phase a (rapidement soluble) les formes de gels et minéraux paracrystallins tels que allophane et opale A fine, des formes mieux cristallisées et plus stables dans la phase b, telles que halloysite, opale biologique de grande taille (phytolithes).

Echantillons de cangahua du piémont subaride (QZI-5, 6 et 8 ; AMB ; ZE-1 et 3)

Dans la phase a se retrouve l'ensemble de l'extrait par la soude à 20°C. Le produit total représente 0,45 à 1,1 % du sol. Il est presque toujours très siliceux, le rapport Ki variant de 7 à 13 ; il contient donc surtout un gel de silice et de l'opale très fine, mais très peu d'allophane.

La phase b représente 1,6 à 3,6 % du sol ; elle est généralement très siliceuse, puisque le rapport Ki varie de 6 à 14, sauf dans l'échantillon AMB. Ces valeurs élevées de Ki suggèrent une abondance relative en opale, mêlée à un peu d'argiles (smectites mal cristallisées).

L'échantillon AMB contiendrait moins d'opale et plus d'argile ; il est situé en position relativement plus élevée et plus humide que les autres *cangabuas* du piémont. La *cangabua* inférieure de Bolivar (QZI-6 et 8) se distingue nettement de la *cangabua* supérieure (QZI-5), non par la valeur Ki, mais par une teneur double en silice extractible (3,7 % au lieu de 1,7 %). Elle est donc plus silicifiée, et en même temps non (ou très peu) calcaire. Ceci suggère (et confirme) une condition de formation plus humide pour la *cangabua* inférieure, que pour la *cangabua* supérieure.

Echantillon du tuf altéré à la base d'un sol à mi-pente (QZII-3) en climat subhumide

Le produit de la phase a est peu abondant (0,44 % du sol) et relativement plus siliceux (Ki de 7,6) qu'alumineux ; il contient donc un peu d'opale très fine et très peu d'allophane. La phase b est abondante (4,1 % du sol). Elle est relativement alumineuse et ne contient pas d'opale ni d'allophane, mais d'après la valeur Ki de 2,7 un mélange d'halloysite et de smectite à prédominance de la première (ce qui confirme la minéralogie).

Echantillon de tuf altéré à la base d'un andosol du páramo (PAR 3) en climat perhumide

L'extrait de la phase a est abondant (4,4 % du sol) ; la valeur Ki de 1,3 suggère une prédominance d'allophane alumineuse (8 % du sol). La phase b, plus stable, est relativement plus siliceuse ; le rapport Ki de 1,9 est proche de celui de l'halloysite, ce qui confirme encore l'analyse minéralogique (halloysite hydratée à 1 nm). (A noter que la quantité d'allophane extraite par la soude est beaucoup plus élevée (3 fois) que celle obtenue par l'oxalate d'ammonium, en une seule extraction.

Les *cangabuas* du piémont inférieur, en climat subaride, contiennent donc une faible quantité de silice non cristalline sous forme de gel, d'opale très fine et probablement d'opale biologique (plus stable) ; la phase argileuse plus stable est siliceuse (argiles 2:1 proches de smectites). La *cangabua* inférieure est plus silicifiée que la *cangabua* supérieure, plus encroûtée de calcaire, donc formée en climat plus aride. À mi-versant, le

tuf altéré ne contient pas de gel de silice et probablement une très faible quantité d'opale fine ; la phase argileuse plus stable est nettement plus alumineuse que dans la *cangahua* du piémont inférieur (mélange d'argiles 1:1 et 2:1 à prédominance d'halloysite). Au sommet sur le *páramo*, le tuf altéré est surtout constitué d'allophane alumineuse, sans évidence de silice non cristalline, mais plutôt de traces de gel d'alumine ; la composition de la phase argileuse plus stable est proche d'une argile 1:1 (halloysite).

Pétrographie

Nous avons observé en lame mince surtout des horizons indurés, objet de cette étude, et seulement en microscopie optique, à savoir :

- Séquence de Bolívar : Profil QZI - horizons 2 (Ctx), 5b (4 Ckm), 6 (5 Bx), 8 (5 Cm) et 5a (K) la croûte calcaire ; Profil QZII - horizon 3 (3Ctx) ;
- Profil du *páramo* : horizons 1 (A), 2 (2 Cx), 3 (3 Cx)
- *Cangahuas* diverses : CAN (2 Ckm) et cinérite (CIN) de Cangahua, AMB (2 Cm) d'Ambatillo et LIC (2 Ckm) de Licto.

SÉQUENCE DE BOLÍVAR

Profil QZI

D'une manière générale on observe l'abondance d'un squelette minéral grossier in-altéré ou faiblement altéré, à distribution « porphyrique » (aléatoire), ainsi qu'un plasma dense, microporeux et mixte, formé d'une pâte de verre très fin partiellement altéré en argile jaune clair, d'une argile brune plus ou moins imprégnée d'oxyde de fer, diffuse et peu abondante, et de microcristaux de feldspath. La couleur du plasma argileux varie de brun rougeâtre dans la *cangahua* supérieure (horizon 5b), à brun jaunâtre pâle dans la *cangahua* inférieure (horizons 6, 7 et 8).

Le squelette grossier est constitué surtout de feldspaths, de hornblende verte, de verre rhyodacitique et de petits grains de magnétite. Il comporte souvent quelques « clastes » (petit fragment anguleux) de lave (ponce rhyo-dacitique, lave dacitique ou andésitique), des éclats de quartz, parfois de la biotite altérée et des traces de pyroxène proche de l'augite ægyrine ou de l'hyperstène. La hornblende et les plagioclases sont plus abondants dans les dépôts dacitiques (horizons 2, 6, 7 et 8), tandis que les dépôts rhyo-dacitiques (horizon 5) contiennent plus de feldspaths apparemment sodi-potassiques et souvent craquelés, qui paraissent plutôt proches de l'anorthose et de la sanidine (à vérifier).

La matrice a généralement un aspect dense et continu, mais microporeux. Elle est toujours traversée de chenaux et de cavités biologiques irrégulières. Elle peut être fissurée et révéler une structure pédologique (fragmentation ou pédoplasmation).

Dans l'horizon 2 (Ctx) de ponce altérée à la base du sol actuel, il y a très peu de fissures et d'agrégats pédologiques, mais seulement une redistribution localisée de particules dans quelques larges chenaux biologiques en forme de « doigt de gant », ainsi que de nombreuses petites cavités biologiques, isolées ou connectées. Dans l'horizon 5b (4 Ckm) de la première *cangahua* encroûtée de calcaire, la matrice est fragmentée par de nombreuses fissures courbes et irrégulières qui délimitent des agrégats en polyèdre ou en cube à angles arrondis, mais sans montrer un réarrangement plasmique strié typique d'un vertisol. En fait il s'agirait plus d'une fragmentation que d'une pédoplasmation ou une bioturbation, car l'arrangement du plasma et du squelette n'est pas modifié et le vide interagrégat demeure très mince. Cependant, de nombreux chenaux fins et cavités biologiques traversent la matrice. Dans l'horizon 6 (5 Bx) la structure de la matrice est semblable, fissurée en polyèdres subarrondis, mais la couleur est brun-jaune pâle au lieu de brun-rougeâtre. Dans l'horizon 8 (5 Cm), l'organisation de la matrice est massive, seulement coupée de quelques fissures planaires fines, surtout horizontales. L'assemblage du tuf originel est assez bien conservé ; la couleur de la matrice est brun pâle. Celle-ci est traversée de quelques chenaux et cavités espacés. Ainsi le passage de la structure massive du tuf (5 Bcm) à celle polyédrique du sol au-dessus (5 Bx) est plus due à la fragmentation qu'à une pédoplasmation ; en outre s'y accroît dans le sol la pénétration biologique.

Tous les horizons indurés présentent d'autres traits pédologiques : surtout d'illuviation d'argile et parfois de limon en remplissages ou revêtements microlaminés, et plus rarement de petits pseudo-nodules rouge sombre de diffusion et concentration d'oxyde de fer et d'humus près des vides. L'accumulation de calcite n'est très évidente que dans la croûte calcaire foliacée (couches alternées de sparite et de micrite), qui recouvre et pénètre le sommet et les larges fentes de l'horizon sus-jacent la première *cangabua* (horizon 4).

Dans la matrice brun rougeâtre sombre de cette *cangabua*, la calcite est présente, mais discrète, très fine et intimement mêlée au plasma d'argile et fines particules de verre ; elle est donc difficile à distinguer en microscopie optique et on l'observe peu dans les cavités et les fissures. Dans les autres horizons consolidés (2, 7 et 8), aucun remplissage de vide par de la calcite n'a été observé, bien que des traces de calcaire aient été détectées par analyse chimique. L'accumulation de silice sous forme d'opale, suspectée dans les horizons indurés, n'a pas été nettement identifiée au microscope. Cependant dans l'horizon 6 (5 Bx), on remarque quelques remplissages incolores et limpides dans quelques fissures ou des remplissages jaune pâle dans des cavités, peu biréfringents en lumière polarisante (et à extinction diffuse) qui pourraient être de l'opale non cristalline (à vérifier). La présence de phytolithes siliceux a été rarement observée dans quelques vides des horizons 6 et 8.

Les « argilanes » sont constitués d'une argile limpide, jaune à jaune pâle. Les dépôts sont microlaminés, mais le litage est peu apparent en l'absence d'oxydes de fer associés. L'argile, très biréfringente et colorée en lumière polarisée, est de type smectite ; les feuillets sont bien orientés (extinction régulière en LP).

Dans l'horizon 2 (Ctx) l'illuviation est nette, mais limitée à un film fin sur le bord des fissures et de quelques cavités biologiques ; elle semble aussi diffuser dans la matrice et autour des grains du squelette. Dans la *cangabua* supérieure (horizon 5), les revêtements argileux sont minces ; dans des remplissages plus épais ils paraissent associés à de fins cristaux de calcite (teintes irisées des lamines d'argile en LP). Dans l'horizon 6 (5 Bx), au sommet de la *cangabua* inférieure, les revêtements argileux sont très discrets : minces, de couleur très pâle, à orientation irrégulière ou microlaminée et extinction diffuse en LP ; ils pourraient être mêlés à de l'opale ; un mince dépôt rougeâtre (humoferrugineux) provenant du sol au-dessus, donc postérieur, apparaît rarement à leur surface. Dans l'horizon 8 (5 Cm), à la base de la *cangabua* inférieure, les revêtements microlaminés d'argile jaune autour de larges cavités biologiques sont plus typiques, mais peu nombreux ; certains sont mêlés d'un peu de limon.

Profil QZII - Horizon 3 (Ctx) de tuf brun

Cet horizon de tuf brun altéré à la base du paléosol semble l'équivalent de la *cangabua* inférieure du profil QZI (horizon 8). Comme celle-ci, il a conservé une structure massive, non fissurée, seulement traversée de cavités et quelques chenaux biologiques. Ici encore le squelette minéral grossier est peu altéré et abondant. Le plasma brun jaune pâle de la matrice est composé de fines particules de verres et minéraux, envoyées par une argile d'altération jaune limpide diffuse et peu abondante. Cette argile, peu biréfringente et non orientée, est constituée surtout d'halloysite (à 1,0 nm). On observe une illuviation importante d'argile jaune ou jaune orangé limpide en de typiques remplissages ou revêtements microlaminés dans les cavités et chenaux biologiques. Cette argile est souvent accompagnée de limon, en mélange ou en dépôt alterné. La couleur jaune orangé indique un mélange important d'oxyde de fer lié à l'argile. Il y a une certaine diffusion d'oxyde de fer en pseudo-nodule ou plage rouge foncé près de certains vides. Au centre de l'une des cavités, on a observé une plage de remplissage argileux blanchi, mais sans altération de l'argile microlaminée ni une silicification apparente (orientation bien visible en LP). Il n'y a pas ou peu de phytolithes visibles, ni de dépôts de calcite.

La comparaison entre le tuf altéré du profil QZII et la *cangabua* inférieure du profil QZI fait ressortir quelques différences que l'on peut relier à la situation en climat plus humide du premier en position amont, ou plus aride du second en position aval. À

l'amont se manifeste une illuviation plus marquée d'argile, une couleur plus rouge des revêtements, une ségrégation plus nette d'oxydes de fer et une argile moins biréfringente (de type halloysite). Mais il est étonnant que le degré d'altération des minéraux grossiers du squelette y reste quasi identique, c'est-à-dire faible. Une autre différence distingue le profil amont du profil aval : l'absence d'équivalent de la *cangahua* supérieure encroûtée de calcaire. Celle-ci en outre manifeste davantage de modifications structurales dues à la pédogenèse en climat plus aride, à savoir la fragmentation de la matrice en agrégats. L'aridité à l'aval se marque par la fragmentation liée au processus alterné de gonflement et retrait, et par l'accumulation de calcite, mais elle s'accompagne aussi d'un moindre degré d'illuviation argileuse et de ségrégation d'oxyde de fer. La *cangahua* supérieure du profil aval se serait formée en condition plus aride que la *cangahua* inférieure et que le sol actuel.

ANDOSOL ET TUF DU PÁRAMO

Les deux tufs du *páramo* ne peuvent probablement pas être apparentés aux deux *cangahuas* du profil aval (QZI) de Bolívar, mais il est intéressant tout d'abord de bien distinguer une structure d'andosol dérivé de cendres volcaniques récentes de celle de deux tufs altérés en-dessous. En outre, il est utile de comparer les deux tufs altérés en condition perhumide aux formations analogues de *cangahua* altérées en climat subhumide (tuf brun de QZII) ou subaride (2 *cangahuas* de QZI).

Dans les trois horizons de l'andosol et des deux tufs il y a abondance du squelette de minéraux et verres peu altérés. Le sol (PAR 1) se distingue par son plasma brun rougeâtre foncé, très humifère et abondant, structuré en micro-agrégats ovoïdes et en polyagregats denses. La matrice est traversée par de nombreux chenaux et cavités biologiques connectées. Le squelette paraît dispersé dans le plasma. Au contraire, dans les tufs le plasma est de couleur brun pâle, très dense ; il n'y a pas de structure pédologique en agrégats. Le squelette est très abondant. Le plasma est constitué d'un mélange de fines particules de verre, de microcristaux et d'une argile jaune limpide diffuse, peu abondante. Dans le tuf supérieur (PAR 2), très peu altéré, il n'y a que quelques fissures planes, chenaux et cavités biologiques épars ; la matrice est surtout formée de fibres et plaquettes de verre peu altéré et peu d'argile. Le tuf inférieur (PAR 3) est plus altéré ; il y a quelques fissures et chenaux biologiques sub-horizontaux reliant de nombreuses cavités ; la porosité est plus développée ; la matrice est plus argileuse.

Dans le sol comme dans les tufs altérés il n'y a aucun revêtement argileux visible dans les cavités ou fissures ; donc pas d'illuviation d'argile ni d'oxyde de fer. Cependant, dans l'andosol on observe quelques fins revêtements noirs d'humus illuvié sur le bord de quelques vides. La ségrégation du fer n'est pas évidente dans l'andosol, mais quelques rares pseudo-nodules de couleur jaune-orange (argile + oxyde de fer), apparaissent dans le tuf supérieur, épars. Ils sont plus développés et plus ferrifères (orange et rouge foncé), mais encore dispersés, dans le tuf inférieur.

Le plasma argileux d'allophane et oxyde de fer non cristallin est isotrope et opaque en LP dans le sol et le tuf supérieur, tandis que dans le tuf inférieur le plasma est moins opaque en LP, gris, mais non biréfringent ; il contient un mélange d'allophane et d'halloysite. On note dans le tuf supérieur l'abondance de verre rhyolitique et la très faible formation d'argiles, qui montre l'âge récent de cette formation, probablement holocène, donc plus jeune que la *cangahua* supérieure de Bolívar.

Les tufs altérés du *páramo* se distinguent aussi de la *cangahua* de Bolívar par l'absence de traits d'illuviation d'argile. Malgré un climat très humide leur degré d'altération est encore très limité, notamment dans le tuf supérieur sous l'andosol.

AUTRES CANGAHUAS

Les trois *cangahuas* étudiées, éloignées de Bolívar mais en climat semblable, subaride, ont cependant des caractères voisins de celles du profil aval (QZI) de Bolívar, notamment la *cangahua* inférieure (horizon 8), à savoir : l'abondance du squelette de minéraux et verres peu altérés, la composition dacitique du matériau originel, une matrice

dense et microporeuse, une structure massive ou faiblement fragmentée par des fissures, mais sans marque de pédoplasmation, et traversée de chenaux et vides biologiques. Elles se distinguent des *cangabuas* de Bolívar par l'absence de traits d'illuviation argileuse et ferrugineuse. Elles ne présentent que des remplissages discrets de calcite dans quelques vides, mais pas d'évidence de silicification.

AMB, Ambatillo

La particularité du matériau originel pyroclastique est d'être un peu plus calcique que celui des *cangabuas* de Bolívar, car il contient outre les produits dacitiques et rhyolitiques un peu de clastes de lave basaltique à *labrador*, augite et olivine. La structure massive du tuf initial n'est que peu fragmentée par des vides planaires, sans agrégats pédologiques. La présence très discrète de nodules de cinérite accrétonnée, ainsi que l'altération rouge sombre des verres basaltiques (en palagonite ?) sans altération de l'olivine et l'aspect craquelé du *labrador* suggèrent une émission phréato-magmatique. Il n'y a aucun revêtement argileux, seulement de très rares nodules de diffusion fer-humus. Cependant on observe quelques revêtements et remplissages de calcite fine en aiguilles et en plaquettes dans des vides biologiques. On note un remplissage exceptionnel d'amas en rosette de fines aiguilles incolores en LN, brillantes en LP, qui pourraient être d'opale-cristobalite. Le plasma matriciel brun rougeâtre en LN et faiblement biréfringent en LP est constitué de fines particules de verre altéré et d'un mélange de smectite et d'oxyde de fer.

CAN et CIN de Cangahua

Le matériau originel pyroclastique ne contient que des traces de lave basaltique altérée en rouge sombre et de verre basaltique orangé altéré en palagonite. Cependant, la présence de larges boules de cinérite accrétonnée dans cette formation suggère une émission phréatomagmatique. Dans ce cas, la partie supérieure de la *cangabua* que nous avons observée (*CAN*) est encroûtée de calcaire en surface et dans les fentes larges, mais pas dans sa masse. Elle est nettement fragmentée par des fissures fines et irrégulières, en petits agrégats cubiques et polyédriques à angles arrondis, mais sans signe de pédoplasmation. Il y a abondance de chenaux et cavités biologiques. Il n'y a aucun revêtement argileux ou siliceux, ni nodule ferrugineux, tout au plus une faible diffusion ferrugineuse autour de minéraux et de fissures, mais on observe dans quelques cavités des revêtements et remplissages de calcite fine en aiguilles et plaquettes. Le plasma matriciel brun rougeâtre est semblable à celui de la *cangabua* d'Ambatillo.

La boule de cinérite accrétonnée (*CIN*) est altérée de la même manière que la *cangabua*, bien qu'elle ait gardé sa structure originelle et soit peu fissurée. Les phénocristaux du squelette grossier paraissent plus éclatés, corrodés et altérés, bien que globalement il n'y ait pas plus de produit d'altération. On observe de rares revêtements jaune limpide sur le bord de quelques fissures, une légère diffusion d'oxyde de fer rouge sombre autour de minéraux, mais pas de remplissage de calcite ni de silice. Le plasma matriciel brun rouge est semblable à celui de la *cangabua*.

LIC, Licto

Nous avons observé la partie supérieure de la *cangabua*, légèrement encroûtée de calcaire en surface. Elle est très semblable à celle du site de Cangahua (*CAN*), bien que très éloignée dans l'espace. Le matériau originel ne comporte que très peu de lave basaltique altérée en palagonite. La matrice massive n'est que peu fragmentée par des fissures fines en agrégats cubiques et polyédriques. Le plasma matriciel brun rouge a la même composition. Il n'y a pas de revêtements argileux ni de nodules ferrugineux, sinon une diffusion d'oxyde de fer autour de minéraux ferrugineux. Nous n'avons observé sur la lame mince qu'un seul remplissage de calcite dans un vide biologique ; l'encroûtement calcaire semble limité à la surface de la *cangabua*. Il n'y a pas de revêtement siliceux.

INTERPRÉTATION ET CONCLUSION

Origine et pédogenèse

L'étude des *cangabuas* de Bolívar, Cangahua, Ambato et Licto montre qu'elles proviennent très probablement de dépôts de cendre volcanique consolidée. Dans certaines (Ambato, Cangahua) l'hypothèse d'un flux pyroclastique d'éruption phréatomagmatique

est vraisemblable. Tous les échantillons conservent dans leur matrice la « texture » consolidée et massive d'un tuf pyroclastique ; l'altération est limitée à la phase vitreuse fine mais n'atteint pas ou peu les minéraux grossiers. Cependant, la marque de la pédogenèse y est très nette, comme effet de plusieurs processus, à savoir : altération de la matrice vitreuse fine en argile et oxyde de fer ; fragmentation éventuelle en agrégats par fissuration, surtout en climat subaride et près de la surface du tuf altéré, mais sans pédoplasmation évidente ; pénétration biologique en chenaux et cavités, surtout près de la surface ; illuviation éventuelle d'argile et d'oxyde de fer associé (couleur limpide) dans les cavités biologiques ; dépôt éventuel de calcite dans certaines cavités, l'encroûtement calcaire s'il existe demeurant superficiel, ou bien exceptionnellement (*cangabua* supérieure de Bolívar) diffusion de calcite fine dans la matrice à la partie supérieure de la *cangabua* ; faible diffusion éventuelle d'oxyde de fer dans la matrice, en pseudo-nodules ou en plages étroites en bordures de minéraux ferrugineux ou de cavités.

Âge et composition

L'âge de ces matériaux consolidés est généralement antérieur à l'holocène. La datation par ^{14}C de deux encroûtements calcaires sur la *cangabua* supérieure près de Bolívar indique environ 13 500 et 14 500 années BP. Il est probable que le début de l'encroûtement calcaire et, *a fortiori* la formation de la *cangabua* elle-même, remonte à plus de 15 000 BP, c'est-à-dire entre 20 000 et 15 000 BP, compte tenu du temps nécessaire pour l'altération minérale en climat subaride. La *cangabua* inférieure est évidemment bien plus ancienne. Cependant, sur le *páramo*, la formation du tuf supérieur, encore très peu altéré, pourrait être plus récente, de l'Holocène.

La composition de matériaux pyroclastiques originels varie peu, allant d'une dacite claire à une rhyodacite. Cependant, on observe près de Bolívar une succession de dépôts de composition un peu différente : ainsi, la *cangabua* supérieure est rhyodacitique, la *cangabua* inférieure dacitique ; ailleurs, près d'Ambato et de Licto, il y a eu addition d'un peu de lave basaltique lors de l'éruption, ou bien sur le *páramo* les tufs sont rhyodacitiques. Donc il s'agit bien de différentes émissions pyroclastiques dont le foyer et l'âge diffèrent, aussi bien d'une strate à l'autre dans un même lieu que d'une région à l'autre. Mais il est peu probable que chaque *cangabua* ou tuf corresponde à un dépôt d'apport éolien généralisé remaniant les dépôts de cendres volcaniques sur l'ensemble d'une région ou de la vallée interandine. Les dépôts éoliens peuvent toutefois exister localement.

Les minéraux primaires essentiels sont des verres volcaniques dacitiques et rhyolitiques, alcalins et sodipotassiques, des plagioclases (*labrador* - andésine), de la hornblende verte et de la magnétite. La présence d'un feldspath sodi-potassique (anorthose-sanidine) est probable dans les matériaux rhyolitiques. Il peut y avoir des traces de biotite et de quartz dans les formations plus rhyolitiques, ou de pyroxène et d'olivine et verre basaltique dans les dacites plus calciques.

Ciment de la matrice

Le ciment de la matrice des *cangabuas* et tufs altérés semble être généralement le plasma argileux et un peu ferrifère. De la silice non cristalline en très faible quantité dans les revêtements et remplissages argileux n'est pas à exclure dans les *cangabuas* situées en piémont inférieur et climat subaride, mais sa présence n'a pas été nettement identifiée. La cimentation de la matrice par de la calcite fine n'est généralement pas évidente, sauf dans les encroûtements calcaires superficiels et dans la *cangabua* supérieure de Bolívar.

Séquence topoclimatique d'altération et composition du plasma matriciel

L'altération est toujours limitée à une partie de la matrice vitreuse fine et les phénocristaux ne sont pas ou peu altérés. Ceci indique une période de formation restreinte à quelques milliers d'années. La composition du plasma d'altération varie suivant les conditions topoclimatiques, mais étrangement pas la quantité globale de ce produit qui demeure aussi limitée en climat humide qu'en climat subaride.

Suivant la séquence topoclimatique de l'aval vers l'amont, du subaride au perhumide, on observe dans le plasma un gradient de perte de silice et de bases, suivant l'accroissement de la pluviosité et du drainage. Ceci se traduit par une évolution qualitative du plasma et de ses propriétés, à savoir : une argile à prédominance de smectite en aval, puis d'halloysite à mi-versant, enfin d'allophane à l'amont. En conséquence, à l'aval, le matériau est plus gonflant et plus fragmenté, mais aussi plus dur à l'état sec ; la *cangabua* supérieure y est souvent encroûtée de calcaire en surface ; l'illuviation d'argile y est faible ou nulle. À mi-versant, le matériau est plus friable, moins gonflant et moins fragmenté ; l'illuviation d'argile et d'oxyde de fer y est plus marquée, mais il n'y a pas d'encroûtement calcaire. À l'amont, sur le *páramo*, le tuf altéré est friable, non gonflant ni fragmenté et toujours humide ; il n'y a pas d'illuviation d'argile et peu de redistribution d'oxyde de fer.

Faible variation de la *cangabua* en piémont inférieur et climat subaride

En revanche, en même condition climatique, l'évolution spatiale des caractères de la *cangabua* est peu évidente. Ainsi, sur le piémont inférieur en climat subaride, la *cangabua* supérieure manifeste peu de variation dans ses propriétés, même s'il ne s'agit pas toujours de la même émission pyroclastique et s'il y a une certaine variation dans la composition du matériau originel. Ainsi, la composition de l'argile est à prédominance de smectite, l'encroûtement calcaire superficiel est très fréquent, la fragmentation est développée près de la surface mais sans évidence de pédoplasation, la cohésion est toujours forte, mais l'illuviation d'argile peut être présente ou non. Cependant, sur une même station près de Bolívar, la *cangabua* inférieure diffère un peu, par l'absence d'encroûtement calcaire. Ceci suggère une évolution climatique au Pléistocène supérieur vers un climat plus aride vers 15 000 BP.

Conclusion

La *cangabua* dans les sols d'Équateur peut généralement être considérée comme l'altération d'un dépôt de cendre volcanique consolidée. Chaque *cangabua* correspond à une émission pyroclastique particulière et se situe à la base d'un paléosol (horizon C) dont la formation est antérieure à l'Holocène.

La composition du plasma d'altération argileux et ferrifère est dépendante du régime climatique et donc de sa position topoclimatique, à savoir : smectite à l'aval, halloysite à mi-versant, allophane à l'amont. De même est dépendante la redistribution et l'accumulation de certains éléments : notamment argile et calcaire en bas-versant ; seulement argile et fer à mi-versant ; pas d'argile à l'amont. Cependant, il est probable que l'encroûtement calcaire superficiel de la *cangabua* supérieure n'est pas dû à la pédogenèse actuelle. Près de Bolívar, le ^{14}C de la croûte est daté de 13 500 à 14 500 BP ; sa formation est donc bien antérieure à l'Holocène. Il n'y a d'encroûtement ni à la base du sol actuel ni dans la *cangabua* inférieure. Cette croûte calcaire aurait pu se former pendant une période climatique plus aride vers 15 000 BP. La croûte calcaire n'est pas toujours la cause de l'induration, puisqu'elle n'est pas toujours présente, ni ne diffuse généralement dans

la matrice. La silice non cristalline, si elle est probable en petits revêtements dans la *cangahua* en position aval, ne l'est sans doute plus en position de mi-versant ou à l'amont. Sa faible présence si elle existe, n'est pas la seule cause de l'induration.

En même situation topoclimatique, les caractères de la *cangahua* supérieure varient assez peu, indépendamment du foyer d'éruption et de la composition du matériau originel dont l'âge semble se situer pendant une période relativement limitée (15 000 à 20 000 BP ?). Seuls peuvent varier la fragmentation ou non en agrégats, la présence ou non d'illuviation argileuse, la diffusion ou non de calcite dans la matrice, le degré de cohésion et la dureté.

Références bibliographiques

- CUSTODE, E.; DE NONI, G.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M., 1992: La *cangahua* en el Ecuador. Caracterización morfoedafológica y comportamiento frente a la erosión, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 332-346.
- HALL, M.L., 1995: Glaciares en Papallacta, efectos de la glaciación, «El Comercio», Quito, diciembre de 1995.
- HALL, M.L.; BEATE, B., 1991: El volcanismo plio-cuaternario en los Andes del Ecuador, en *Estudios de Geografía*, N° 4: «El paisaje volcánico de la Sierra Ecuatoriana», Colegio de Geógrafos del Ecuador, Quito, 1991, p. 5-17.
- MOTHES, P.; HALL, M.L., 1991: El paisaje interandino y su formación por eventos volcánicos de gran magnitud, en *Estudios de Geografía*, N° 4: «El paisaje volcánico de la Sierra ecuatoriana», Colegio de Geógrafos del Ecuador, Quito, p. 19-38.
- RITTMANN, A., 1963: *Les volcans et leur activité*, Masson, Paris, 462 p.
- VERA, R.; LÓPEZ, R., 1992: Tipología de la *cangahua*, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 113-119.
- WINCKELL, A.; ZEBROWSKI, C., 1992: La *cangahua* en Équateur : le contexte paléogéographique de sa formation, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 107-112.
- WINCKELL, A.; ZEBROWSKI, C.; DELAUNE, M., 1993: Évolution du modelé quaternaire et des formations superficielles dans les Andes de l'Équateur. 1^{ère} partie : Le volcanisme pyroclastique récent ; 2^e partie : Quelques aspects de l'histoire paléogéographique quaternaire, dans *Géodynamique*, Vol. VII, N° 2, ORSTOM, Paris.
- ZEBROWSKI, C. 1997: Los suelos con *cangahua* en el Ecuador, en este volumen.