

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN
AGUSTÍN DE AREQUIPA**

CONVENIO UNSA - CEREN

**GEOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA DEL
CUATERNARIO Y ZONIFICACIÓN
GEOTÉCNICA-SÍSMICA DEL ÁREA
URBANA DE AREQUIPA**

**Dr. Ing. HERNANDO NÚÑEZ DE PRADO S.
Ing. EDUARDO FARFÁN BAZÁN
Bach. HÉCTOR DÍAZ URQUIZO**

Supervisión

Ing. ROBERTO KOSAKA MASUNO

Arequipa, Febrero 2001

PERÚ

ÍNDICE

SUMARIO	4
1. CONSIDERACIONES GENERALES	6
1.1. Introducción.....	6
1.2. Ubicación, extensión y límites del área de estudio.....	6
1.3. Geomorfología y fisiografía regional	8
1.4. Clima y vegetación.....	8
1.5. Estudios anteriores	9
2. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	11
2.1. Estratigrafía.....	12
2.2. Las paleosuperficies: fases de erosión	16
2.3. Estructura de la región Arequipa (sur del Perú)	18
2.4. Fases tectónicas	19
3. GEOLOGÍA LOCAL (CONO NORTE DE AREQUIPA).....	22
3.1. Introducción.....	22
3.2. Geomorfología	23
3.3. Estratigrafía.....	26
3.4. Los materiales aluviales pleistocénicos: crisis climáticas.....	32
3.5. Análisis sedimentológico	36
3.6. Las paleosuperficies de erosión - meteorización y su relación con las crisis climáticas y fases volcánicas del pleistoceno.....	37
3.7. Correlaciones	38
3.8. Estructura.....	40
4. GEOTÉCNIA	41
4.1. Trabajos realizados.....	41

4.2. Análisis y ensayos de laboratorio realizados.....	42
4.3. Caracterización de unidades geotécnicas.....	44
5. MICRO ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE AREQUIPA	50
5.1. Zona de alto riesgo	51
5.2. Zona de mediano riesgo.....	52
5.3. Zona de moderado riesgo	53
5.4. Zona de bajo riesgo	54
CONCLUSIONES	56
RECOMENDACIONES.....	59
BIBLIOGRAFÍA.....	60
LISTA DE FIGURAS	64
LISTA DE TABLAS.....	75
APÉNDICES.....	78
1. Lista de planos	78
2. Lista de fotografías.....	78
ANEXOS.....	104
A. Lista y perfiles de las calicatas excavadas.	104
B. Capacidades portantes de los suelos en los distritos.	114
C. Resultados de los análisis de laboratorio.	120

SUMARIO

En el año 2000, se han llevado a cabo varios tipos de evaluaciones de los diferentes riesgos que eventualmente podrían afectar a la ciudad de Arequipa. Dichos trabajos se realizaron como parte de un convenio entre el CEREN y la UNSA. Estos trabajos han sido dirigidos hacia el riesgo sísmico, volcánico, de inundación por torrenteras y el presente estudio que versa sobre los suelos (unidades geotécnicas), sus características y su comportamiento como lecho de fundación y ante un probable sismo.

El trabajo incluyó la excavación de calicatas en lugares estratégicos de los alrededores de Arequipa, la recolección de muestras para los ensayos y análisis respectivos que se efectuaron en el laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad de San Agustín. También se ha levantado columnas y los perfiles de los cortes de las quebradas para estudiar los depósitos aluviales del Pleistoceno, y así poder establecer las bases para una estratigrafía del cuaternario en esta región.

Se ha diferenciado hasta 5 unidades aluviales (incluida la formación Cuíco ó Capillune), que pueden ser correlacionadas con las crisis climáticas del Pleistoceno, las cuales están separadas por paleosuperficies de erosión - meteorización, pudiendo establecerse por primera vez una estratigrafía de este periodo en la región Arequipa. También, la ocurrencia de niveles tobáceos, con abundantes fragmentos de pómez, junto a las paleosuperficies permite interpretar que estas capas son equivalentes a diferentes episodios piroclásticos explosivos que ocurrían en la zona de la cordillera.

A nivel sedimentológico, dichos depósitos corresponden a abanicos aluviales, presentando dos facies principales: las cenoglomeraditas (flujos de barro) predominantes y los fanglomerados (canales fluviales), diferenciados por la viscosidad de los fluidos para la primera y la elevada fluidez de los agentes de

transporte y depositación para la segunda; además se infiere otros medios sedimentarios como zonas de glacís y de conos de escombros.

Las diferentes unidades geotécnicas (13) se han podido caracterizar por su localización, caracteres sedimentológicos así como por sus propiedades físicas (Tabla N° 3); asimismo se ha calculado las capacidades portantes (C.P.) de los suelos en los distintos distritos de la ciudad (anexo B). Los suelos asociados a diferentes tipos de rocas presentan típicos periodos de vibración, lo cual permite inferir el comportamiento de los mismos ante un eventual sismo y diferenciar zonas con diferente grado de riesgo.

Se recomienda que se continúe con los estudios de microzonificación sísmica, así como también los referidos a la estratigrafía y geomorfología de la región, ya que favorecen el mejor conocimiento de la región y así prevenir graves riesgos para la población, sobretudo en una zona altamente sísmica. También se sugiere que se lleven trabajos específicos de acondicionamientos de diferentes sectores de la región que presentan problemas de estabilidad o de actividad dinámica ante la ocurrencia de fenómenos naturales extraordinarios. Además proponemos crear varias zonas de protección ecológica en la ciudad y alrededores (valle del río Chili, pueblos y campiña de la zona sur), así como potencializarlos con fines turísticos.

1. CONSIDERACIONES GENERALES

1.1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio se lleva a cabo en el marco del convenio entre la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa y el Comité Ejecutivo de Reconstrucción del Niño (CEREN), el cual tiene como objetivo conocer las unidades estratigráficas del cuaternario de la zona urbana de Arequipa y alrededores con la finalidad de determinar sus características físicas y mecánicas para poder llevar a cabo una zonificación, la cual permita definir la vulnerabilidad y riesgos de algunas zonas que se necesita proteger. El estudio y evaluación de los suelos permitirá planificar acciones y así mitigar los efectos a veces tan desastrosos que ocasionan los extraordinarios y cíclicos fenómenos naturales (ejemplo Fenómeno del niño, terremotos, etc.).

En la primera parte del estudio el objetivo está dirigido a definir la estratigrafía del cuaternario en la zona del piedemonte de la vertiente oriental de la cordillera occidental, lugar donde se asienta la ciudad de Arequipa. La excavación de calicatas permitió un muestreo de dichas unidades, para poder llevar a cabo los análisis respectivos para determinar las propiedades físico-mecánicas y químicas de las unidades y la capacidad portante de los terrenos para la determinación de los niveles de riesgos y evaluar la seguridad de futuras zonas urbanas (ejemplo terrenos del PROFAN).

1.2. UBICACIÓN, EXTENSIÓN Y LÍMITES DEL ÁREA DE ESTUDIO

Los sectores estudiados están comprendidos dentro del área de influencia de la ciudad de Arequipa y sus probables zonas de expansión urbana. La extensión abarca un área de aproximadamente 360 Km². a una altitud promedio de 2360 m.s.n.m.. Los límites corresponden a los sectores denominados como conos norte

(hasta Ciudad de Dios, por el NO) y cono sur (el pueblo de Characato por el SSE). Las coordenadas UTM siguientes constituyen los límites aproximados de la zona de estudio (AP-1A):

N 8198000 (al norte)

236000 E (al este)

N 8175000 (al sur)

218000 E (al oeste)

Estas zonas de expansión urbana están en constante crecimiento pero sin una planificación controlada de parte de los organismos competentes.

Los sectores seleccionados para ser evaluados mediante calicatas están indicados con el color azul en la figura N° 1, donde se indica las 23 calicatas programadas.

Con fines de una presentación mas didáctica de la data recolectada, hemos distinguido dos sectores norte y sur, donde se han estudiado los afloramientos, cortes de quebradas así como las calicatas:

El sector NORTE, que comprende las zonas de: PROFAN, Ciudad de Dios, Sor Ana de los Ángeles Monteagudo, Villa Paraíso y el Señor de los Milagros; esta distribución sigue una línea oeste - este, hasta el límite constituido por el río Chili.

El sector SUR, abarca las zonas de Arancota, Bellapampa, Ampliación Socabaya y San Francisco en Characato.

Las diferentes zonas son accesibles mediante trochas o vías asfaltadas, obras llevadas a cabo por cada municipio u otras instituciones.

1.3. GEOMORFOLOGÍA Y FISIOGRAFÍA REGIONAL

La región de Arequipa, esta ubicada a 60 Km., en línea recta del Océano Pacífico, a 16° de latitud sur, mostrando fuertes contrastes de altitud (desde los más de 6000 m.s.n.m. de la cumbre del Chachani) hasta los 1100 m.s.n.m. del glacis desértico de la Joya (figura N° 2).

En un corte de SO a NE (figura N° 3) podemos distinguir 4 paisajes en la región de Arequipa: Un glacis desértico bastante amplio, alrededor de la Joya, cortado por el río Vitor, mostrando una suave pendiente cóncava, sembrada de "barkanes", el cual pasa a una cordillera batolítica, con geformas aborregadas mas o menos disectadas, el cual atraviesa la región de SE a NO y constituye el límite meridional de; la zona de asentamientos humanos con pequeñas mesetas y planicies, donde la característica principal son las formas onduladas de los tufos rosados al oeste y las avalanchas caóticas de los flujos de lodo por el este que han sido erosionadas y aplanadas; el contraste y paso a la masa imponente de volcanes que domina el paisaje es bastante abrupto, destacándose nítidamente el cono regular del Misti al centro flanqueado por el complicado Chachani (+6000 m.) al oeste y el Pichu Pichu al este.

1.4. CLIMA Y VEGETACIÓN

Esta región muy particular, se sitúa en el borde de la diagonal árida que corta el continente sudamericano, mostrando la transición de un clima periglacial tropical seco sobre los volcanes (+4000 m.s.n.m.) al clima semiárido de la meseta de Arequipa a 2400 m.s.n.m. (con fuertes precipitaciones entre Diciembre y Marzo) al clima caliente, netamente desértico de la Joya. La fuerte y constante insolación durante el año, con una desecación que es acentuada por los vientos del SE.

La vegetación se presenta muy esparcida distinguiéndose algunos "Céreus" sobre los cerros de la caldera y en la zona de los volcanes, la parte baja una estepa con

cactus y a más altitud el “tolar” (*lepidophyllum*) y *polylepis*. La zona de la meseta de Arequipa presenta zonas irrigadas con las aguas del río Chili donde se cultivan varios productos de pan llevar y principalmente cebollas y ajos. En ninguna parte la vegetación es lo bastante densa para evitar una fuerte escorrentía, y consiguiente erosión en la época de lluvias.

1.5. ESTUDIOS ANTERIORES

La zona urbana de Arequipa, ha sido motivo de varios estudios dirigidos al conocimiento de la mecánica de suelos y geotecnia para definir una zonificación de la ciudad con la finalidad de prevenir y mitigar la ocurrencia de fenómenos naturales. Entre los principales se puede citar los trabajos de tesis de Ticona, J. (1994) sobre microzonificación de la ciudad tomando datos y sintetizando los trabajos de tesis realizados por algunos ingenieros de la universidad nacional de Ingeniería (Aguilar, 1991), la de Medina, E. (1991) sobre una zonificación geotécnica y geológica preliminar de la ciudad basado sobre los trabajos de Yanqui, C. (1990a, 1990b). El estudio geológico de suelos en Arequipa de Gutiérrez M. (1973) y el de Cárdenas (1973) sobre la geología de las cimentaciones en los pueblos jóvenes de los alrededores de la ciudad. También estudios localizados en algunas áreas aportan datos para el mejor conocimiento de unidades geotécnicas que pueden ser correlacionadas regionalmente, por ejemplo la tesis de González. L (1984) sobre el asentamiento humano de ciudad de Dios. También es importante citar las referencias de varios estudios de mecánica de suelos en diferentes partes de la zona de Arequipa efectuados por Yanqui, C. (1986a-b, 1986 -1990, 1988), que son informes privados. Además recientemente ha sido publicado el trabajo de investigación aplicados a la prevención y mitigación de desastres evaluando la peligrosidad de las torrenteras (Minaya & Ticona, 1999) y otro sobre un sondaje eléctrico vertical en la zona de Socabaya (Soto, J. 1999) que aporta datos sobre las unidades geotécnicas en este sector. A nivel regional son importantes los trabajos de geomorfólogos

franceses como Laharie (1973 a 1976), Dolfuss, (1967, 1970) y la geología del cuadrángulo de Arequipa (Vargas, 1970) y Characato (Guevara, 1969) y Maure-Antajave (Mendivil 1965a). Es importante señalar los trabajos de evolución tectónica y geotectónica del piedemonte del sur del Perú por Huamán D. (1982, 1985), y Sebrier (1987), que aportan los datos más recientes sobre la geodinámica y cronología de los eventos.

Si bien estos trabajos aportan datos de interés para la comprensión de las unidades geotécnicas que afloran en la zona urbana de Arequipa, falta esbozar una estratigrafía de las unidades cuaternarias y caracterizarlas física y mecánicamente.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

La figura N° 2 permite visualizar las principales unidades geológicas - geomorfológicas: al NE de la ciudad coladas volcánicas provenientes del Chachani y Misti, cortadas por el cañón del río Chili; la zona de la ciudad y alrededores corresponde a depósitos de abanicos aluviales, limitados al oeste por los tufos volcánicos y por el este por las coladas o flujos de lodo; todo esto limitado al sur por el batolito de la caldera. Como un remanente sobre el batolito ocurren rocas sedimentarias de edad Jurásico. Al SO de la región afloran las formaciones detríticas (Huanca y Sotillo) que rellenan la superficie del glacis de Vitor. El basamento de la región está constituido por el gnéis precambriano. Los volcánicos son esencialmente andesíticos y basálticos. Los depósitos de conos aluviales corresponden a sedimentos detríticos con arenas y arcillas - limos, los cuales engloban guijas, guijarros, cantos y bloques con algunos notorios niveles de blancos con piedra pómez. El batolito está integrado por una gran variedad de rocas ígneas de gabro a diorita con las intermedias de dioritas, granodioritas y pórfidos cuarcíferos. Los techos colgantes de rocas sedimentarias como cuarcitas y caliza algo plegadas que ocurren como remanentes ensanchándose hacia el SE (5 a 8 Km.). La erosión de esta cordillera ha dado lugar a unidades conformadas por cantos rodados (12 -16 cm.) con coladas de barro embalando bloques de más de 50 cm. Los cantos son de calizas y de dioritas no alterados (Fm. Huanca) y la formación más reciente (Sotillo - Moquegua) muy similar a la anterior solo que engloba además cantos de andesita y cenizas de la primera fase volcánica.

Nuestro trabajo está enfocado al estudio detallado de las unidades pliocuaternarias (suelos) que son el principal relleno en la zona del piedemonte, las cuales traducen la sedimentación durante las fases más húmedas o crisis climáticas del Pleistoceno, lugar donde se ha asentado la ciudad de Arequipa.

2.1. ESTRATIGRAFÍA

En la figura N° 4 se sintetiza la estratigrafía del Cenozoico en el sur del Perú. El substrato pre-Oligocénico de la región esta conformado sea por terrenos precambrianos, o Paleozoicos, o mesozoicos o rocas magmáticas ante-Oligocenas y/o por los volcánicos Toquepala de edad Albiano (Jaillard et. al 1994).

Sobre el substrato Oligocénico distinguimos una formación denominada Moquegua inferior, la cual comienza a rellenar la cuenca del piedemonte (formada probablemente por los efectos de la fase tectónica Incaica). Esta unidad presenta en la parte inferior facies groseras con matriz arcillosa que corresponden a flujos de lodo y conos torrenciales que traducen una fuerte influencia de las precipitaciones pluviales, pasando a una parte intermedia con facies mas finas producto de decantación, lo que se podría interpretar como facies lagunares o de planicie de inundación; la parte superior muestra facies evaporíticas con aportes detríticos mínimos en un contexto climático muy árido. Esta unidad es azoica por lo que no se puede precisar su edad. Su característica principal es que no tiene rocas ni materiales volcánicos. Se le asigna una edad Eoceno superior - Oligoceno inferior.

El equivalente estratigráfico en la parte central de la cuenca (Arequipa) es la potente (1400 m.) Fm. Huanca (Jenks, 1948), constituida por cantos rodados (diámetro de 12 -16 cm.) con coladas de barro embalando bloques de más de 50 cm. En estos depósitos no se encuentra ni rocas volcánicas ni cenizas intercaladas. Dicha fase se desarrolló en un contexto de clima semiárido con una escorrentía en napas alternando con lavas torrenciales. La acción química fue mínima como lo demuestra la abundancia de cantos calcáreos y de diorita poco alterados. A veces los conos de gravas son cubiertos por depósitos de barkanes (arenas suaves cementadas) que son fosilizados por napas detríticas posteriores, lo que testimonia de periodos mas secos con predominio de la acción eólica.

La parte superior evaporítica de la Fm. Moquegua inferior tendría su equivalente en los depósitos de la Fm. Sotillo (250 m.) de la región de Arequipa, constituida de areniscas arcóscas y lutitas verdosas con capas de yeso.

Sobreyaciendo a la anterior unidad por intermedio de una discordancia angular la formación **Moquegua superior**, se caracteriza por un detritismo grosero y espesores desde 300 a 650 m (figura N° 4).

Los conglomerados de la parte inferior corresponden a depósitos de conos aluviales, los cuales a su vez parecen haber sido controlados por accidentes tectónicos que estuvieron activos durante la sedimentación de esta unidad (probable cuenca "pull apart" muy móvil).

En la parte superior esta formación, presenta intercalaciones de niveles marinos datados del Eoceno y depósitos volcánicos ignimbríticos (formación Huaylillas - V2).

La edad de esta unidad esta dentro del intervalo 30 ma. y 18 ma.. en base a dataciones de las coladas ignimbríticas volcánicas intercaladas (Oligoceno superior a Mioceno inferior).

Un equivalente estratigráfico de esta unidad es la Fm. Camaná con fósiles marinos que se deposita en la cuenca costera con fuerte influencia del volcanismo Huaylillas.

En el **Mioceno superior** se identifica un cambio en el dispositivo paleogeográfico (fase N₂) que corresponde a una etapa de relleno del piedemonte pero también al comienzo de la excavación de los profundos valles transversales. El aumento de la intensidad pluvial en los relieves de la cordillera y la tectónica contemporánea dan lugar a un contexto erosivo y por lo tanto la formación de una topografía diferenciada. Los paleovalles formados son poco profundos pero amplios. El relleno corresponde a depósitos de conglomerados groseros de composición

andesítica y diorítica. Los valles mas excavados han sido rellenados por las coladas ignimbríticas de la Fm. Chuntacala (V2).

En la zona de las “pampas”, grandes superficies mas o menos planas del piedemonte, es difícil distinguir los depósitos que rellenan los glacis de los depósitos de la Fm. Moquegua superior. En general corresponden a napas poco espesas (30 m.) de material aluvional con bloques de naturaleza andesítica. Son amplios glacis de erosión que se prolongan hasta la zona costera. Estas pampas están constituidas de aluviones que representan las superficies de “pampas” (Laharie & Derruau, 1974). Distinguimos en el sur del Perú las siguientes pampas de sur a norte: Cledesí, Vitor, Sihuas, Majes, Cuno - Cuno. Las “pampas” son raramente afectadas por fallas, como en el sector de Torán (valle de Majes) donde se aprecia efectos tectónicos posteriores al depósito de estas napas aluvionales.

El Plioceno (excavamiento de los grandes cañones), corresponde a un periodo de fuerte erosión en la zona del piedemonte. En la zona costera se ha reconocido la Fm. La Planchada, con facies marinas litorales con abundante fauna que ha podido ser determinada como del Plioceno superior.

Los depósitos de esta edad en el borde del piedemonte se denominan **Fm. Millo** (Vargas, 1970); y se localizan en las depresiones productos de la erosión y corresponden a depósitos variados: fluvio torrenciales, lacustres localmente, de conos glacis con guijarros redondeados con patinas de colores rojizos (los más antiguos) y rojo claro a gris claro (para los mas recientes). Además existen depósitos contemporáneos a estos de glacis, de naturaleza volcánica que rellenan el fondo de las depresiones topográficas constituidas por capas de cenizas blancas y niveles aluvionales e intercalaciones de horizontes de ignimbritas (sillar) que indican el debut o comienzo de la colada ignimbrítica (V3) sillar de Arequipa, de Caravelí de edad Plioceno terminal - Pleistoceno. Estas coladas de tufos dacíticos, rellenan las depresiones originadas por las fuerzas erosivas que actuaron en el Plioceno.

La Fm. Sencca se caracteriza por una alternancia de niveles de tufos mas o menos consolidados y unidades aluviales arenosas como se observa en el cañón del río Chili. Sobreyaciendo al sillar (nubes ardientes con alto contenido de fragmentos) ocurre el llamado tufo puzolánico color “salmón”, el cual corresponde al material tufáceo del sillar retrabajado. La parte superior de este material “puzolánico” presenta lentes de cenizas blancas y canales con conglomerados oscuros indicando la avenida de un episodio detrítico.

Inmediatamente encima y por intermedio de una discordancia erosional ocurren los depósitos de la Fm. **Capillune - Cuíco** (o conglomerado aluvial pleistoceno, Guizado, 1968, en Vargas, 1970), de aproximadamente 60 m. a 80 m. de espesor con una parte inferior conglomerática con cantos de rocas intrusivas, gnéis, cuarcitas etc., areniscas tufáceas y cinerítas con intercalaciones de bancos de tufos traquíticos, dacíticos y riolíticos, limos -arcillas, niveles de tufos redepositados con diferentes grados de compactación (la parte superior mas endurecida). Según Guizado (1968), esta unidad cubre áreas extensas de la SO de Arequipa (Pampas de Vitor y Sigwas).

Directamente sobreyaciendo a la unidad anterior ocurren en discordancia levemente erosional, los volcánicos Chila (ver fotografía 1) cuyos afloramientos de la parte inferior muestran lavas escoriáceas, distribuidas caóticamente con coloraciones rojo ladrillo intensas y negras (utilizadas en la decoración de jardines). Encima se presentan las lavas andesíticas afaníticas de color gris oscuras (que intemperizan a rojizo) que alcanzan espesores superiores a 50 m.

En la zona costera depósitos de terrazas marinas testimonian el dinamismo del borde costero. También en la zona de las vertientes y fondos de los valles depósitos de esta edad constituyen terrazas fluviales.

En la zona de contacto del piedemonte - cordillera occidental (zona estudiada en detalle) se ha reconocido tres unidades aluviales denominadas Alv. - 1, Alv. - 2, Alv. - 3 que sobreyacen ya sea a los volcánicos Chila o a la Fm. Capillune. Dichas

unidades están separadas por paleosuperficies cuya principal característica es la presencia de niveles con fragmentos de tobas blanquecinas (piedra pómez), los cuales traducirían la ocurrencia en la zona de la cordillera de eventos volcánicos relacionados probablemente al extensivo volcanismo Barroso. Estas unidades serán descritas con mayor detalle en el capítulo siguiente de geología local. Es importante remarcar que la unidad Alv. - 3 está afectada por fallas normales, atestiguando la existencia de una fase distensiva contemporánea al depósito de esta unidad.

El material reciente esta constituido por depósitos piroclásticos recientes conformados por bancos de lapilli alternando con delgados niveles arenosos, sobreyacidos por depósitos eólicos y aluviales de grano fino.

Los depósitos coluviales que ocurren al pie de los taludes de los cerros sobreyacen a los aluviales anteriormente señalados y están caracterizados por la ocurrencia de bloques de variadas dimensiones.

2.2. LAS PALEOSUPERFICIES: FASES DE EROSIÓN

Regionalmente se puede reconocer hasta 3 superficies de erosión (Jenks, 1948), figura N° 5:

1. La superficie de la caldera (cumbres concordantes a 2300 m. de la cordillera de la caldera)
2. El pedimento de laderas (a unos 600 m debajo de la anterior). la mas baja es la del pedimento de Vitor y las terrazas asociadas con el (mas reciente y mejor preservada).

La superficie (La caldera), a 2200 y 2400 m.s.n.m de altitud corresponde a una primera etapa erosiva que se desarrolla antes de las manifestaciones

volcánicas iniciales del Cenozoico. Una fase erosiva afecta la parte somital del macizo de la caldera dando lugar al depósito de la Fm. Huanca; Esta paleosuperficie evidenciada por la uniformidad de crestas (2200 -2400 m.s.n.m) esta fosilizada hacia el NE de la región por la primera fase volcánica datada del Mioceno. Esta superficie podría ser correlacionada con la denominada superficie Puna por Steinmann (1924), y ella representaría uno de los términos más antiguos y más occidentales elaborada bajo un clima semiárido.

La segunda superficie de "laderas" es un accidente notable al N del río Vitor. Esta paleosuperficie se desarrolla 600 m. más abajo que la precedente. La superficie esta a una altura promedio de 2000 m. hasta 2400 m, cortando el batolito. Esta 2da fase erosiva, comienza con un levantamiento epirogenético dando lugar a la Fm. Sotillo, la cual es muy similar a la Fm. Huanca, pero esta unidad presenta cantos de andesitas y cenizas productos de la primera fase volcánica.

3. La tercera paleosuperficie es la denominada de "Vitor"; está muy disectada y tiene una constante y pequeña inclinación hacia el SO. La elevación de este pedimento en la base de las estribaciones andinas es de aproximadamente 1600 m.s.n.m., 400 m. más bajo que la anterior. Esta superficie corta los estratos de la Fm. Sotillo en la base de las montañas, también corta a las rocas intrusivas del complejo de la caldera. Este pedimento es visible aguas arriba del río Vitor hasta la boca del río Yura, donde se le observa como una pronunciada terraza cortada en roca intrusiva dura.

En la época del Pleistoceno hasta el Cuaternario, la erosión en el curso de las fases más húmedas o crisis climáticas dieron lugar a variaciones litológicas, valles orientados siguiendo la dirección de las diaclasas SO - NE (Ej. Qda. Enlozada), valles secos amplios (Qda. Cerro verde) con la parte baja de las vertientes recubiertas por depósitos de pendiente, con bloques angulosos y no seleccionados y el fondo con arenas o cenizas consolidadas en tufos (recaída de nubes ardientes).

En la zona del cono norte de Arequipa (Ciudad de Dios) se ha reconocido hasta tres tipos de napas aluviales separadas por paleosuperficies de meteorización, las cuales traducirían episodios de dinámica activa y mayores efectos erosivos; las cuales se detallarán en el capítulo siguiente.

En la parte superior del volcánico Barroso, ocurren los volcánicos Cortaderas, los cuales corresponden a varias coladas de lavas andesíticas porfiríticas, viscosas de colores gris rosáceo, negro y abigarrados, que según Jenks (1948) corresponden a la última (cuarta) etapa de actividad volcánica y correlacionados con los volcánicos Ubinas, sobre los que ocurren hasta 3 tipos de coluviales (González, 1984). Según cita de Palza, 1974 estos volcánicos en la estratigrafía establecida por los franceses (Laharie, 1973), corresponde al volcánico Ubinas.

2.3. ESTRUCTURA DE LA REGIÓN AREQUIPA (SUR DEL PERÚ)

En la figura N° 6, se puede observar un modelo estructural para la región sur del Perú (Huamán et. al., 1993) en el que se puede apreciar la ocurrencia de accidentes regionales mayores de dirección N 135° E, que localmente se pueden orientar N 070° a 120° E. Controlados por estos accidentes se presentan fisuras de dirección N 055° E, que están asociadas a los volcanes (Ejemplo Sabancaya).

Las megafallas regionales son normales con una ligera componente de desgarre sinistral (transcurrente). El macizo Ampato, Sabancaya, Hualca - Hualca ha sido interpretado como una amplia zona de relevo entre los accidentes mayores (Huamán et. al. 1993); es decir que esta zona sería equivalente a un "pull - apart" donde la deformación extensiva es más o menos difusa, comprendiendo las zonas de fisura N 055° E abiertas (jugando como grietas de tensión), permitiendo al magma profundo llegar a superficie.

En ese contexto la zona del Misti, Chachani y Pichu - Pichu, situada entre los mismos accidentes mayores, tendría un comportamiento similar. Es importante

remarcar que el valle del río Colca corresponde a un accidente E - O que hace cambiar de dirección a la cordillera volcánica, pasa de SE - NO a E - O (cordillera del Sara - Sara, Ayacucho).

La zona urbana de Arequipa estaría controlada por el mismo tipo de accidentes N 135° E, mostrando probables zonas fracturadas E - O (figura N° 6); asimismo, el contacto del batolito de la caldera con el piedemonte desértico estaría controlado por estas grandes fallas normales con componentes transcurrentes sinestrales.

2.4. FASES TECTÓNICAS

La cadena andina de la región sur del Perú esta caracterizada por mostrar deformaciones recientes (sismotectónicas) que han sido puestas en evidencia por diferentes estudios (Sebrier, 1977 a 1983, Huamán, 1995), traduciendo una evolución geodinámica cenozoica casi completa.

Se puede distinguir hasta 5 periodos de evolución geodinámica en la zona del piedemonte y zona costera; cada periodo es separado por fases tectónicas compresivas (figura N° 7).

- El periodo Eoceno superior - Oligoceno inferior (45 - 30 ma..)
- El periodo Oligoceno superior - Mioceno inferior (30 - 15 ma.)
- El periodo Mioceno superior (15 - 7 ma..)
- El periodo Plioceno (7 - 2 ma..)
- El periodo Pleistoceno - Holoceno (1.6 - actual)

La cronología de las fases tectónicas se puede resumir de la siguiente manera (Cuadro Cronológico de las Facies Tectónicas de la Vertiente Pacifico del Sur del Perú):

- La tectónica compresiva del Oligoceno Medio: N₁

Puesta en evidencia por la discordancia angular que separa la Fm. Moquegua inferior de la Fm Moquegua superior. En los valles la deformación esta caracterizada por fallas inversas, flexuras y pliegues con un amplio radio de curvatura. Esta fase es seguida de una extensa fase de erosión que dio lugar a una superficie aplanada (P2)

- La fase tectónica compresiva del Mioceno medio: N₂

Corresponde a la reactivación o creación de fallas inversas con flexuras asociadas. Las coladas ignimbríticas - Fm. Chuntacala (V2) fosilizan las estructuras de esta fase. La Fm. Camaná se encuentra localmente inclinada (30 hacia el mar) tal vez por efecto de un levantamiento epirogenético asociado con esta fase. Creación de depresiones tectónicas.

- La fase compresiva del Mioceno superior: N₃

Es mas o menos contemporánea con una actividad ignimbrítica; esta fase se caracteriza por la reactivación de accidentes antiguos, estos juegan en fallas inversas y dan lugar a remarcables flexuras en la cobertura ignimbrítica (V2). Las depresiones tectónicas se reactivan en un contexto compresivo. Esta fase es anterior al excavamiento de los grandes valles transversales (Debut del Plioceno, 7 ma.). En la zona costera esta fase origina el levantamiento de la cresta costera.

- Los movimientos tectónicos del Plioceno superior: N₄

El pedimento en el Plioceno fue sometido a fuertes incisiones que dieron lugar a valles profundos que son rellenados enseguida por materiales volcánicos (nubes ardientes) sillares de Arequipa, datado en 2.76 ma., sillar de Caravelí, datado en 1.94 ma. Después estos depósitos son algo erosionados por los conglomerados basales de la Fm Capillune, seguido por los depósitos de niveles tufáceos y

arenosos. Posteriormente depósitos aluviales terminan de colmatar los valles. En la zona costera se forman algunas terrazas marinas y algunas estructuras en compresión y en extensión.

- La fase distensiva del Pleistoceno (Afecta a la unidad Alv - 3) N₅

Esta fase es posterior a los depósitos del volcánico Chila. Se caracteriza por presentar fallas normales con pequeños saltos (métrico), que funcionaron al mismo tiempo que la napa aluvial se depositaba (ver foto 18).

Otros movimientos tectónicos sin sedimentarios se han puesto en evidencia durante la depositación del volcanismo ignimbrítico (V2- Fm. Chuntacala) Huamán, 1995. Se trata de la falla inversa la Huarca, la cual ya había sido activa, durante las fases N₁ y N₂.

3. GEOLOGÍA LOCAL (CONO NORTE DE AREQUIPA)

3.1. INTRODUCCIÓN

En el mapa geológico de la zona de Arequipa (AP-1C), se han reconocido varias unidades que no han sido consideradas por la cartografía existente del Ingenmet (Vargas, 1970). Se trata de unidades cronoestratigráficas correspondientes al Pleistoceno: Fm. Cuíco (o Capillune regionalmente) y las unidades aluviales volcánicas (1, 2 y 3).

Además con la finalidad de interpretar bien el contexto en el cual se desarrolla la dinámica durante el Pleistoceno, hacemos una descripción y bosquejo de como las diferentes identidades geomorfológicas, relacionadas a las principales geoformas en la región (Misti, Chachani y Pichu Pichu), han actuado rellenando la cuenca cuaternaria de Arequipa.

El estudio del Cuaternario de la cubeta de Arequipa, hemos visto por conveniente iniciarlo en la zona del cono norte de la ciudad, donde existen excelentes afloramientos, bien expuestos por las quebradas que bajan de las vertientes andinas. Consideramos que el establecimiento de una estratigrafía precisa en este sector permitirá llevar a cabo una correlación valedera para los otros sectores del área urbana de Arequipa. Además el proyecto de habilitar nuevos lotes para vivienda en la zona de PROFAN, requiere que de una vez por todas se determine las características litológicas de las unidades aluviales Pleistocénicas, su mecánica de suelos, así como su capacidad portante (anexo B) que permita llevar a cabo la habilitación geotécnica respectiva.

La correlación de las unidades reconocidas en el cono norte permitirá poner en evidencia algunas unidades que no han sido diferenciadas en los otros sectores de Arequipa y así aclarar la estratigrafía del Cuaternario en esta zona.

Describiremos con detalle las unidades litoestratigráficas Pleistocénicas separadas por paleosuperficies de erosión y meteorización, estudiadas en la zona del cono norte; también señalaremos las posibles correlaciones con las unidades de suelos reconocidas en el área urbana de Arequipa (Yanqui, 1990a, Gutiérrez, 1973 etc.), indicando que son tentativas y que necesitan verificaciones directamente en el terreno.

Aportaremos datos a nivel sedimentológico para caracterizar las diferentes unidades aluviales diferenciadas, dando especial énfasis a aquellas que influyen en el comportamiento geotécnico de los suelos (Ej. fluidez del agente de transporte y de depositación).

Por último tocaremos brevemente la estructura de la zona de Arequipa, ahondando en lo referente a la asimetría del valle del río Chili.

3.2. GEOMORFOLOGÍA

En el mapa geomorfológico (AP-1B) se muestra las diferentes identidades geomorfológicas que han actuado y desarrollado después del volcanismo del Terciario superior. La descripción la haremos siguiendo el criterio de su fuente de origen es decir: las que se originaron en los flancos y al piedemonte del Chachani, luego del Misti y por último del Pichu Pichu. Estas geoformas pertenecen a la unidad geomorfológica regional: la cordillera del Barroso (Mendivil, 1965a).

UNIDADES RELACIONADAS AL CHACHANI:

Los domos de Cortaderas, estas geoformas de la última etapa de actividad del volcán Chachani, forma una pequeña cordillera que ha jugado un rol muy importante en el desarrollo geomorfológico de la zona nor-occidental de Arequipa. Alcanzan una altitud de 2900 m.s.n.m. y están constituidos de lavas andesíticas y basálticas (ver fotografías 8 y 9).

La prolongación de estos domos hacia el sur, se cortan en un tramo de la carretera Arequipa - Yura, antes de la quebrada Buenavista. Es una colina mas o menos redondeada que forma una estructura de domo y representan el frente del avance de las coladas de andesitas porfiríticas escoriáceas.

Las lomadas de Chila, son colinas de poca altitud de superficies mas o menos redondeadas que cortan el piedemonte, corresponden a los frentes de coladas basálticas que se prolongan hacia el sur.

El abanico aluvial del Azufra, claramente se expone este notable accidente geomorfológico en el flanco oriental del Chachani; probablemente esta controlado por fallas. Se caracteriza por presentar quebradas mas o menos rectilíneas, con paredes verticales (escarpas) en las parte altas (nacientes). El relleno es esencialmente material aluvial constituido casi enteramente de rocas volcánicas, predominando las andesitas; se presentan en variadas dimensiones ya sea en bloques, cantos, gravas, guijas y guijarros en una matriz limo - tufácea; forman conglomerados poco consolidados sin ninguna selección.

El piedemonte de Estanquillo, se forma al pie de los domos de cortaderas, esta franja alcanza una longitud de mas o menos 7 Km. y un ancho de 1.5 Km, en promedio y esta fuertemente disectada por las quebradas originadas por la escorrentía superficial, las cuales favorecen que se observe el relleno de esta zona. En general el material de relleno son aluviales volcánicos; en esta unidad geomórfica afloran muy bien los terrenos correspondientes al piedemonte de la cordillera del Barroso por lo que se han estudiado con detalle distinguiéndose hasta 3 unidades aluviales.

Las pampas tufáceas de Alto de la Libertad, conformadas enteramente por los depósitos tufáceos, de “nubes ardientes” con materiales sólidos eyectados por las erupciones piroclásticas de Chachani que avanzaron y cubrieron un área muy extensa en la parte occidental de Arequipa. Llegaron a avanzar y transponer el límite morfológico del batolito de la caldera, ya que se encuentra tufos en las

quebradas que cortan dicha cordillera a altitudes de 2300 m. Dichas nubes avanzaron con dirección sur y probablemente hacia el este, donde también rellenaron algunas zonas como las quebradas Nacaco y Huarangueros.

El Valle del Chili, esta geoforma atraviesa entre los volcanes Chachani y Misti cortando esta cadena volcánica; en el sector aguas arriba forma un cañón imponente y espectacular con aguas permanentes durante todo el año. Las paredes verticales (escarpas) muestran varias unidades que corresponden a los diferentes rellenos producidos por las erupciones volcánicas.

La llanura de inundación de Arequipa, corresponde a los terrenos que fueron rellenados en las etapas de crecidas del paleorío Chili; su área de influencia es importante, alcanzando los 10 Km. de longitud por 4 Km. de ancho. El material de relleno corresponde a facies fluviales de tipo en trenza anastomosado, con material grosero.

UNIDADES RELACIONADAS AL MISTI:

El cono volcánico aislado, que es motivo de admiración por su perfecta forma cónica. es el menos afectado por la erosión de los tres volcanes, ya que su cono superior corresponde a la última etapa volcánica reconocida en la zona.

Planicie aluvial de Piedra grande, que corresponde a torrentes aluviales que progradaron del Misti hacia el sur-oeste cubriendo una gran área que alcanza la parte nor-este de Arequipa (Mariano Melgar). El material corresponde esencialmente a aglomerados de rocas volcánicas. Se les conoce como los flujos de lodo rosáceos.

El macizo de Huarangueros, constituido de andesitas del volcán Misti, parece corresponder a una gran masa que se desprendió del macizo del volcán, Esta geoforma ha originado que gran parte de las napas aluviales que avanzaban tendieran a canalizarse evitando este obstáculo.

El abanico aluvial de Malval, en la zona mas oriental de la región Arequipa, cortado por la gran quebrada de agua salada. El abanico progresa hacia el sector de Tilumpaya y Chiguata. Los materiales son muy similares a los del abanico del aeropuerto, sin ninguna selección y de textura heterogénea.

UNIDADES RELACIONADAS AL NEVADO PICHU – PICHU:

La Avalancha de lodo que se desplomó y progresa desde el flanco occidental del Pichu- Pichu, fueron grandes masas de barro volcánico con agua fría. Estos depósitos mayores de 200 m. de espesor son flujos que arrastraron todo lo que encontraron a su paso (bloques de tufos de mas de 400 m. de diámetro), y bloques angulosos de volcánicos andesíticos y tufáceos. La masa es caótica no mostrando ninguna clasificación ni estratificación y cubre todas las rocas que afloraban (volcánicos ?). Esta litología es fácilmente erosionable dando lugar a quebradas profundas con paredes escarpadas de hasta 200 m. de altura. Esta unidad esta afectada por la erosión eólica alveolar dando lugar a oquedades en la matriz. Los materiales mas finos se encuentran en las partes más distales alcanzados por estos flujos de lodo. El frente de estos flujos de lodo forman colinas de poca altitud que se alzan hasta 50 a 100 m. encima de las planicies inundadas por los depósitos fluviales; uno de estos frentes se ve muy bien inmediatamente al este del terminal terrestre, subiendo hacia el sector de Cerro Juli.

El Batolito de la Caldera, gran geoforma que representa una barrera que limita la llanura de Arequipa por el sur, está constituida por una cordillera de rocas intrusivas de edad terciaria, que solo fue parcialmente transpuesta por las potentes nubes ardientes que depositaron los tufos.

3.3. ESTRATIGRAFÍA

En el área de Arequipa ocurren las siguientes unidades litológicas (figuras N° 8):

El basamento en la zona puede estar constituido por rocas metamórficas (gnéis de Charcani), rocas sedimentarias representadas por las rocas clásticas y carbonatadas del Jurásico (Grupo Yura) y por rocas intrusivas pertenecientes al Batolito de la Caldera que afloran en la parte meridional de la ciudad.

Encima del Basamento ocurren unas rocas que han sido poco estudiadas y que corresponden a andesitas y basaltos que afloran en la zona del puente Cincel (Cárdenas, 1960); inmediatamente son sobreyacidos por el volcánico ignimbrítico **Sencca**, que corresponde a coladas en forma de “nubes ardientes” eyectadas en las etapas finales de la erupción del Chachani. Se distinguen en la región de Arequipa hasta cuatro (4) tipos de tufos:

El Tufo Basal (20 m.) caracterizado por su color blanco a rosáceo y formar un agregado de fragmentos de pómez, vidrio y cristales de cuarzo, feldespatos y otros minerales; se presenta a veces bien consolidado (tufo macizo en Yura de Jenks, 1948), aflora en Mollebaya Chico (Frente a la est. El Arenal), en Quishuarani, en la Qda. Canaura. En la zona de Casablanca (Huaico) en la parte superior se han depositado sedimentos tufáceos de probable origen lagunar (hasta 10 m.), intercalados con brechas de rocas intrusivas (batolito).

Según la secuencia de la estratigrafía reconocida (Cárdenas, 1960), ver tabla 2, en la margen izquierda del cañón del Chili (Chilina) afloran unos derrames riolíticos de tonos rosáceos y tufos bastante compactos (30 m.), estos infrayacen a un flujo de lavas traquíticas (Charcani) de textura porfirítica, color marrón claro, mucho mas duras y compacta que las riolitas anteriormente descritas (ver fotografía 1).

Luego ocurre un **Tufo Rosado** que se caracteriza por la ausencia de cuarzo y corresponde a flujos fragmentarios que afloran en Quishuarani, Uchumayo Mollebaya Chico, Tiabaya etc. Estos tufos se originaron por una explosión muy violenta y de gran distribución. alcanzando un espesor de hasta 80 m. y en general se presenta inconsolidado (ver Tabla N° 2).

Hacia arriba distinguimos el **Tufo Blanco compacto (o sillar)** de naturaleza riolítica, formado por la descarga de nubes de gases calientes y móviles cargados de polvos con abundantes fragmentos pesados; se presenta coherente y está constituido por mezclas heterogéneas de material desmenuzado fino y grueso, en gran parte vídrioso y poroso, con algunos fragmentos de cuarzo, feldespatos y biotitas y además fragmentos (10 cm.) de pómez y lava redondeados o angulosos. Se caracteriza por presentar juntas columnares que facilitan su explotación como roca de construcción (Jenks, 1948). En la zona de la Qda. Canaura parece presentar dos miembros: el inferior con tonos blanco grisáceo, debido a la mayor cantidad de inclusiones, más recristalizado y desvitrificado que le da mayor compacidad y dureza; además responde al golpe con una tonalidad característica la que es más reducida en el típico sillar (2do miembro). Este tufo piroclástico está rellenando superficies de erosión del tufo rosado y a veces se muestra en posición concordante.

El **Tufo Estratificado “salmón”**, que se dispone en capas (separadas según el tamaño de partículas) que siguen la topografía subyacente, son de composición riolítica y un grado avanzado de uniformidad, carecen de cuarzo y presentan propiedades puzolánicas (cementantes). En general es poco coherente, sobreyaciendo al compacto “sillar”, alcanza un espesor de 50 metros. La ocurrencia de depósitos de puzolanas, muchos de ellos de valor comercial, lo diferencian del tufo rosado, con el que se puede fácilmente confundir por su gran similitud. Ocupa una extensa área en el triángulo formado por el río Yura y río Chili.

Los mejores afloramientos de esta unidad se les observa en el corte del río Chili entre Chilina y Charcani, en la margen derecha donde se asocia con capas de piedra pómez. Todas estas etapas eruptivas correspondientes a la actividad del volcán Chachani y en menor grado por el Misti y Pichu Pichu, han sido clasificadas por Jenks (1948), Tabla N° 1 y por Cárdenas, 1960, Tabla N° 2.

Sigue hacia arriba en la columna, la Fm. Cuíco (Laharie, 1973) o Capillune regionalmente (Mendivil, 1965) conformada por conglomerados y areniscas color negro en la parte basal los cuales erosionan a los tufos “salmón” (ver fotografías 12, 13 y 14).

Esta unidad no ha sido mapeada por Vargas (1970), solo reconoce un conglomerado aluvial Pleistoceno que está en discordancia erosional sobre el volcánico Sencca. Esta unidad fue reconocida por Guizado (1968) en el cuadrángulo de Aplao y que se continua hacia el sector SO del cuadrángulo de Arequipa (pampas de Vitor y Siguas). Aunque es importante mencionar que Vargas (1970) cita unos afloramientos en el valle del río Chili (Charcani) y en Yura viejo entre los tufos Sencca y los volcánicos Chila, conformados por piroclásticos redepositados de color gris oscuro y amarillo pardo, que tienen reducido espesor. Esta Fm. ha sido ampliamente cartografiada en la zona NO del cuadrángulo de Characato. En la zona del cono norte de Arequipa aflora muy bien en los cortes de las quebradas, erosionando y rellenando paleorelieves del tufo “salmón” a veces redepositado. La litología que caracteriza esta unidad son conglomerados fluviales a la base luego areniscas volcánicas de color negro, interestratificada con capas delgadas de arcillas y areniscas friables, arcillas, piroclásticos y niveles de tufos horizontales redepositados; en el sector del cono norte alcanza un espesor de aproximadamente 30 m. Además en este sector se ha distinguido dos miembros (González, 1984): uno inferior (Capillune 1) con tonos gris oscuros y de baja coherencia y el superior (Capillune 2) con litología lodolítica de tono mas claros (beige y pardo), bien cohesiva (ver fotografía 15). La parte inferior presenta interestratificaciones de bancos delgados de ceniza volcánica (15 m.) mas o menos horizontales y facies clásticas finas aluviales. El Capillune 2 se caracteriza por presentar una interestratificación de arenas, arenas gravosas y lodos gravosos y con bloques (10 m), mas o menos con estratificación horizontal y regularmente compacta (ver fotografía 15).

En la zona norte, antes de llegar al balneario de Yura, en la quebrada El Cuico ocurren unas facies de arenas volcánicas, algo calcáreas, interestratificadas con

capas delgadas de arcillas y tufos redepositados, que se presentan como terrazas pequeñas y que se les ha definido como una unidad estratigráfica por los geomorfólogos franceses y que se le correlaciona con la Fm. Capillune ampliamente distribuida (Laharie, 1973). Esta unidad ha sido correlacionada por Palza (1974), con la segunda crisis climática del Pleistoceno.

Inmediatamente encima del de la Fm. Cuíco se caracteriza la paleosuperficie de meteorización y erosión (P - II) que marca el contacto con los basaltos de la Fm. Chila (figura N° 9). Esta unidad altamente cohesiva es considerada como la inferior del volcánico Barroso, aflora restringidamente como frentes de coladas, que se prolongan un corto trecho hacia el inicio del pedimento. Litológicamente esta constituido por andesitas gris claras a oscuras y, afaníticas y algunos derrames basálticos con textura vesicular (ver fotografías 18 y 19).

En la zona urbana de Ciudad de Dios se aprecia que sobreyaciendo a la Fm. Cuíco (Capillune), en la zona de inicio del pedimento, ocurre los volcánicos andesíticos del Chila (ver fotografía 16); unidad inferior del Barroso que infrayace a 3 unidades lenticulares de materiales aluviales que probablemente representen diferentes crisis climáticas, (fases húmedas) que afectaron el área en el Pleistoceno. Estas unidades están separadas por típicas paleosuperficies de meteorización - erosión, caracterizadas por la presencia de niveles de tonos claros que corresponden a niveles tobáceos fácilmente reconocibles, con abundantes fragmentos de pómez con espesores de 30 a 50 cm. pero bien notorios, que probablemente representen etapas de volcanismo piroclástico explosivo en la zona de la cordillera.

A estos materiales hasta la actualidad se les ha englobado bajo el término de "Aluviales del Aeropuerto", los cuales ocupan las pampas del Cural y zonas aledañas al aeropuerto, como la zona norte de Arequipa. En general están constituidos de materiales de aluvionamiento, en algunos casos conglomerados poco consolidados, algunas gravas (guijas, guijarros y cantos) y matrices limo - arcillosas sin mostrar mayor selección; alcanzan espesores superiores a 30

metros; más adelante los trataremos en forma detallada teniendo en cuenta su importancia en el establecimiento de una estratigrafía detallada y precisa para el Pleistoceno, lo cual siempre ha sido dejada de lado, y no ha sido investigada.

Después y por intermedio de una paleosuperficie de erosión y meteorización (P-V) (Figura Nº 9) ocurren los volcánicos Barroso, que sobreyacen a las unidades del abanico aluvial del aeropuerto. Este volcánico constituye la mayor parte del Chachani (1000 m.) y está constituido por coladas de lava andesíticas (color gris) con disyunción columnar que a veces por intemperismo toman tonalidades rojizas a marrones. También se ha observado en el sector NE de Ciudad de Dios unas facies de aglomerados volcánicos andesíticos que alcanzan hasta 50 m. de potencia con bloques que muestran una alta esfericidad (González, 1984). Se le asigna una edad 700,000 (Tamayo, 1971) es decir del Pleistoceno medio.

El volcánico Barroso en su parte superior presenta unas coladas de lava (Volcánico Cortaderas) que muestran poca alteración en comparación a las del resto de grupo Barroso y que representan la etapa paroxismal de la erupción del Chachani, originando el complejo de domos de Cortaderas. Las lavas constituidas de andesitas porfiríticas de colores gris rosáceo a abigarrado, parecen haber sido más viscosas; los bloques son porosos y presentan un aspecto escoriáceo con "arrugas", de dimensiones que varían de algunos cms. hasta 3 metros y el conjunto puede alcanzar espesores de hasta 800 m.. En la zona de la carretera a Yura se le encuentra muy fracturada mostrando una disposición caótica compuesta de fragmentos semiredondeados de tallas variadas (máximo 2 m.). El frente fracturado de aspecto caótico de las coladas podría estar relacionado al arrastre de los bloques de andesita por la lava viscosa de avance (Diban, 1971).

Como **Depósitos Recientes** tenemos (Columna Estratigráfica del Cenozoico en el piedemonte del Sur del Perú):

Los **Fluvioglaciares**, caracterizados por material de aluvionamiento conformado por conglomerados poco consolidados; pertenecen a las últimas etapas glaciares,

acarreados por la fusión de glaciares y depositados como morrenas, pero de origen volcánico. Alcanzan espesores de hasta 20 m.

Los depósitos **Piroclásticos** (ceniceros), que representan la actividad volcánica más reciente están constituidos por capas de lapilli de colores blanco-amarillentas, con fragmentos de pómez, lavas, escorias y bombas, las cuales alternan con delgados niveles de areniscas volcánicas, capas de arenas y algunas cenizas volcánicas negras. Pueden alcanzar espesores de 15 a 20 m., pero es variable según la topografía. Se infiere que este evento ocurrió entre las dos últimas crisis climáticas (80,000 - 8,000 años).

Los depósitos **Morrénicos**, que se localizan cerca a las cumbres de los principales conos volcánicos. Los materiales son de origen volcánico y la potencia variable; corresponderían a la última glaciación (8000 - 6000 años).

Los materiales **Aluviales** recientes son producidos por aluvionamientos que rellenan el fondo de las quebradas. Litológicamente presentan conglomerados poco consolidados, gravas y arenas y menor arcilla; la potencia de estos depósitos depende del carácter de la depositación y configuración topográfica.

3.4. LOS MATERIALES ALUVIALES PLEISTOCÉNICOS: CRISIS CLIMÁTICAS

Hemos podido diferenciar hasta 5 unidades aluviales separadas por paleosuperficies de meteorización - erosión (figuras 8 y 9):

La primera unidad aluvial (Fm. Cuico o Capillune), representa una primera gran crisis climática durante el Pleistoceno. Esta unidad muestra unas facies de conglomerados, caracterizadas por agentes de transporte y depositación de elevada fluidez que dieron lugar a materiales conglomeráticos y arenas (figuras 8 y 9). Sobreyace a los volcánicos Sencca por intermedio de una superficie de erosión - meteorización (P - I). En el sector de Ciudad de Dios, Gonzáles (1984), distingue

dos facies: Una inferior caracterizada por su color oscuro, estratificación horizontal de pobre desarrollo y relativa baja coherencia, conformada por un horizonte de conglomerados fluviales a la base y una interestratificación de bancos de arenas gravosas y arenas con algunas intercalaciones de capas delgadas de cenizas volcánicas; y la facie superior claramente diferenciada por su buena a regular cohesividad, de naturaleza lodolítica y colores predominantes beige a pardo; tiene una potencia aproximada de 10 metros y esta constituida por una alternancia de capas de arenas, arenas gravosas (con abundantes cantos y bloques) y lodos gravosos que se arreglan en una estratificación casi horizontal.

La segunda unidad (que según nuestra terminología corresponde al Aluvial - 0), no aflora muy bien, siempre ha sido observada como remanente o en afloramientos pequeños; según Gonzáles (1984), esta unidad sobreyace mediante una superficie de erosión a la Fm. Capillune (P - II). El espesor aproximado es de 5 metros, y presenta una estratificación grosera casi horizontal. Los tonos van de rosáceo a pardo rosáceo, y se le interpreta como un tufo redepositado, que no presenta fragmentos del volcánico Chila, por lo que se infiere que podría ser anterior a dicho volcánico.

EL ALUVIAL 1 (Alv. - 1)

Esta unidad sobreyace a la anterior por intermedio de una superficie de reactivación que traduce un aumento de energía y fluidez del medio de transporte, esta representada en el campo por una delgada (5 cm.) capa de arenas oscuras (ver negras) alternadas con horizontes mas finos de tonos claros, que muestran una estratificación algo ondulada; mostrando un arrastre por corrientes de agua; no se le ha asignado un numero debido a que no ha podido ser bien caracterizada.

Son materiales más o menos homogéneos, que se presentan muy conspicuos en el sector oeste de Ciudad de Dios, a lo largo de los cortes de la carretera Arequipa - Yura, sobretodo en el área donde no ocurre el volcánico Chila; la unidad está caracterizada por presentar delgadas (5 mm) capas sinuosas de materiales muy

finos (arcillas y cenizas) que se intercalan en bancos de arenas gravosas y arenas de color gris, algo rosáceo (figura N° 9, ver fotografía 23).

Las facies muestran un arreglo cíclico con horizontes de arenas gravosas, bien clasificadas y arenas y los niveles delgados arcillosos finos de colores café - rojizo ya citados líneas arriba; estos niveles laminares probablemente fueron depositados por decantación. Estos niveles pueden interpretarse como el material resultante de las divagaciones de los talwegs, en un paleo-glacis (González, 1984). Algunas mediciones efectuadas por González (1984) de la dirección de drenaje, dan como resultados rumbos de N 245 E y N- S para algunos paleocauces. Esta unidad de aproximadamente 15 m. de espesor, presenta una regular estratificación horizontal y en su parte inferior se puede distinguir una capa de color amarillento (toba) con abundantes fragmentos de pómez.

EL ALUVIAL 2 (Alv. - 2)

Sobreyace a la unidad anterior por intermedio de una paleosuperficie de erosión - meteorización (P - III); la unidad es claramente distinguible, y caracterizada en algunos sectores por biselarse entre las unidades Alv. - 1 y Alv. - 3 (ver fotografía 24).

A estos depósitos se les caracteriza por su marcado tono rosáceo, el carácter heterogéneo con bloque de variadas dimensiones y su matriz areno - tufácea deleznable (figura N° 9). El material observado son guijas y guijarros desde 1 cm. hasta 10 cm., cantos y bloques de 10 a 20 cm. hasta 50 cm y algunos métricos; la naturaleza de los cantos es predominantemente andesítica y presenta mayormente colores claros. La distribución no muestra ninguna estratificación ni arreglo sobretodo en su parte inferior; los horizontes en la parte superior presentan un color rosáceo a gris - pardo rosáceo bastante típico y es de naturaleza friable. Podría tratarse de una redepositación de materiales tufáceos sin mayor presencia de agua en un medio de cono de escombros.

En síntesis, se caracteriza por sus colores rosáceos y naturaleza poco friable; alcanza hasta 15 m. de espesor no presenta ninguna estratificación salvo localmente y algo muy grosero. Los bloques son de variada talla desde 20 cm. hasta 1 metro mayormente de andesita, englobados en una matriz limo tufácea muy friable (ver fotografía 27 y 28).

Esta unidad localmente muestra 2 miembros en la quebrada "Límite " (ver fotografía 26), los cuales podrían tratarse de nuevas unidades aluviales, sobretodo la que erosiona los depósitos Alv. - 1 y Alv. -2, en diferentes sectores (ver fotografía 31). El primero conformado por facies conglomeráticas, con arenas gruesas de colores gris oscuros bien compactadas que probablemente pertenezcan a un paleocauce o canales fluviales erosivos; a su vez este miembro que podría representar un antiguo río está cubierto por un horizonte compactado de material tobáceo con algunos bloques no muy notorios que los interpretamos como una avalancha de lodo con material aluvial sobre el paleocauce (ver fotografías 26 y 31).

ALUVIAL 3 (Alv, - 3)

Esta unidad sobreyace a la anterior por intermedio de una paleo-superficie de erosión - meteorización (P - IV), la cual sobreyace a un nivel tobáceo blanco amarillento con abundantes fragmentos de pómez de la parte superior de la unidad aluvial 2. La superficie es claramente observable (ver fotografía 25, 26, 30 y 31).

El material predominante es areno - gravoso, alcanzando espesores de hasta 15 m, el color es gris a gris oscuro bastante arcilloso y por lo tanto cohesivo (figura N° 9). Las facies corresponden a cenoglomeraditas (flujos de barro), infiriéndose una o varias coladas fangosas como medio de transporte y depositación; presentan algunas capas endurecidas (1 - 1.5 cm.) de arenas - limo que forman "encostramientos" de colores gris, marrón - rojizos. La parte superior presenta un nivel tobáceo de color amarillo - blanco y otro de lapilli con abundantes fragmentos

de pómez de 20 cm de espesor que hacia arriba es coronado por un espeso suelo, todavía con fragmentos y restos de raíces (ver fotografías 33, 34, 35 y 36). Generalmente esta paleosuperficie (P - V) esta cubierta por material coluvional en el área de Ciudad de Dios (ver fotografías 32, 34, 35 y 36).

Esta unidad parece haberse sedimentado durante una etapa distensiva (N_5) del Pleistoceno reciente como lo argumentan pequeñas fallas subverticales, normales de saltos de mas de un (1) metro. Estas fallas controlan una estructura de tipo graben de 15 m de ancho donde se observa que los niveles horizontales (encostramientos) han caído a depresiones en el terreno, distorsionándose y mostrando una ondulación y en general un aspecto caótico de todos los sedimentos (ver fotografía 22).

3.5. ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO

Las facies que caracterizan los depósitos aluviales Pleistocénicos, son predominantemente de abanicos aluviales, siendo importante mencionar que son mas comunes los fanglomerados (flujos de barro), menos fanglomerados (canales fluviales) y las de materiales redepositados en un clima árido a semi-árido.

Los depósitos presentan una granulometría gruesa, desde guijas hasta bloques métricos; predominan los aglomerados, algunos conglomerados y poco sedimento fino. La gran mayoría de abundantes clastos son de naturaleza andesítica, de formas subangulosas a subredondeadas, traduciendo una procedencia cercana o poco transporte del material; por lo tanto el grado de selección de los sedimentos es pobre. En general los depósitos muestran una pobre estratificación horizontal, predominando capas potentes y un fuerte decrecimiento del tamaño de grano en la dirección del transporte. Los colores de las unidades son de tonalidades claras (rosáceo, gris a ocres).

3.6. LAS PALEOSUPERFICIES DE EROSIÓN - METEORIZACIÓN Y SU RELACIÓN CON LAS CRISIS CLIMÁTICAS Y FASES VOLCÁNICAS DEL PLEISTOCENO

Las Paleosuperficies, son discontinuidades que corresponden a los suelos de una determinada época, tiempo en el cual se depositaron materiales aluviales producto de las crisis climáticas (ver fases húmedas), para luego prevalecer condiciones de erosión - meteorización en la nueva superficie formada; Estas superficies permiten separar y determinar unidades cronoestratigráficas geológicas - geomorfológicas perfectamente reconocibles y mapeables a escala regional. Los niveles o capas de colores claros con abundantes fragmentos de pómez, representan las etapas de incremento de la actividad explosiva piroclástica en la zona de la cordillera.

Es de suma importancia tratar de datar radiométricamente estas superficies, ya que permitirían precisar los eventos y edades absolutas durante el Plio-Pleistoceno.

En el caso de la paleosuperficie (P - I), corresponde al contacto entre las formaciones Sencca a la base (datado del Plioceno superior - Pleistoceno inferior); sobreyacida por la Fm. Cuíco localmente y Capillune a nivel regional. Esta unidad de fanglomerados presenta una notoria estratificación de horizontes conglomeráticos y bancos de arenitas piroclásticas traduciría una primera crisis climática del Pleistoceno; la anterior gran crisis (cambio climático) esta asociada con el contacto entre las formaciones Maure que infrayace a Sencca (P - 0) en el límite Plioceno - Pleistoceno. Respecto a la edad de Capillune se puede inferir que es mas joven que 1.93 ma.. que es la edad mas reciente para los tufos Sencca, por lo que la situaría en el Pleistoceno inferior medio.

La primera paleosuperficie (P - I) muestra a la Fm. Capillune descansando sobre la superficie de erosión y meteorización del volcánico Sencca; sobre la que se depositan los clásticos del Capillune (ver fotografía 14).

La segunda paleosuperficie (P - II) corresponde a la superficie labrada sobre las facies detríticas de Capillune (primera crisis climática); los aluviales denominados como Alv - 0, sobreyacen ya sea a las facies clásticas del Capillune o a los volcánicos Chila, en el primer caso esta superficie presenta un paleosuelo de tonos rojizos caracterizado por la gran abundancia de clastos de rocas de Chila, brechoso, tipo aglomerado bien cementado (ver fotografía 20).

La tercera paleosuperficie (P - III) representa una superficie de erosión y meteorización formada al tope de la unidad Alv. - 1, caracterizada por la ocurrencia de una capa de 25 cm. de toba con tonos claros (blanco - amarillento); también se observa localmente el biselamiento de la unidad Alv. - 2 entre las unidades 1 y 3 (ver fotografía 24).

La cuarta paleosuperficie (P - IV) que se ha podido diferenciar muestra una discontinuidad inmediatamente encima de un nivel de lapilli (con fragmentos de pómez); superficie que se hace evidente en el cambio de color de rosáceo (Alv. -2) a gris (Alv. - 3), (ver fotografía 25).

La quinta paleosuperficie (P- V), es la que corresponde al contacto de los volcánicos Barroso (Cortaderas) sobre los materiales aluviales (del Aeropuerto), ya descritos anteriormente; también esta paleosuperficie se pone en evidencia en el contacto entre los materiales aluviales (1, 2 y 3) y los coluvionales que los sobreyacen (ver fotografía 32). El más común es el contacto de los materiales coluvionales sobre el horizonte de meteorización (suelo de 0.80 cm.) de la unidad Alv. - 3 (ver fotografía 34 y 35).

3.7. CORRELACIONES

En los trabajos de investigación sobre los suelos y unidades geotécnicas (zonificación) realizados en la ciudad de Arequipa (Yanqui, 1990a), se constata que varias de estas unidades pueden ser correlacionadas perfectamente a nivel

de Arequipa sea por sus características sedimentológicas - texturales sea por sus relaciones de contacto, estratigráficas, observables en el campo (figura N° 10).

La unidad Alv. - 1, tiene su equivalente al otro margen del río Chili en la quebrada Las Canteras (situada inmediatamente al este de la Qda. Huarangueros), donde infrayace al aluvial 2, mostrando las características de material más homogéneo y niveles con mayor grado de estratificación; La parte superior muestra estratificación mas ondulada (contorsionada) por efecto de un aumento de energía en su medio de sedimentación (glacís que pasa a fluvial). Esta unidad sería equivalente a los flujos de barro ampliamente distribuidos en el sector meridional de la ciudad.

Así tenemos que la unidad **Alv. - 2** con su característico tono rosáceo, a veces algo estratificada, distinguiéndose horizontes de 1 a 2 metros de colores grises y rojizos y la naturaleza friable, puede ser correlacionada con los afloramientos de la quebradas Las Canteras y Huarangueros donde muestran un espesor de 20 a 30 metros. donde también muestran pequeños canales fluviales que rompen la monotonía; esta unidad. corresponde a los aglomerados de gravas angulosas, que están en contacto con las andesitas del macizo de Huarangueros, de origen volcánico que distingue Paredes (1970). También sería equivalente a los denominados flujos de lodo rosáceos (Yanqui, 1990), los cuales sobreyacen a los flujos de barro brechosos de la parte sur -oriental de Arequipa.

Los materiales de la unidad **Alv. - 3**, por sus características sedimentológicas y colores grisáceos pueden ser tentativamente correlacionados con los depósitos de Acequia alta y Umacollo, los cuales a su vez son equivalentes según Mendivil (1965) a los depósitos de Chiguata en el sector oriental.

3.8. ESTRUCTURA

En la Figura N° 6, se presenta un modelo de interpretación estructural del sur del Perú, donde el área de Arequipa queda limitada por dos megafallas, al NE y al SO, las cuales controlaron, la ocurrencia de la cordillera volcánica por una parte y del Batolito de la Caldera por el otro, geofomas que constituyen los límites de la cuenca de Arequipa.

En la zona de Arequipa se infiere una falla de dirección E - O que probablemente controló el río Mollebaya y posteriormente el río Chili cuando cambia de dirección de N - S a E - O.

La asimetría del valle del río Chili, esta probablemente asociada a que el flanco Oriental, presenta en la parte superior de la escarpa una colada de basalto, la cual ha soportado la erosión, mientras que el otro flanco no presenta dicha unidad, dura y resistente, por lo que dicha margen occidental ha sido mas erosionada a través de la evolución del valle.

4. GEOTÉCNIA

4.1. TRABAJOS REALIZADOS

En un lapso de 2 meses aproximadamente se ha llevado a cabo el trabajo de revisión bibliográfica de todos los estudios realizados a nivel de la mecánica de suelos y zonificación de la zona urbana de Arequipa. Es importante mencionar que los trabajos con mas de 20 años de antigüedad son los que sentaron las bases (Gutiérrez, 1973, Cárdenas, 1973) y de ahí, salvo Yanqui (1990) y Ticona (1994), no se ha llevado a cabo una revisión seria de la geotecnia de Arequipa. Es importante mencionar que existen varios trabajos de tesis efectuados en la década de los 90 por ingenieros de la U.N.I (Universidad Nacional de Ingeniería, Lima), a los cuales no hemos tenido acceso, cuyos datos están algo resumidos en el trabajo de tesis de ingeniería geofísica de Ticona (1994).

Al mismo tiempo se ha llevado a cabo la excavación de la calicatas que permitieron recolectar muestras (anexo A), para los análisis de suelos requeridos, con la finalidad de evaluar la capacidad portante de los diferentes lechos de fundación (suelos), (ver fotografías 4, 5, 6 y 7). Las calicatas fueron programadas en las zonas de menor concentración urbana, considerando la posibilidad de expansión urbana (AP-1A). Las calicatas alcanzaron profundidades entre 1.80 m. a mas de 5 m.. El muestreo se ha llevado a cabo tratando de identificar todos los horizontes que se diferenciaban en las calicatas (anexo A). Se han recolectado 65 muestras las que fueron trasladadas al laboratorio de Mecánica de suelos, en la Facultad de Ingeniería Civil, de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

Los planos presentados en los apéndices, están basados en observaciones propias como en la data de trabajos anteriores, en el caso del geológico (Rondón, 1964), en el de suelos (Gutiérrez, 1973, Cárdenas, 1973) y el geotécnico y de riesgos (Ticona, 1994).

4.2. ANÁLISIS Y ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS

En el laboratorio de mecánica de suelos, se han llevado a cabo los ensayos requeridos de acuerdo con las especificaciones de la norma técnica de edificaciones de suelos y cimentaciones (E. 050).

Se han realizado los siguientes análisis:

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Este se efectúa con una combinación de cribado y de análisis mecánicos en agua, conforme a la norma ASTM D - 42.

HUMEDAD

Se define la humedad de un suelo, como el peso de agua que contiene dividido por el peso del suelo seco, de acuerdo con la norma ASTM D-4643.

LÍMITES DE ATTERBERG

Se llevó a cabo la determinación del límite líquido, mediante la “cuchara de Casagrande” y el límite plástico conforme a la norma ASTM D-4318.

PESO ESPECÍFICO

Es la relación entre el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada a una temperatura ambiente, según la norma ASTM D - 854.

DENSIDAD RELATIVA

Corresponde al estado de compacidad de un suelo respecto a sus estados de un material más suelto y más denso, según la norma ASTM D-4253.

CORTE DIRECTO

Los suelos invariablemente fallan bajo una combinación de esfuerzo normal de compresión y esfuerzo cortante en plano de falla, en donde el esfuerzo cortante normal presenta una gran parte o casi toda la fricción o resistencia al corte, de acuerdo a la norma ASTM D -3080.

CONTENIDO DE SALES SOLUBLES

Con las muestras obtenidas, se han realizado los análisis para la determinación del contenido de sales solubles, cloruros y sulfatos, según la norma BS - 1377.

ANÁLISIS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD PORTANTE DE LOS SUELOS

Con los resultados obtenidos de los ensayos efectuados en el laboratorio, para los efectos de la determinación de la capacidad portante de los suelos es necesario determinar los parámetros de resistencia de los suelos; estos son: el peso volumétrico y el ángulo de fricción interno, además de otro parámetro importante que es la profundidad de desplante de la cimentación.

Considerando estos parámetros, para el caso de la predominancia de suelos granulares, es recomendable la aplicación de la teoría de Meyerhoff:

$$q = cNc + \gamma DNq + 0.5 \gamma B N \gamma$$

donde:

c = Cohesión.

γ = Peso unitario volumétrico.

D = Profundidad de cimentación.

B = Ancho de cimentación.

N_c = Coeficiente de capacidad de carga correspondiente a la cohesión.

N_q = Coeficiente de capacidad de carga correspondiente a la sobrecarga.

N_γ = Coeficiente de capacidad de carga correspondiente a la fricción.

Conforme a lo expresado, el valor final de la capacidad de carga admisible, está determinada por la presión de trabajo, obtenida a partir de la última capacidad de carga afectada por un factor de seguridad.

Siendo el factor de seguridad considerado para el tipo de suelos presentes en las áreas de estudio que son predominantemente granular, por lo que se aplicará el factor de seguridad $FS = 3.0$.

4.3. CARACTERIZACIÓN DE UNIDADES GEOTÉCNICAS

Se ha reconocido, 13 unidades geotécnicas, de acuerdo con las propiedades físicas y mecánicas de los suelos, así como la geología local de la zona (ver Tabla N° 3; AP-1D).

4.3.1. ROCAS PRE-TERCIARIAS (G1-rpt)

Conformada por las rocas (intrusivas) que edifican el batolito de la caldera, también se incluye el Gnéis de Charcani (roca metamórfica) y las rocas sedimentarias mesozoicas. En donde se asientan urbanizaciones tales como Vista Alegre, 28 de julio, La Merced, San Juan de Dios, 13 de Agosto y Tingo en el distrito de Hunter; Alto de Amados, La Aparecida, San Pedro y Sachaca en el distrito de Sachaca, son las rocas más antiguas de la región y constituyen la unidad más estable. En los últimos 40 años todos los afloramientos aislados de rocas intrusivas en el sector sur de la ciudad han sido ampliamente cubiertos por

la expansión urbana (AP-1F). Las características geotécnicas de esta unidad se presentan en la tabla N° 3.

4.3.2. ROCAS VOLCÁNICAS DEL CHILA (G2-rvchi)

Esta constituida de derrames andesíticos y basálticos; presentan muy buena condición geotécnica por su elevada cohesión de intraclastos ($c > 2 \text{ Kg/cm}^2$), abarcando los siguientes sectores, Urb. Leones del Misti, Porvenir, Atalaya, Buena Vista, Jerusalén. En la tabla N°. 3 se resumen las principales características geotécnicas de esta unidad.

4.3.3. VOLCÁNICO SENCCHA COMPACTO (SILLAR) (G3-si)

Esta caracterizada por un tufo blanco coherente y compacto resistente al corte, no presentando uniformidad en sus características físico mecánicas en las diversas zonas donde se halla expuesto, presente en las zonas de Río Seco, parte baja del Cono Norte, zona de las Pampas de Polanco. Las características geotécnicas se presentan en la tabla N° 3.

4.3.4. SUELO DE ACEQUIA ALTA (G4-saa)

Presenta una serie bien estratificada con materiales que van de arena a gravilla, denso con partículas subredondeadas, presentando una cementación de la matriz, aparece en forma continua desde Yanahuara, hasta Acequia Alta, comprendiendo las Urbanizaciones Bello Horizonte, La Chacrita, La Marina, San Antonio, Señorial, Carmen Alto, entre otras en el distrito de Cayma. En el flanco occidental (derecho) del río Chili, forma un estrato subhorizontal hasta aproximadamente la zona de Cabrerías. Medina, (1991) señala las siguientes características geotécnicas para esta unidad (ver tabla N° 3).

4.3.5. ALUVIALES VOLCÁNICOS SEPTENTRIONALES (G5-avs)

Esta unidad aflora ampliamente como abanicos aluviales en la zona del cono norte como en el área correspondiente a la zona de cambio de pendiente de las faldas del Misti (Ap. 1-E). Los materiales son bastante heterogéneos predominando las facies de cenoglomeraditas (flujos de barro), pocos fanglomerados y depósitos de conos de escombros, donde la presencia de agua fue casi inexistente. Constituyen un buen lecho de fundación; las características geotécnicas se resumen en la tabla N^o. 3.

4.3.6. FLUJOS DE BARROS MERIDIONALES (G6-fbm)

Aflora ampliamente al sur y SE de la ciudad; características como la matriz cementante del material y la angulosidad de los fragmentos permiten tener buenas condiciones para la cimentación. Se extiende abarcando las Urbanizaciones de Ciudad Blanca, Israel, Alto Jesús, Campo de Marte, en el distrito de Paucarpata.

También en esta unidad se asientan los distritos de José Luis Bustamante y Rivero, las Urbanizaciones de Simón Bolívar, 3 y 4 de Octubre, San Martín, 24 de Junio, Salaverry, Cerro Juli y el distrito de Socabaya, las urbanizaciones Bellavista, La Campiña, parte oeste del distrito de Hunter, Urbanización Horacio Zevallos, Umapalca, Characato, Sabandía.

Aguilar (1991) indica las siguientes características geotécnicas para esta unidad (ver tabla N^o 3).

4.3.7. SUELO PUZOLÁNICO DE PACHACUTEC (G7-spp)

Asociado al tufo Salmón (color rosado a marrón rojizo) del volcánico Sencca, presentando características físicas muy uniformes, en tanto que las características mecánicas dependen del grado de compacidad y la cohesión; eliminando la superficie meteorizada, presenta buenas condiciones para la cimentación. Esta

unidad constituye la base de las Urbanizaciones: Alto de la Libertad, Cerrito los Álvarez, Cerro Colorado, Víctor Andrés Belaunde, Pachacutec, Tío Chico, Pampas Nuevas, San José de Tiabaya Las principales características geotécnicas se muestran en la tabla N° 3.

4.3.8. FLUJO DE BARRO PUZOLÁNICO (G8-fbp)

Asociado al flujo de barro rosáceo (Yanqui, 1990), de cohesión casi nula, teniendo buena compacidad; con agregados pomáceos bastante frágiles y quebradizos. Aflora en la zona este de la ciudad, comprendiendo a las urbanizaciones Apurímac, Alto Selva alegre, Gráficos, pampas de Polanco en el distrito de alto Selva Alegre, El Porvenir, Leones del Misti en Miraflores, Miguel Grau y Jorge Chávez. En los cortes de las quebradas Huarangueros y Santo Domingo los espesores alcanzan los 30 m. Según la correlación sugerida estos flujos equivalen a la unidad Alv. - 2 de la parte norte de Arequipa. La tabla N°. 3 presenta las características más notables de esta unidad.

4.4.9. EL SUELO ALUVIAL DE UMACOLLO (G9-sau)

Constituido por gravas y arenas gravosas, presentando variadas compacidades (variada densidad relativa), con partículas subangulosas a subredondeadas, extendiéndose hacia los dos flancos del río Chili; Se le observa en parte de Yanahuara, Antiquilla, Umacollo, Tahuaycani, en la margen derecha y, las Urbanizaciones de San Jerónimo, Ferroviarios, hasta el Parque Industrial en la Margen Izquierda. Las principales características geotécnicas se resumen en la tabla N°. 3.

4.4.10. SUELO ALUVIAL DE MIRAFLORES (G10-sam)

Material andesítico friccionante sin cohesión, partículas angulosas a subredondeadas, poco suelto, compacidad variada, esta unidad es muy errática. Esta unidad presenta varias zonas de relleno, haciendo muy variable su capacidad

portante. Ocurre en las partes bajas de Miraflores, Mariano Melgar, parte de Paucarpata y parte del Cercado. Esta unidad presenta las características geotécnicas señaladas en la tabla N^o. 3

4.4.11. SUELO TOBÁCEO COMPRESIBLE (G11-stc)

Asociado a los depósitos piroclásticos de alto Cayma, Francisco Bolognesi y zonas aledañas en la margen derecha del río Chili, presentando dos horizontes con espesores variables entre 0.40 m y 0.50 m. con un nivel arcilloso intercalado; esta parte superficial de la unidad Alv. - 3, con el suelo formado puede alcanzar hasta 1.80 m. de espesor. Gutiérrez (1973) señala la ocurrencia de depósitos piroclásticos en los sectores de Independencia, Pampa de Polanco, Gráficos y colegio militar en la margen izquierda, donde esta conformado por ceniceros, lapilli, horizontes tobáceos con abundante pómez, donde alcanza hasta 2 m. de espesor. Presenta un peso unitario muy bajo, por lo que su valor como capacidad portante es bastante baja, abarcando los sectores de Alto Cayma, José Olaya, Víctor Andrés Belaunde hasta Nazareno en Cayma, Ciudad Municipal, Apipa II, Ciudad de Dios, en el Cono Norte. Las características geotécnicas se resumen en la tabla N^o.3.

4.3.12. SUELO PALUDIAL RECIENTE (G12-spr)

Se extiende en las zonas pantanosas de Lara, Bellapampa, El pasto, a ambos márgenes del río Socabaya, donde la napa freática llega a la superficie. El material es areno-limoso, color beige, y arenas finas de origen eólico, peligrosas en estado suelto, presentando las condiciones más desfavorables para la cimentación. Las características geotécnicas se presentan en la tabla N^o. 3.

4.3.13. MATERIALES COLUVIALES (G13-mc)

Son los depósitos que se circunscriben a zonas de talud, es decir afloran en las zonas límites donde los afloramientos rocosos cambian abruptamente de

pendiente. La zona mas accesible donde se pueden observar y caracterizar estos depósitos es al pie de los domos de Cortaderas. En estas zonas los depósitos son muy friables, sobretodo cuando predomina la matriz, areno - arcillosa, mostrando algo más de cohesividad cuando los bloques de rocas volcánicas, de variadas tallas se juntan (ver fotografía 37). Es necesario llevar un estudio de estos materiales para señalar sus principales características geotécnicas.

5. MICRO ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE AREQUIPA

De acuerdo con la caracterización de unidades geotécnicas y teniendo en cuenta los aspectos relacionados a la geología local, se propone una microzonificación sísmica de la ciudad de Arequipa (AP-1E). En diferentes sectores de la ciudad, las propiedades físicas y mecánicas de los suelos superficiales y en algunos casos datos del subsuelo, permiten distinguir hasta 4 zonas de riesgo: Alto, mediano, moderado, bajo.

De acuerdo con los resultados de los análisis y ensayos de caracterización y determinación de las propiedades físicas y mecánicas de las muestras recolectadas, se han caracterizado los siguientes tipos de suelos: (el sistema de clasificación empleado para el presente trabajo, esta basado en el Sistema de Clasificación Unificado (S. U. C. S.).

En primer término presentaremos de manera sintética los diferentes suelos que han podido ser diferenciados en base a las características granulométricas y valores de capacidad portantes.

SUELO I: Constituido por rocas Pre-terciarias, con características muy estables de resistencia; por lo tanto presentan valores de capacidades portantes mayores a 3.0 kg/cm^2 .

SUELO II: Caracterizado por suelos granulares, gravosos con matriz limo-arenosa bien compactos, la presencia del nivel freático se encuentra a profundidades mayores a 30 mts., presentando capacidades portantes mayores a 2.50 kg/cm^2 .

Estos suelos están caracterizados por gravas de formas angulosas mezcladas con arenas aluviales, con tallas de gravas comprendidas entre 4.74 mm - 76.20 mm; para el caso de las arenas, están comprendidas entre la fracción de 4.76 mm - 0.74 mm.

SUELO III: Gravas y arenas poco compactas, presencia de materiales piroclásticos, estratificados, predominantemente constituido por arenas media a finas, determinándose los valores de capacidad portantes menor o igual 2.0 kg/cm^2 .

Están caracterizados por la presencia de arenas, con un alto porcentaje de materiales finos con diámetros menores a 0.74 mm , los cuales pueden o no presentar características plásticas.

SUELO IV: Condiciones de suelo más desfavorable por la presencia predominante de materiales piroclásticos y niveles freáticos superficiales, con previsibles consecuencias de asentamientos del terreno y amplificación sísmica; presentando valores de capacidades portantes inferiores a 1.0 kg/cm^2 .

Estos materiales (limo orgánicos), están caracterizados por partículas de tamaños menores a 0.74 mm , sin presentar propiedades plásticas, por lo que no corresponderían a la fracción de arcillas.

De acuerdo con la tipología de los suelos mencionada presentaremos una microzonificación, tomando en cuenta la potencialidad de riesgo sísmico que pueda inducir el suelo en las edificaciones; la simbología en el mapa (Ap. 1-E) es: zonas de alto riesgo (color rojo), mediano riesgo (color anaranjado), moderado riesgo (color amarillo), bajo riesgo (color verde), (ver AP-1E).

5.1. ZONA DE ALTO RIESGO

Consideramos que una zona crítica es la que corresponde a los suelos paludiales que ocurren en la zona sur de la ciudad, donde los materiales piroclásticos (arenas eólicas), arenas y limos orgánicos y la presencia de un nivel freático que corta la superficie, hacen de esta zona un sector inestable; a mayor profundidad mejora la

calidad del suelo (aumento de materiales granulares gravo- arenosos) y por lo tanto las condiciones para la cimentación

La capacidad portante puede ser menor a 0.7 Kg/cm^2 y un periodo de vibración de 0.52 seg. y tiene tendencia a la amplificación, densificación y probable licuefacción. Este tipo de suelo ocurre en la zonas de Bellapampa, Lara, Chilpinilla en el sector de Socabaya a ambos lados del río Socabaya (AP-1E).

Otra zona considerada de alto riesgo es la del área colindante con los domos de la cordillera de Cortaderas en el cono norte; en este sector se presentan materiales granulares sueltos, correspondientes a coluviales, lo cuales son de baja compacidad y pueden presentar inestabilidad bajo sollicitaciones dinámicas, pudiendo ser causa de desprendimientos y derrumbes de los taludes.

Hacia la zona Sur se tiene en el distrito de Sabandía la presencia de acuíferos en el sector de Yumina, los cuales probablemente tengan un origen (paludial) similar y con las mismas características ya líneas arriba señaladas.

5.2. ZONA DE MEDIANO RIESGO

Esta zonas presentan superficialmente horizontes de tonos claros de tobas y niveles con abundantes fragmentos de pómez, que tienen espesores de 0.30 a 0.40 m con capas aluviales intercaladas, correspondiendo a la parte superior de la unidad Alv. - 3. Además se consideran dentro de esta zona a gravas y arenas que rellenan los fondos de los valles y principales quebradas. La capacidad portante calculada evacua un valor superior a 0.7 Kg/cm^2 y el periodo de vibración del suelo es de 0.47 seg.. Estos materiales son los denominados depósitos piroclásticos (Vargas, 1970), alcanzan solo un espesor de 1. 50 m. con un suelo superficial bien desarrollado, por lo que el efecto negativo de compresibilidad podrían causar solo pequeños efectos de asentamientos diferenciales. En esta zonas solo existen viviendas de 1 a 2 pisos, por lo que el peligro de asentamientos es mediano y en

el caso de construir edificios de varios pisos se recomienda limpiar o mover estos horizontes superficiales. También asociados a estos depósitos se reconoce afloramientos de materiales piroclásticos recientes (ceniceros), Gutiérrez, 1973, que ocurren en el distrito de Alto Selva Alegre (en las urbanizaciones comprendidas entre Independencia y Pampas de Polanco). La zona mas amplia donde se reconoce estos materiales es en el sector comprendido entre alto Cayma y Bolognesi en la margen occidental (derecha) del río Chili. En el sector del cono norte se ha reconocido zonas con “ceniceros en el límite norte de Ciudad de Dios y en la parte baja de Ciudad Municipal y en varias zonas de los alrededores.

También consideramos como zonas de mediano riesgo por la ocurrencia de materiales aluviales recientes que están sueltos y que constituyen materiales sensibles a las ondas sísmicas; además podrían eventualmente ser removidos y transportados hacia las zonas adyacentes por las corrientes en épocas de “crecida” de los ríos. Estas zonas son: las del sector del cercado de la ciudad en las zonas aledañas a ambas márgenes del río Chili desde el sector de confluencia de las quebradas tributarias (Nacaco, Huarangueros, Las canteras) con el río Chili (puente Bajo Grau) hasta la zona de Tingo aproximadamente, siendo crítico el sector de los Pinos por estar asentado casi al nivel del río.

En el sector oriental de la ciudad, las quebradas de Bateones en Alto Selva Alegre y San Lázaro en Miraflores.

Hacia el sector sur, las márgenes de los cauces de los ríos Sabandía, Cachimayo y aguas abajo el río Socabaya.

5.3. ZONA DE MODERADO RIESGO

Consideramos en esta zona la mayor parte del área urbana de la ciudad de Arequipa, donde los materiales aluviales, presentan buenas condiciones como lecho de fundación. En el sector norte. Las cenoglomeraditas (flujos de barro),

gravas, fanglomerados y arenas tufáceas tienen una capacidad portante inferior a 2.0 Kg/cm^2 y un periodo de vibración que puede variar de 0.16 a 0.42 seg. Estos depósitos que conforman los abanicos aluviales volcánicos del aeropuerto y la franja hacia el oeste; además la zona comprendida entre Carmen Alto, parte baja de Yanahuara, Umacollo hasta la planicie de Sachaca. El Cercado de la ciudad hacia el sector sur donde el río Chili confluye con el río Socabaya. También el sector correspondiente a los aluviales volcánicos al pie del Misti detrás de los macizos de rocas andesíticas (Huarangueros) se considera como de moderado riesgo.

5.4. ZONA DE BAJO RIESGO

Se considera dos tipos de rocas: las masivas, duras y altamente cohesivas rocas ígneas intrusivas y las volcánicas que presentan una capacidad portante de más de 10 Kg/cm^2 , bien estables y con un periodo de vibración del suelo de 0.15 seg. y los suelos asociados a los flujos de lodo de la parte oriental de la ciudad y los tufos puzolánicos (sillar) del sector occidental con periodos de vibración de 0.30 seg. Están incluidos los afloramientos rocosos en Hunter, Sachaca y Tiabaya, parte de San Francisco en Characato, constituido por materiales de buenas características y adecuadas para la fundación de las cimentaciones.

Tomando como base lo expuesto así como las propiedades físicas y mecánicas de los suelos, se presenta los valores de capacidades portantes calculados para cada distrito (anexo B), para un F. S. (factor de seguridad) = 3, considerando una profundidad de desplante comprendida entre 1.20 a 2.00 m.

En el plano preparado sobre la expansión urbana de la ciudad de Arequipa en los últimos 40 años (1960 - 2000), (AP-1F), se puede inferir que en este lapso de tiempo el crecimiento ha sido de aproximadamente el 80 % de lo que es la ciudad actualmente; además al no existir un plan maestro la ciudad creció

desordenadamente, sin control y hacia zonas de alta peligrosidad (taludes de los cerros, nacientes de las torrenteras, etc.).

La extensiva migración de las provincias altas de Arequipa (cono norte) y de las zonas andinas (cono sur), reflejan un condicionamiento demográfico que influyó en la expansión urbana de Arequipa.

CONCLUSIONES

1. El establecimiento de una estratigrafía de los depósitos aluviales en la zona del cono norte de Arequipa, permitirá profundizar su estudio así como tratar de llevar a cabo dataciones radiométricas de las paleosuperficies para precisar la cronología. Esta estratigrafía es necesaria precisarla y sobre todo señalar las correlaciones con las otras unidades diferenciadas en los diferentes sectores de Arequipa.

2. Los depósitos Pleistocénicos corresponden a abanicos aluviales con predominancia de rocas volcánicas (andesíticas, basaltos etc.) en un contexto de clima semi-árido; las facies más comunes son la cenoglomeraditas (flujos de barro) donde los fluidos eran más viscosos, las facies de canales de fanglomerados (agentes de transporte de alta fluidez) son poco numerosas y erosionan a las anteriores, también se puede inferir medios sedimentarios de tipo cono de escombros y hasta zonas de glacis, invadidos temporalmente por los cursos de agua estacionales "oueds".

3. Las unidades geotécnicas diferenciadas (13) están asociadas a los tipos de suelos estudiados en el área urbana de Arequipa. En general se puede decir que la mayoría de suelos están constituidas por materiales heterogéneos, con horizontes erráticos, los perfiles están poco desarrollados debido al clima semi-árido que predomina en la región, el cual no es propicio para la formación de suelos. Los análisis efectuados han permitido caracterizarlas y compararlas (Tabla Nº 3), además del calculo de capacidades portantes de los suelos para los distintos distritos (anexo B), son herramientas útiles para las futuras edificaciones en los diferentes sectores. Los valores de capacidad portante de los suelos, indican valores básicamente referenciales, puesto que las condiciones erráticas del suelo no permiten la generalización ni la extrapolación de los valores obtenidos.

4. El plano de microzonificación (AP-1E) presentado tiene como objetivo señalar como se comportarían los diferentes materiales aluviales (suelos) estudiados ante

una situación de sismo fuerte en la región; además considera la calidad como lecho de fundación teniendo en cuenta el valor de capacidad portante de la unidad o unidades. Este plano debe compararse con los planos de riesgo volcánico, de inundaciones de torrenteras para elaborar un mapa general de riesgos indicando cuales son las medidas mas urgentes a tomar para prevenir a la población de eventuales fenómenos naturales.

5- La evaluación sobre el crecimiento de la ciudad de Arequipa en los últimos 40 años (AP-1F), muestra que la expansión urbana ha sido desordenada, no se ha tomado en cuenta ningún criterio técnico y hay zonas de alto peligro sobretodo, donde se ha invadido las zonas de taludes de los cerros, donde el material coluvional y la ocurrencia de talwegs de fuerte pendiente pueden originar graves perdidas. Consideramos que el crecimiento de la ciudad debe enfocarse hacia el sector occidental de la ciudad, en el lecho de los tufos puzolánicos, donde se tendrán que hacer importantes movimientos de tierras, para uniformizar el terreno debido a las numerosas quebradas que ocurren (Ej. zona de PROFAN); Además sugerimos que la zona de la campiña Arequipeña hacia el sector sur -este de la ciudad trate de preservarse, como un pulmón de la ciudad y como zona de esparcimiento para los ciudadanos, asimismo tratar de potencializar en estos sectores el desarrollo turístico.

6. Se ha determinado el valor de la capacidad de carga admisible para los diferentes sectores, tomando como referencia los muestreos realizados, considerando para el caso de cimentación superficial, comprendidas entre profundidades de 1.20 m. a 2.00 m. Los suelos analizados presentan bajas concentraciones de sales solubles caracterizados por carbonatos, sulfatos y cloruros; por lo que no existe restricción alguna para el usos de cementos en el diseño de mezclas en la cimentaciones. Conforme a los requerimientos de diseño sismo resistente, el suelo predominante, está caracterizado por suelos de tipo S2, con un factor de suelo de 1.2 y un periodo de vibración de 0.60 seg.

7. La existencia de quebradas de escorrentía, permite la evacuación y drenaje de aguas pluviales en los meses de verano (enero y febrero), sin embargo en la mayoría de los sectores perimetrales del cono norte, el sector hacia Cayma, en la zona de Mariano Melgar y parte alta de Paucarpata, los cauces se encuentran parcial o casi totalmente ocupados y/o habitados, consecuentemente estas zonas representan un alto riesgo.

RECOMENDACIONES

1. Continuar y profundizar los estudios de microzonificación sísmica así como los referentes a la estratigrafía y geomorfología del cuaternario y precisar la relación de las paleosuperficies con las crisis climáticas del Pleistoceno así como con los episodios volcánicos en la cordillera.
2. Estudiar en detalle el comportamiento geotécnico de las capas de tobas (fragmentos de pómez) que ocurren en o muy cerca a las paleosuperficies que separan las diferentes unidades aluviales del cuaternario.
3. Llevar a cabo trabajos específicos en sectores críticos señalados en los planos, por ejemplo encauzar y canalizar los “talwegs” en las zonas del piedemonte, limpiar y profundizar algunos tramos de las torrenteras, así como reforzar las zonas de los badenes, también enmallar y construir estructuras de seguridad al pie de los taludes (detener los bloques que se puedan desprender); asimismo arborizar las zonas de los taludes, y los márgenes de las torrenteras, sobretodo en las zonas donde confluyen hacia el río Chili.
4. La microzonificación sísmica debe ser tomada en cuenta, para establecer una normalización geotécnica de los parámetros de diseño, señalados en diferentes estudios para así tener un planeamiento urbano más racional.
5. Es importante que defensa civil insista en los simulacros y planifique la organización de la población y su educación con la finalidad de preparar al poblador, para la eventualidad de la ocurrencia de desastres naturales, ya que el área es una zona altamente sísmica.
6. Crear un área de protección ecológica a lo largo del valle del río Chili, con la finalidad de preservar su calidad de agua y embellecer las márgenes lo que daría un aspecto mucho mas bello a la ciudad.

BIBLIOGRAFÍA

BEAUDET G., HERM D., LAHARIE R., PASKOFF R. (1976), Sur l 'existence du Pliocene marin le long de la cote du Perou. C. R. somm. soc. Geol. France, 1, p. 12-13.

CARDENAS S. (1960), Rocas Neo-volcánicas de los alrededores de Arequipa. Tesis Bg (025), Facultad de ciencias, inst. Geología UNSA.

CARDENAS J. (1973), Análisis crítico desde el punto de vista geológico con fines de cimentación en los pueblos jóvenes de Arequipa. Tesis IG (153). Geología. UNSA.

CISMID (1991), SEMINARIO INTERNACIONAL DE MICROZONIFICACIÓN Y SU APLICACIÓN AL PLANEAMIENTO URBANO PARA MITIGACIÓN DE DESASTRES.

DOLFUSS O. (1970), Esquisse morphologique de la region d' Arequipa. Travaux I.F.E.A., rev. 40, t. V - IX, p. 109 –117.

DOLFUSS O. (1973), La cordillere des Andes, presentation des problemes geomorphologiques. Rev. Geogr. Phys. Geol. Dyn., (2), vol. XV, fasc. 1-2, p. 157 - 176, Paris.

FENNER C.N. (1940), Geología de los alrededores de Arequipa. Rev. universitaria, Arequipa, pp.170 –206.

GONZALEZ G. (1984), Geotecnia de los terrenos del asentamiento humano "Ciudad de Dios". Tesis IG (589), Geología, UNSA.

GUEVARRA R. C. (1969), Geología del cuadrángulo de Characato. Servicio Geológico y Minero, Bol. N°. 23.

GUIZADO J. (1968), Geología del cuadrángulo de Aplao. Servicio Geológico y Minero, Bol. N°. 20.

GUTIERREZ M. (1973), Estudio Geológico de suelos de la ciudad de Arequipa. Tesis BG (191), Geología, UNSA.

HUAMÁN D. (1985), Evolution tectonique cenozoique et neotectonique du piemont pacifique dan la region d'Arequipa (Andes du sud Perou). These 3e cycle, specialite: Geologie structurale, No.3826, Univ. Paris sud, centre D'Orsay.

HUAMAN D., CHOROWICS J., DEFFONTAINES B., GUILLANDE R. & RUDANT J.P. (1993) Cadre structural et risques geologiques etudies a l'aide de l'imaginaire spatiale, la región du Colca (Andes du sud Perou). Bol. Soc. Geol. France, 1993, t. 164, No. 6, pp.807 –818.

JENKS W. (1948), Geología de la hoja de Arequipa al 200,000. Instituto Geológico del Perú, Bol. N°. 9.

LAHARIE R. (1970), Cronología del cuaternario Peruano. I Congreso Latinoamericano Geológico t. VI, p.145 – 157.

LAHARIE R. (1973), Tectogénesis y orogénesis de los andes del sur del Perú. Segundo ciclo de conferencias de Geomorfología, Arequipa p. 1 – 29.

LAHARIE R. (1973), Geomorfología y vulcanismo en los Andes del sur del Perú. Tercer ciclo de conferencias de geomorfología, Arequipa. p.30 – 44.

LAHARIE R., DERRUAU M. (1974), La morphogénese des Andes du sud du Perou. Rev. Geog. Alpine, 1. LXII, fasc.. 4, p. 479 –505.

LAHARIE R. (1975), Tectogénesis, orogénesis y vulcanismo en los Andes del sur del Perú. Bull. Inst. Fr. Et. And., 1975, IV, No. 3 - 4, pp. 173 – 198.

LAHARIE R. (1976), Recherches geomorphologiques sur le neogene du sud du Pérou. Bull. Inst. Fr. Et. And., 1976, V, No. 1-2, pp. 9 -37.

MACEDO, L., (1994), Peligro Volcánico Potencial del Misti. Convenio DHA-UNDRO/UNSA. Tesis de grado UNSA.

MEDINA E. (1991), Zonificación geotécnica preliminar de Arequipa. Tesis Bach., Facultad Ingeniería Civil (183), UNSA.

MENDIVIL S., (1965a), Geología de los Cuadrángulos de Maure y Antajave. Comisión Carta Geológica Nacional, Boletín N° 10, 99 p.

MENDIVIL S. (1965b), Geología del volcán Misti. Com. Carta geológica nacional (inédito)

MENDIVIL S. (1970), Estratigrafía terciaria de la faja costanera del sur del Perú. I congreso Latinoamericano Geológico inédito.

MENDIVIL S. (1972), Elementos geográficos morfo - estructurales del sur del Perú Inédito.

PALZA H. (1974), Estudio geotécnico de la carretera Arequipa – Yura. Tesis BG (261), Geología, UNSA.

PAREDES A. (1970), Geología de las andesitas sur - occidentales del volcán Misti. Tesis IG (184), Geología, UNSA.

ROJAS R. (1978), Estudio geodinámico y geotécnico de la torrentera Santo Domingo (dist. Mariano Melgar, Prov. y Dpto. Arequipa). Tesis IG (284), Ing. Geológica, Programa Tecn. Físicas, UNSA.

RONDON R. (1964), Plano geológico preliminar de Arequipa y sus alrededores. Tesis BG (69), Fac. Ciencias, escuela instituto de geología. UNSA.

TICONA J., (1994), Microzonificación para la Prevención y Mitigación de Desastres Naturales de la Ciudad de Arequipa. Tesis IGF (043) Programa Geofísica, UNSA.

VARGAS L. (1970), Geología del cuadrángulo de Arequipa. Servicio Geológico Minero, Bol. N°. 24, 64 p. .

YANQUI C. (1990a), Zonificación geotécnica de Arequipa. Ponencia VIII, C.O.N.I.C., Piura.

YANQUI C. (1990b), Geología preliminar de la ciudad de Arequipa. Inf. Privado CISMID, Arequipa.

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 Plano de Arequipa con el programa de calicatas (escala 1:115,000).

Fig. 2 Mapa geomorfológico regional de la zona de Arequipa.

Fig. 3 Corte interpretativo de la geomorfología de la región Arequipa.

Fig. 4 Columna estratigráfica del Cenozoico en el piedemonte del sur del Perú.

Fig. 5 Diagrama mostrando la relación existente entre la paleosuperficie más alta de calderas, el pedimento de laderas y el pedimento y terraza de Vitor.

Fig. 6 Interpretación estructural de la región de Arequipa (sur del Perú).

Fig. 7 Cuadro cronológico de las fases tectónicas de la vertiente pacífica del sur del Perú.

Fig. 8 Columna estratigráfica, zona cono norte de Arequipa.

Fig. 9 Columna estratigráfica sintética de las unidades pliocuaternarias de la zona de Arequipa.

Fig. 10 Cuadro de correlaciones de las unidades pliocuaternarias reconocidas en el área de Arequipa.

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 1 Últimos eventos volcánicos en los alrededores de Arequipa (William F. Jenks, 1948).

- | | |
|------------|--|
| 1ra Etapa: | Erupción por múltiples cráteres en las áreas del Chachani y del Pichu Pichu; primera etapa andesítica |
| 2da Etapa: | Actividad explosiva muy extendida, depósito de potentes tufos, estratificados y compactos; etapa dacítica |
| 3ra Etapa: | Erupción de derrames basálticos del flanco SO del Chachani; etapa Basáltica. |
| 4ta Etapa: | Desarrollo de grandes domos de lava en el flanco SO del Chachani, formación del cono del Misti; segunda etapa andesítica |

Tabla N° 2 Etapas eruptivas de la zona de Arequipa (Cárdenas, 1960).

1ra Etapa: Emisión de flujos andesíticos en el Chachani y Pichu Pichu; primera etapa andesítica.

2da Etapa: Actividad explosiva de tufos y lavas ácidas; primera etapa riolítica.

Fase 1 - Tufo Basal

Fase 2 - Riolitas de Charcani

Fase 3 - Traquitas de Charcani

Fase 4 - Tufo rosado

Fase 5 - Tufo blanco

Fase 6 - tufo Salmón

3ra Etapa: Erupciones andesíticas en el Misti, segunda etapa andesítica

4ta Etapa: Coladas de basalto en el chachani (NE – SW); etapa basáltica

CUATRO PRIMERAS ETAPAS: ERUPTIVAS PRE-GLACIALES

5ta Etapa: Explosiva, paroxísmica de tufo riolítico en el Pichu Pichu; segunda etapa riolítica.

6ta Etapa: Flujos andesíticos del Chachani y Misti.

7ma Etapa: Flujos andesíticos y piroclásticos del Misti; cuarta etapa andesítica

TRES ULTIMAS ETAPAS: ERUPTIVAS GLACIALES Y POST-GLACIALES

APÉNDICES

1. LISTA DE PLANOS

- | | |
|--|----------|
| A. Localización de calicatas excavadas | (AP-1A). |
| B. Geomorfológico | (AP-1B). |
| C. Geológico | (AP-1C). |
| D. Geotécnico | (AP-1D). |
| E. Microzonificación | (AP-1E). |
| F. Expansión urbana | (AP-1F). |

2. LISTA DE FOTOGRAFÍAS

ANEXOS

A. LISTA Y PERFILES DE LAS CALICATAS EXCAVADAS.

La relación de los lugares donde se han excavado las calicatas es como sigue:

1. Quebrada paralela a la quebrada de la cruz de Faucett (cono norte).
2. Limite sur de la proyectada urbanización PROFAN (cono norte).
3. Quebrada limite noroeste de PROFAN (cono norte).
4. Quebrada limite oeste de PROFAN (cono norte).
5. Urb. Los Milagros (limite septentrional del cono norte).
6. Zona de APIPA (cono Norte).
7. Urb. Señor de los Milagros.
8. Urb. Sor Ana de los Ángeles Monteagudo.
9. Villa Paraíso.
10. Carmen Alto.
11. Km 5 de la Vía de Evitamiento.
12. Arancota – Alata.
13. Pasando el puente Congata (sur de Tiabaya).

14. Bellapampa (al lado del restaurante Beto's).
15. Inmediatamente al sur del terminal terrestre.
16. Al costado de la avenida Dolores.
17. En el sector San Francisco (Characato).
18. Al sur de Socabaya.
19. Limite entre la Urb. Lara y el Golf Club.
20. Al costado de la avenida Lambrabani.

B. CAPACIDADES PORTANTES DE LOS SUELOS EN LOS DISTRITOS.**YURA**

SECTOR	Valor de Capacidad portante del suelo
Ciudad de Dios	2.00 a 2.50 kg/cm ²
PROFAN	1.00 a 1.50 kg/cm ²
río Seco	2.00 a 2.50 kg/cm ²

CERRO COLORADO

SECTOR	Valor de Capacidad portante del suelo
Sector Este Aeropuerto - Zamácola	1.50 a 2.00 kg/cm ²
Cerro colorado	2.00 a 2.50 kg/cm ²
Pachacutec	2.00 a 2.50 kg/cm ²

CAYMA

SECTOR	Valor de Capacidad portante del suelo
Alto Cayma	1.00 a 1.50 kg/cm ²
Acequia Alta	2.00 a 2.50 kg/cm ²
Cayma	2.00 a 2.50 kg/cm ²

YANAHUARA

SECTOR	Valor de Capacidad portante del suelo
Carmen Alto	2.00 a 2.50 kg/cm ²
Yanahuara - Umacollo	2.00 a 2.50 kg/cm ²
Pampa de Camarones	1.50 a 2.00 kg/cm ² N:F: 1.20 m,

SACHACA

SECTOR	Valor de Capacidad portante del suelo
Huaranguillo	1.50 a 2.00 kg/cm ² N.F. 1.20 m.
Sachaca - Alto de Amados	> 3.00 kg/cm ²
Terrenos de Cultivo - El palacio	1.00 a 1.50 kg/cm ²

TIABAYA

SECTOR	Valor de Capacidad portante del suelo
Arancota	1.50 a 2.00 kg/cm ² N.F. 1.20 m.
Congata	> 2.50 kg/cm ²
Tiabaya	2.00 a 2.50 kg/cm ² N.F. 2.50 m.

ALTO SELVA ALEGRE

SECTOR	Valor de Capacidad portante del suelo
Independencia - Pampas de Polanco	1.50 a 2.00 kg/cm ² .
Alto selva alegre - Gráficos	2.00 a 2.5 kg/cm ²
Apurimac - Cristo obrero	2.00 a 2.50 kg/cm ²

MIRAFLORES

SECTOR	Valor de Capacidad portante del suelo
El Porvenir - Edificadores Misti	2.00 a 2.50 kg/cm ² .
Las Palmeras - Alto Misti	2.00 a 2.50 kg/cm ²
Miraflores	2.00 a 2.50 kg/cm ²

MARIANO MELGAR

SECTOR	Valor de Capacidad portante del suelo
Atalaya - Sto. Domingo - Alto San Martín	2.00 a 2.50 kg/cm ² .
Santa Rosa	> 3.00 kg/cm ²
Mariano Melgar	2.00 a 2.50 kg/cm ²

PAUCARPATA

SECTOR	Valor de Capacidad portante del suelo
Apima - Miguel Grau	2.00 a 2.50 kg/cm ² .
Alto Jesús Ciudad Blanca	2.00 a 2.50 kg/cm ²
Paucarpata - Guardia Civil	2.00 a 2.50 kg/cm ²

JOSÉ LUIS BUSTAMANTE Y RIVERO

SECTOR	Valor de Capacidad portante del suelo
Lambramani Dolores	2.00 a 2.50 kg/cm ² .
Monterrey - Tasahuayo	2.00 a 2.50 kg/cm ²
Simón Bolívar	> 3.00 kg/cm ²

HUNTER

SECTOR	Valor de Capacidad portante del suelo
Parque Industrial - Hunter	2.00 a 2.50 kg/cm ² .
Pampas del Cusco	> 3.00 kg/cm ²
Paisajista	1.50 a 2.00 kg/cm ² N.F. 2.00 m

SOCABAYA

SECTOR	Valor de Capacidad portante del suelo
San Martín de Socabaya	2.00 a 2.50 kg/cm ² .
Lara - Bellapampa	0.70 a 1.00 kg/cm ² N.F. 0.80 a 1.20 m.
Socabaya	2.00 a 2.50 kg/cm ²

CERCADO

SECTOR	Valor de Capacidad portante del suelo
Rivero - Av. Progreso	2.00 a 2.50 kg/cm ² .
La Merced - Pizarro	2.00 a 1.50 kg/cm ²
Vallecito	2.00 a 2.50 kg/cm ²

SABANDIA

SECTOR	Valor de Capacidad portante del suelo
Coripata - Buena Vista	2.00 a 2.50 kg/cm ² .
El Molino	2.00 kg/cm ²
Sabandía	2.00 a 2.50 kg/cm ²

CHARACATO

SECTOR	Valor de Capacidad portante del suelo
Cerrillo	2.00 a 2.50 Kg/ cm ²
Characato - San Cosme	2.00 a 2.50 kg/cm ²
San Francisco	2.00 a 2.50 kg/cm ²

C. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LABORATORIO.