

05.78.30



COMISION INTERAMERICANA DE ENERGIA NUCLEAR Y
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA DE LA REPUBLICA ARGENTINA



**CURSO LATINOAMERICANO DE CAPACITACION
PARA LA PROSPECCION Y EXPLORACION
DE YACIMIENTOS URANIFEROS**

C. N. E. A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
NO	AÑO
1	1978

CNEA-AC-16/78

III. METODOS DE PROSPECCION URANIFERA

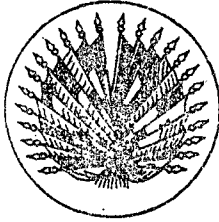
4. FOTOINTERPRETACION GEOLOGICA

"Principios de Percepción Remota
Los Sistemas Slar y Landsat"

JOSE ANTONIO SANGUINETTI

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

MENDOZA
OCTUBRE 1978



COMISION INTERAMERICANA DE ENERGIA NUCLEAR Y
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA DE LA REPUBLICA ARGENTINA



CURSO LATINOAMERICANO DE CAPACITACION PARA LA PROSPECCION Y EXPLORACION DE YACIMIENTOS URANIFEROS

Conferencia III.4.

" PRINCIPIOS DE PERCEPCION REMOTA LOS SISTEMAS SLAR Y LANDSAT"

Por: José A. SANGUINETTI

1.- INTRODUCCION

La necesidad de incrementar el conocimiento de recursos naturales renovables y no renovables, impulsó en las últimas décadas el desarrollo de técnicas de captación y registro a distancia de las propiedades de los elementos de la superficie y atmósfera terrestre.

En principio fueron los requerimientos bélicos los que aportaron los logros más importantes en la materia.

Al uso sistemático y universal de las fotografías aéreas de baja altitud siguieron el desarrollo de técnicas de "percepción remota" algunas de las cuales ya son de uso generalizado, mientras que otras están en su etapa de experimentación.

El término "sensores remotos" engloba distintos sistemas de captación y registro y dentro de los mismos figuran las cámaras aéreas convencionales, las cámaras multiespectrales, los detectores infrarrojos, los barredores ópticos mecánicos, los equipos de microondas, magnetómetros, gravímetros, etc. La mayoría de ellos detectan rangos de radiación electromagnética que pueden relacionarse con propiedades de elementos ó fenómenos naturales. Otros funcionan con el empleo de campos de fuerza (magnética y gravitacional) y también vibraciones acústicas y mecánicas.

Para el estudio de recursos naturales a escalas regionales es casi exclusivo el uso de sistemas de percepción remota que funcionan con ondas electromagnéticas. La información detectada corresponden a las características de suelos, agua, vegetación, rocas, atmósfera, etc.

Específicamente en el conocimiento geológico nos permiten obtener información básica ó datos que complementen ó confirmen la información preexistente.

Los métodos de percepción remota que permiten discriminar elementos naturales de la superficie ó atmósfera terrestre se basan en la diferente capacidad de éstos de reflejar, absorber ó emitir energía electromagnética.

En éste breve panorama de las posibilidades que brindan las técnicas / de percepción remota se enfatizará sobre los sistemas de uso más frecuente en las actividades geológicas y de la prospección minera.

Es importante tener en consideración los alcances y limitaciones de la información que brinda cada sistema particularmente en el caso del conocimiento geológico y en las diversas etapas de la exploración minera, como asimismo de la integración de los diversos datos de percepción remota y de la inclusión de éstos en un plan integral de exploración. También es oportuno señalar que las fotografías aéreas convencionales continúan siendo el material insustituible ya sea en los aspectos cualitativos como métricos, como así también que los sistemas de sensores remotos más usados además de los alcances cualitativos producen material planimétrico a escalas regionales que han revolucionado las posibilidades de conocimiento en cualquier región del mundo.

Queda por último mencionar que la información digitalizada de algunos sistemas de percepción remota admite diversos procesamientos por computadoras que amplían tremendamente el volumen de la información cualitativa, eliminando la subjetividad y las limitaciones de nuestros sentidos en lo que, por ejemplo, a la interpretación geológica de una imagen se refiere.

2.- EL CAMPO ELECTROMAGNETICO

La radiación electromagnética se la puede definir como "energía en forma de ondas producidas por oscilaciones de átomos y moléculas alrededor de su posición media". La energía electromagnética se desplaza en el espacio a la velocidad de la luz y en forma armónica, y éste concepto ha sido explicado basándose en la teoría corpuscular de Newton y en la teoría ondulatoria de Huygens. A la onda electromagnética se la representa por dos sectores perpendiculares (campo eléctrico E y campo magnético H). La dirección de propagación es perpendicular al plano de los dos sectores (Fig.2.). Las partículas de energía no se mueven como un punto de onda o sea lo que se traslada es la excitación del campo. Una onda electromagnética queda definida por la intensidad, frecuencia (longitud de onda) y polarización.

Las partículas de energía se denominan "quantas" y cuando las mismas oscilan en magnitudes de ondas del espectro visible (entre 0.4 y 0.7 micrones) se denominan "fotones".

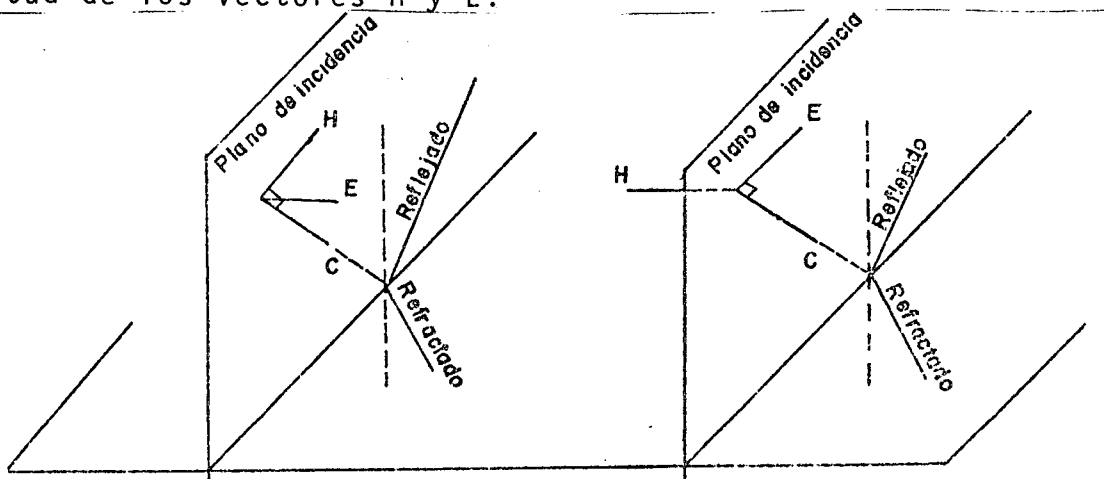
A la variación periódica de E ó H se lo denomina frecuencia y la longitud de onda (L_o) es la longitud que se des^{pl}a za la onda en el espacio durante un período de ésta variación; según la siguiente constante:

Longitud de onda X frecuencia = c (velocidad de la luz) que es igual a 300.000 Kms por segundo. La frecuencia (f) se mide en Hertz (Hz) ó sea en ciclos por segundo (cps).

La longitud de onda (L_o) se mide en unidades lineales (A, mc, mm, cm, m, Km.).

La energía transmitida por la onda es proporcional al E^2 ó H^2 .

Una onda tiene polarización horizontal cuando el vector E es perpendicular al plano formado por el rayo incidente y la vertical a la superficie de incidencia y polarización vertical cuando el vector E pertenece a ese plano mientras que H es perpendicular al mismo. La intensidad se la representa por la magnitud de los vectores H y E.



- Polarización Horizontal - Polarización Vertical

La siguiente nomenclatura y unidades corresponden a las más usadas en relación a la emisión y recepción de energía, y las encontrarán en textos sobre sensores remotos.

energía radiante Ψ : cantidad de energía emitida por una fuente luminosa. Unidad: ergio, joule, KW/h.

densidad de energía radiante W : cantidad de energía irradiada por la fuente en unidad de volumen: Unidad: joule/m³, ergio/cm.

flujo radiante ϕ : cantidad de energía irradiada por unidad de tiempo.

$$\phi = \frac{\Psi}{T} : \text{ergio/seg. ó joule/seg.}$$

flujo incidente: (Ψ_i) ; flujo absorbido (Ψ_a), flujo transmitido (Ψ_t) y flujo reflejado (Ψ_r) corresponden a la cantidad de energía incidente, absorbida transmitida y reflejada, por unidad de tiempo, respectivamente.

Irradiancia: $E = \frac{\phi}{A}$: cantidad de energía que llega por unidad de tiempo y superficie.

emisividad: ϵ : (epsilon) es la relación entre la energía que emite un cuerpo a una frecuencia dada y la energía que emitiría a la misma frecuencia un cuerpo negro que tuviera la misma temperatura que el cuerpo considerado.

$\epsilon = \frac{\text{energía emitida por un cuerpo por unidad de superficie}}{\text{energía emitida por el cuerpo negro por unidad de superficie}}$

Todo cuerpo emite radiaciones en función de su temperatura y transforma en calor la energía que absorbe. Se denomina cuerpo negro a un cuerpo que absorbe toda la energía que recibe, en cualquier frecuencia, y la vuelve a emitir íntegramente en todas las frecuencias pero éstas con distintas intensidades.

En cuanto a las fuentes de energía electromagnética utilizada por los sensores para la evaluación de recursos corresponde la más importante al sol y la segunda a fuentes artificiales, como las ondas de radio y muy alta frecuencia usadas en los distintos sistemas de radar.

2-1- El espectro electromagnético:

El espectro electromagnético es el ordenamiento de las radiaciones en función de la longitud de onda ó frecuencia.

En la Fig.1. se muestra un gráfico del espectro electromagnético "reconstruido" en base al registro conocido de distintas longitudes de ondas. La figura muestra un espectro idealizado ya que no está logrado el registro continuo de todas las frecuencias ó longitudes de onda que lo componen.

En una de las columnas vemos la transmisión atmosférica (zonas de no absorción) para las distintas longitudes de onda y a la derecha algunos de los sensores utilizados en relación a las mismas. En el rango de los rayos "gamma" faltarían los detectores de centelleo utilizados en la prospección radiométrica aérea.

3.- INTERACCION DE LA ENERGIA RADIANTE CON LA ATMOSFERA Y LA SUPERFICIE TERRESTRE:

3-1- Interacción con la Atmósfera:

En la Fig.1. observamos una curva de "transmisión atmosférica" a lo largo de todo el espectro. La misma indica la capacidad de la atmósfera de transmitir ó no la energía radiante que, al atravesarla, sufre perturbaciones en su propagación.

El comportamiento de la energía radiante con la atmósfera está regido por los fenómenos de absorción, dispersión, emisión, refracción.

Al rango del espectro que logra atravesar la atmósfera con un gran porcentaje de su energía no absorbida se lo denomina "ventana atmosférica".

De la rápida observación de la figura 1 deducimos que la ventana más importante corresponde al rango de 0.380 a 0.700 mc. (micrones) ó sea lo que denominamos "luz" cuya definición más acertada es: "energía radiante visible al ojo humano". Otras ventanas corresponden a rangos del infrarrojo (cercano a lejano). A nivel de microondas y ondas de radio la atmósfera no influye en la transmisibilidad mientras que por debajo del espectro visible existe una ventana en el ultravioleta y hacia frecuencias más altas la transmisión atmosférica es prácticamente nula.

- absorción atmosférica: influyen en este fenómeno los siguientes gases: O₂ (oxígeno), O₃ (ozono), H₂O (agua), CO₂ (dióxido de carbono) O (oxígeno atómico), CO (monóxido de carbono) N₂ (nitrógeno), NO (óxido nitroso) y otros.

Para longitudes de onda inferiores a 0.3 mc. (ultravioleta) la atmósfera es casi totalmente opaca debida a la absorción producida principalmente por el oxígeno y el nitrógeno. Dentro del espectro visible el ozono y el oxígeno produce absorción en las bandas correspondientes al naranja (0.6 mc) y rojo (0.69 y 0.76 mc.). Para el infrarrojo la absorción está regida por el vapor de agua y el dióxido de carbono (CO₂) quedando como ventanas para el infrarrojo las siguientes longitudes de onda: 1,5-1,8 mc; 2,0-2,4 mc; 2,9-4,2 mc; 4,5-5,5 mc y 8,0-14 mc.

Existen tablas donde se detallan los rangos del espectro que pueden ser utilizados por los distintos sistemas de percepción remota de acuerdo a la capacidad para las distintas longitudes de onda de atravesar la atmósfera.

- dispersión atmosférica: se conocen dos tipos de dispersión atmosféricas: 1) cuando las partículas que producen la dispersión son menores que la longitud de onda incidente se denomina dispersión Rayleigh. Ocurre entre los 5.000 y 10.000 ms. de altura. La intensidad de la dispersión es proporcional a la cuarta potencia de la frecuencia ó sea dispersa más intensamente las frecuencias altas. Esta dispersión es la que produce

el color azul del cielo.2) cuando las partículas tienen un tamaño ligeramente mayor a la longitud de onda que reciben se produce la dispersión Mie, que favorece la emisión de colores rojos y anaranjados (salida del sol sobre el horizonte). Esta dispersión es provocada por partículas en suspensión ("aerosoles atmosféricos") formados por pequeñas gotas de agua, polvo, humo industrial, etc.

Por último si el diámetro de las partículas es netamente superior a la longitud de onda se produce una dispersión no selectiva ó sea que la dispersión es independiente de la longitud de onda.

Por debajo de longitudes de onda de 15 mc. el vapor de agua es el único elemento que produce esta dispersión y ella es la causa del color blanco de las nubes.

- emisión atmosférica: está regida por la ley de Kirchhoff que establece que un gas que absorbe radiaciones de determinada longitud de onda emite radiaciones en la misma longitud. En la práctica éste efecto reduce el contraste de radiación de los objetos y en los sensores fotográficos y barredores multi espectrales puede ser corregido con la utilización de filtros.
- refracción atmosférica: al atravesar la atmosfera y tener ésta un índice de refracción variable con la altura, el rayo incidente no se traslada en línea recta. Siendo los índices de refracción de la alta atmosfera y baja atmosfera de signo contrario el efecto final de este fenómeno no es considerable.

3-2- Interacción con el agua:

El agua presenta una máxima absorción en el infrarrojo y mínima en el azul violeta. La utilización en sensores remotos de bandas comprendidas entre ambos rangos permite una nítida separación de las aguas turbias y límpidas. Hacia longitudes de onda más grandes que el infrarrojo la absorción disminuye progresivamente.

3-3- Interacción de la energía electromagnética con el terreno:

La reflexión es el fenómeno más importante desde el punto de vista de la percepción remota: en la figura 3 se grafican los tres tipos de reflexión que se producen cuando la onda electromagnética incide sobre la superficie y que dependen si la rugosidad del material es menor ó mayor que la longitud de onda incidente.

En el primer caso, cuando la rugosidad es menor que la longitud de onda, se produce la reflexión especular donde el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

En el segundo caso se produce una reflexión difusa y los rayos reflejados tienen diversas direcciones. La heterogeneidad de casi toda superficie natural provoca los dos tipos

de reflexión: especular y difusa. En algunos sensores (microondas) se utiliza la energía reflejada en la misma dirección de incidencia.

En general, como veremos más adelante, para longitudes de onda usadas en la percepción remota y en sensores que trabajan en rangos del espectro visible al infrarrojo, la reflexión captada es función no solo del grado de aspereza del terreno sino de su composición mineralógica, litológica, humedad, vegetación (en sus formas primitivas ó superiores) topografía, buzamientos, alteraciones, posición del sol, latitud y estación del año, etc.

A los factores mencionados se le suman los fenómenos producidos durante el paso de la energía electromagnética en la atmósfera por lo que en la interpretación de cualquier dato ó imagen de percepción remota deberán tenerse en cuenta todos los factores que inciden en la percepción de la energía reflejada y que pueden enmascarar la información buscada.

A los fenómenos que entorpecen la información buscada producidos en la atmósfera ó superficie reflejante se le suman los propios del sistema de percepción (circuito electrónico ó proceso químico del revelado fotográfico) en general conocidos y controlables.

4.- EL PRINCIPIO DE LA PERCEPCION REMOTA:

Todo sistema de percepción remota implica una fuente de energía (radiación electromagnética) un medio de propagación y la detección de la energía reflejada. (fig.4 y 5).

En los sensores fotográficos (cámaras aéreas y multiespectrales), la energía reflejada impresiona la emulsión fotosensible y tras un proceso químico se obtiene una imagen (foto) donde la información lograda a sido función de la intensidad de la energía recibida (tono) y de la banda espectral a la cual pertenece (color).

En los sensores no fotográficos se registra la información en forma digital y se pasa luego a la obtención de una imagen. En este caso y en los denominados sensores activos la información además de la intensidad y de la longitud de onda es función de la polarización (vertical ó horizontal) y del tiempo de retorno de las radiaciones.

4-1- Resolución:

En los sensores fotográficos (cámaras aéreas y multiespectrales) se llama poder de resolución a la capacidad de identificar dos objetos distintos. Experimentalmente se valora en la cantidad de líneas perfectamente identificables por milímetro. El poder de resolución en fotografías depende de la parte óptica (lentes - diafragma) y de la emulsión fotográfica (tamaño del grano).

En sensores no fotográficos la resolución es la capacidad de distinguir entre dos señales que están muy próximas en el tiempo (sensores de microondas) ó en la capacidad de distinguir diversas longitudes de onda (barredores multiespectrales, cámaras de TV).

4-2- Clasificación de sensores remotos:

En las páginas anteriores se ha hecho referencias a "sensores de microondas", "barredores multi-espectrales", "sensores activos", etc. Estas denominaciones obedecen a clasificaciones según distintos criterios para agrupar los sistemas de percepción remota existentes.

Puede tomarse como un criterio de clasificación el rango del espectro electromagnético que son capaces de registrar y se hablará de sensores de "frecuencias muy altas" (VHF frecuencia de 30-3000 MHz) ó de "microondas" (SHF frecuencia entre 3 y 30 GHz y longitud de onda entre 1-10 cm.), banda utilizada por el sistema de radar. Con esta clasificación abarcamos hacia frecuencias más altas los "sensores infrarrojos" (Lo entre 1 mm- 0.750 mc.), los del "ultravioleta" (Lo 0.380-0.004 mc.) hasta llegar a los "rayos X" y a los equipos de registro de radiación "gamma" (Lo 0.3 - 2 A).

Otra clasificación de sensores se basa en si la energía registrada es emitida por una fuente contenida en el propio sensor ó fuera de él. Este criterio agrupa bajo la denominación de "sensores activos" a aquellos que emiten la energía que, después de reflejada registran y como "sensores pasivos" los que registran energía emitida por una fuente externa, generalmente el sol.

Por último se agrupan los sistemas de percepción remota en "fotográficos" y "no fotográficos" según como queda registrada la información. Obviamente los primeros corresponden a las cámaras aéreas convencionales y multiespectrales. Los segundos registran la información recibida en forma de gráficos ó en tapes pudiendo reconstruir la imagen en el tubo de rayos catódicos (TRC).

5.- DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS DE PERCEPCION REMOTA MAS USADOS EN EL CONOCIMIENTO GEOLOGICO:

5-1- Alcances en las distintas etapas de un programa de prospección

En la conferencia del Dr. Coco se ha desarrollado el tema de las cámaras aéreas así como las posibilidades que brindan las fotografías aéreas convencionales ó de baja altitud. Es oportuno reiterar que constituyen el principal material que podemos disponer por sus alcances cualitativos y métricos, a tal punto que en los relevamientos geológicos a escalas regionales y semiregionales está ya sistematizando su uso para la fotointerpretación geológica siendo prácticamente de rigor su empleo

en todos los organismos dedicados a la exploración de recursos minerales. Es importante también reiterar que a la fotointerpretación geológica realizada en gabinete debe acompañarse por un exhaustivo y sistematizado control de campo a fines de lograr el conocimiento geológico necesario para los fines perseguidos.

En nuestro país las principales y más extensas zonas de interés minero (incluyendo el uranífero) corresponden a regiones con climas áridos o semiáridos, con escasa cubierta vegetal y con buena exposición de afloramientos. Esta circunstancia facilita enormemente las posibilidades de la fotointerpretación geológica y quizás no sea el caso de algunas regiones tropicales de países sudamericanos.

Desde el punto de vista planimétrico los métodos de restitución aerofotogramétrica han reemplazado totalmente a los métodos convencionales de relevamientos topográficos a escala regional y semiregional y en algunos casos a escala de detalle.

En proyectos de exploración de escala regional y super regional (decenas a centenares de miles de kilómetros cuadrados) se plantea el problema de lograr bases geológicas, a escalas acordes a la superficie cubierta por el proyecto.

En el caso particular de la prospección por uranio se presentan en las distintas etapas requerimientos de planimetría geológica que puede ser suplida solo parcialmente por relevamientos ya existentes. Es común el caso que la información previa no se adecue a las necesidades de la prospección uranífera, por ej, porque el detalle del carteo engloba un nivel estratigráfico potencialmente uranífero dentro de una unidad taxonómica más grande (formación o grupo) o por no estar discriminados los rasgos geológicos comprobadamente relacionados a la movilización o entrapamiento del uranio (estratigráficos, litológicos, tectónicos, estructurales, etc.), planteándose la necesidad de producir nuestros propios mapas o de adecuar los existentes a nuestros fines. Como ejemplo de una etapa podemos considerar la aplicación de técnicas como la aeroradimetría que con la tecnología actual tiene una capacidad operativa que le permite la cobertura de superficies, en un solo programa, del orden de decenas a centenares de miles de kilómetros cuadrados y la producción de información gráfica y digitalizada. Un programa de esta embergadura presupone la existencia de una base geológica adecuada para el vuelco de datos registrados y las necesarias correlaciones con los principales rasgos geológicos.

La base planimétrica debe tener controles que permitan conocer sus deformaciones para lograr el pase de la información, en éste caso aeroradimétrica.

En otro ejemplo que correspondería a un paso previo al mencionado, es necesario bases geológicas a escala de denominador grande que permitan una rápida ubicación y registro de los muestreos y reconocimientos de lo que denominamos "Geología del Uranio I) y que nos permitan prioritar zonas donde aplicar

técnicas como la mencionada.

Con éstas coberturas regionales y una necesidad de información geológica adecuada a nuestro fines y determinada por la "geología del uranio" el uso de fotografías aéreas convencionales resulta muy dificultoso para el logro de cartografía a esta escala. En el aspecto cualitativo cada fotograma abarca una superficie muy pequeña en relación al área cubierta por el programa (190 Kms. cuadrados para un fotograma de formato 23 x 23 cm. a escala de 1:60.000) visualizándose en cada una solo una parte de los principales rasgos geológicos (estructuras, formaciones, bordes de cuenca, etc.) y por otro lado siendo la información geológica que brinda demasiado detallada para la etapa que se está realizando. El logro de bases geológicas a partir de éste material es muy trabajoso por la cantidad de fotografías a manipular. Para ésta etapa y como veremos más adelante las imágenes satelitales Landsat proveen la base más adecuada en programas de niveles super regionales.

Tampoco los alcances planimétricos de las fotografías aéreas son los adecuados para ésta etapa. Las deformaciones propias de las fotografías aéreas por su carácter de proyección central (desplazamiento debido al relieve, inclinación de la cámara, etc.) y las variaciones de escala, muy acentuadas en terrenos montañosos, hacen necesarios los ajustes fotogramétricos ó restitución para el logro de bases planimétricas confiables, tareas que no nos son específicas y que en la práctica no resultan fácilmente viables para superficies del orden de decenas de miles de Km².

Otras de las limitaciones de las fotografías aéreas es la imposibilidad de obtenerlas en algunas regiones de permanente nubosidad y la poca información que brindan en zonas selváticas ó boscosas. Los mosaicos fotográficos usados como cartografía de base en distintos operativos tienen el inconveniente de presentar variaciones de tono que no son consecuencias de diferencias en el terreno sino producidos por distintas intensidades de iluminación y también durante el proceso de revelado y copiado de los fotogramas que lo integran.

En una etapa posterior de la prospección por uranio y donde ya han sido localizados los "distritos uraníferos" que pueden abarcar superficies del orden de algunos miles de Kms. cuadrados ó menos el uso de las fotografías aéreas es ineludible en los aspectos cualitativos y métricos (mapas fotogeológicos-planialtimetría) pudiéndose desglosar algunas etapas en su uso según la superficie a considerar: para superficies del orden de los 500 a 5.000 Kms. cuadrados la escala adecuada puede ser la de 1:50.000 para superficies menores de 500 Km². la escala adecuada quizá resulte la de 1: 20.000.

Aún en la etapa de la evaluación y explotación de yacimientos pueden utilizarse fotografías aéreas de bajo denominador para la restitución fotogramétrica de pequeños sectores ó simplemente conservarlas como material de apoyo y de rápida

consulta ante problemas ingenieriles derivados de la explotación de un yacimiento (caminos de accesos, derivados de la remoción de tierra desvío de arroyos, laboreo, etc.).

Estas consideraciones se han hecho partiendo de la necesidad de producir cartografía geológica ó planialtimetría con las fotografías aéreas. / en organismos como los nuestros cuyo objetivo no es la producción de hojas geológicas oficiales. Indudablemente las fotografías aéreas constituyen como simple material de consulta para cualquier etapa de la exploración minera ó el conocimiento geológico un elemento insustituible para el geólogo en sus actividades rutinarias.

Concluimos que para programas de prospección, incluyéndose operativos de aeroradimetría, reconocimientos de geología del uranio, determinación de áreas favorables y toda actividad que significa el empleo de bases geológicas-planimétricas a escala de denominador grande (200.000 - 100.000) las fotografías aéreas convencionales presentan una serie de inconvenientes en los aspectos cualitativos y métricos que hacen más aconsejable la utilización de la información gráfica producida por algunos sistemas de sensores remotos. El sistema de radar SLAR y el barredor multiespectral del satélite Landsat proveen una información acorde a esos objetivos permitiendo en el caso del sistema Landsat otras posibilidades en el campo específico de la prospección por uranio como es el análisis digital de la información multiespectral registrada por el sistema.

A continuación trataremos sucintamente los dos sistemas:

5-2- Radar (sensor activo - no fotográfico)

La sigla RADAR proviene de las palabras Radio Detection And Ranging siendo desarrollado a partir de la década del 20 por organismos militares.

El principio corresponde al de un sensor activo de microondas. Los sistemas de radar desarrollados por Westinghouse, Goodyear y Motorola (Gruman Ecosystems Corp.) son actualmente de aplicación sistemática en el relevamiento de grandes superficies proveyendo de información cualitativas y métricas usadas en planes de evaluación de recursos incluyendo el conocimiento geológico y minero.

Dos ejemplos en países sudamericanos son suficientemente explícitos de los alcances de éste sistema de percepción a distancia: Proyecto Radam (Radar Amazonas-Brasil) y el Proyecto Bajo Magdalena en la República de Colombia (tramo inferior del río Magdalena) país donde además se han cubierto otras zonas en regiones de selvas ó bosques, que conjuntamente con relevamientos en Venezuela y Panamá totalizan una cobertura superior a los 5.000.000 de Kms².

En nuestro país y por sus características geográficas, aún no se han realizado vuelos de radar, existiendo la idea

de aplicarlo en zonas de permanente nubosidad del extremo sur.

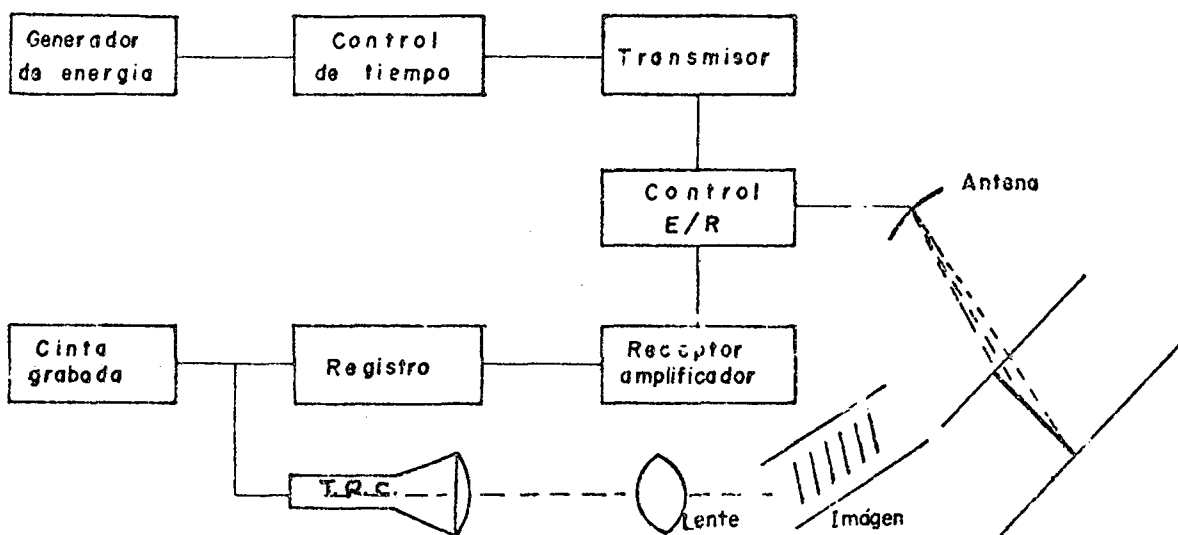
Sus ventajas fundamentales están dadas por la rapidez el relevamiento, porque el registro no es afectado por las condiciones atmosféricas (nubes) y porque recoge información de la superficie del terreno aunque posea una cobertura vegetal densa (selva ó bosque). El vuelo de radar puede hacerse con condiciones atmosféricas adversas y durante la noche, con el empleo de un avión tipo jet. La altura de vuelo es de 6 a 9 Kms y la escala varía según el sistema entre 1: 250.000 a 1: 1.000.000.

La imagen que se logra es de tono discreto (no continuo), el recubrimiento de fajas permite la visión estereoscópica (Fig. 14). El ángulo de incidencia de la onda magnífica los resaltos topográficos, visualizándose todo tipo de lineaciones (Fig.13) y actitudes de los estratos (Fig.14). Es posible la diferenciación de tipos litológicos pero el mayor aporte lo brinda en la identificación de estructuras. El sistema SLAR GEMS produce imágenes / de 45 x 500 mm, a escala de 1: 400.000.

5-2-1- Principio del sistema de radar:

Un transmisor genera impulsos cortos de energía en la frecuencia de microondas (Lo 0.86-3.12 cm) a través de una antena direccional. Parte de ésta energía se refleja desde la superficie del terreno hasta la antena. Llegan primero las ondas reflejadas por los objetos cercanos y posteriormente las reflejadas por objetos cada vez más lejanos.

Estas señales pasan a traves de un circuito electrónico donde se van reconstruyendo los "trazos" de las líneas de barrido lográndose una imagen continua que es registrada fotográficamente.



ESQUEMA DEL RADAR

En el sistema SLAR el haz emitido barre una franja paralela a la línea de vuelo (Fig.8) SLAR es una sigla formada por las palabras Side Lateral Airborne Radar. La antena solo recibe aquellas radiaciones reflejada en la misma dirección de la incidencia.

El generador produce impulsos de varios kilowatts de potencia y de muy breve duración (0.01 a 0.1.microsegundos).

La antena controla la polarización y dirección de emisión que junto con la longitud de onda son los tres parámetros básicos del sistema de radar. La forma de la antena es parabólica y produce un haz en forma de abanico.

La información sensada por el radar comprende:

- Longitud de onda.
- intensidad de la señal
- ángulo del objeto
- polarización
- distancia al objeto
- velocidad relativa del objeto (efecto Doppler)

Más adelante veremos a que características del terreno pueden responder las variaciones de éstos parámetros.

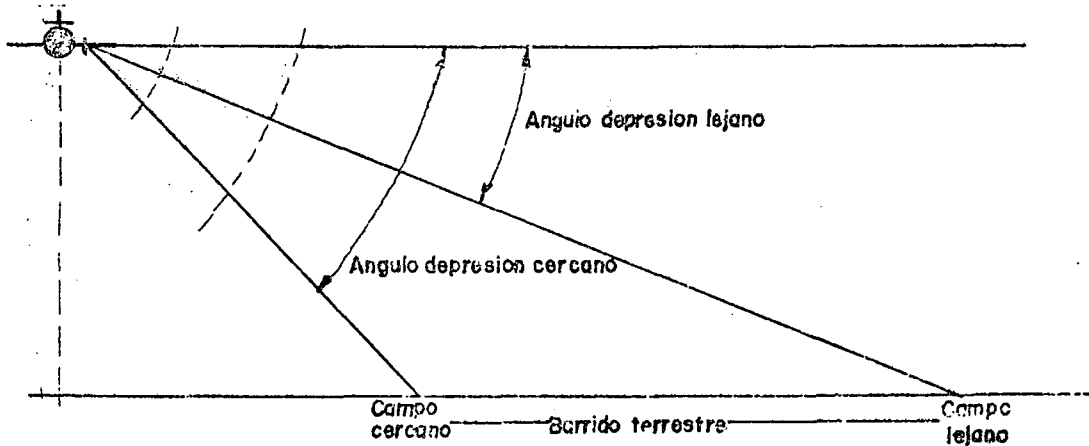
El ancho del haz emitido y recibido debe tener un determinado valor para que la emisión y receptividad sea uniforme. El ancho del haz (campo angular) lo determina la relación entre la longitud de onda y la longitud de la antena

campo angular: $\theta = \frac{L}{D}$

Longitud de antena (D)

Para obtener un ancho de haz reducido hay que reducir la longitud de onda ó aumentar el largo de la antena. Si se reduce la longitud de onda ésta puede ser interferida por la atmósfera y si se aumenta el diámetro de la antena se presentan problemas operativos (transporte en el avión). El desarrollo de la "antena sintética" hace que se logre el efecto de un haz angosto en toda su extensión. Su funcionamiento se basa en el efecto Doppler que produce un cambio de frecuencia de acuerdo a la velocidad relativa del punto de emisión (antena) con la superficie reflejante. En los radares con "antena sintética" la reconstrucción de la imagen del terreno se lleva a cabo sumando todos los registros (cambios de fase) recibido durante el tiempo en que el objeto permaneció en el área iluminada.

La importancia de lograr un haz angosto está en el aumento del poder de resolución del sistema.



Como vemos en los croquis el haz incidente ilumina una franja del terreno hacia un costado de la línea de vuelo. La parte próxima a la línea de vuelo se denomina "campo cercano". El haz emitido queda delimitado por los ángulos de depresión cercano y lejano. Usualmente esos ángulos son de 5° para el campo lejano y 75° para el campo cercano.

El ancho del haz es generalmente de 0.1° (1.75 miliradianes) y 0.5° (8.75 miliradianes).

La cantidad de impulsos emitidos es de 1.000 por segundo. El tiempo de emisión para cada impulso es de 0.1 microsegundos (10^{-7} segundo). El tiempo de emisión por cada segundo es de 10^{-4} segundos. Esto significa que el radar transmite 0.0001 % del tiempo y "escucha el 99.9999 % restante. El largo del impulso será el producto del tiempo de emisión (0,0000001 seg.) por la velocidad de propagación (300.000 Kms/seg.) siendo en este caso de 30 ms.

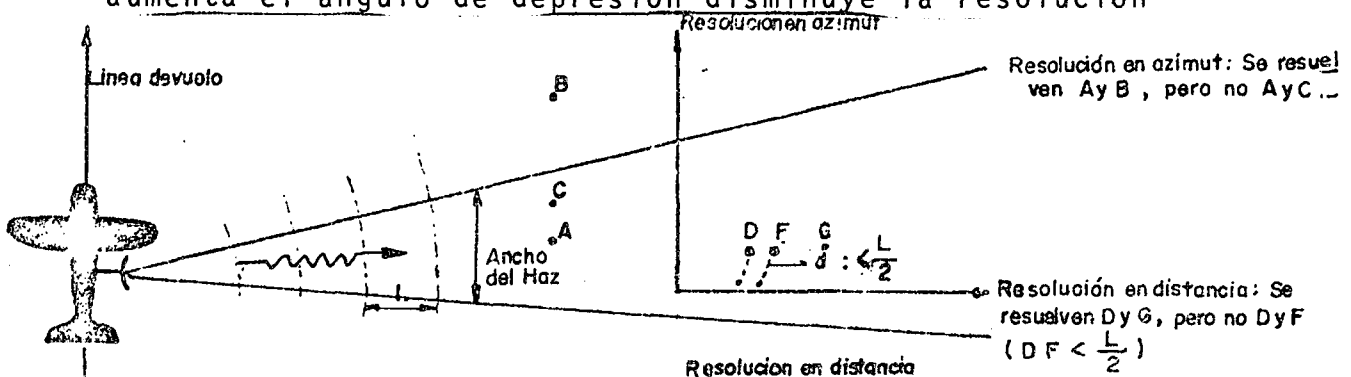
5-2-2- Resolución del sistema SLAR

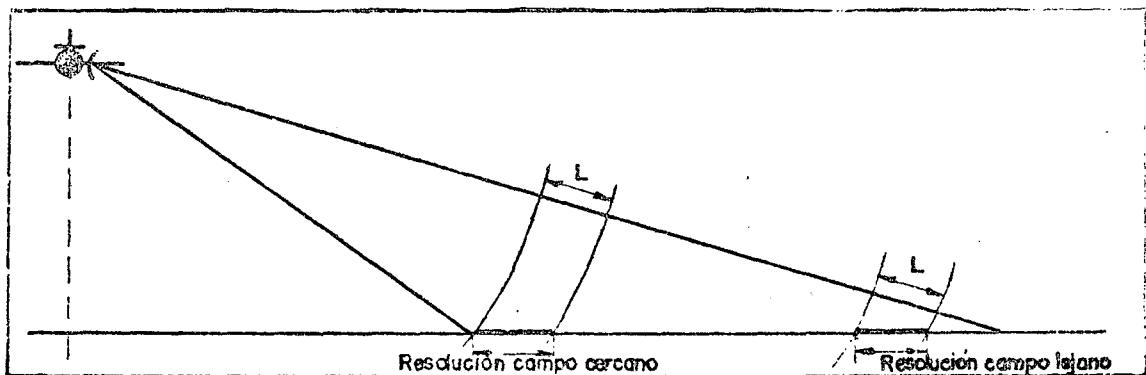
En el sistema SLAR la resolución es distinta según sea la dirección paralela ("resolución en azimut") ó perpendicular ("resolución en distancia") a la línea de vuelo.

Para la resolución en distancia de dos objetos, la separación entre ellos deberá ser mayor que la mitad del largo del impulso.

$$\text{resolución en distancia: } \frac{L}{2} \cdot \frac{\text{velocidad luz} \times \text{tiempo emisión}}{2}$$

La geometría del sistema SLAR determina que a medida que aumenta el ángulo de depresión disminuye la resolución





La resolución sobre la superficie terrestre es menor en el campo cercano que en el alejado (discrimina más en éste). De ésta forma tenemos por ejemplo que para un largo de impulso de 30 ms en el campo lejano (ángulo de depresión de 5°). La resolución es de 15,1 ms y en el campo cercano (ángulo de depresión de 85°) será de 172 ms.

La resolución aumentaría acortando el largo del impulso pero hay limitaciones en el diseño del sistema que no permiten hacerlo.

Resolución en azimut:

Para la resolución en azimut uno de los dos puntos a resolver tendrá que estar fuera del haz (croquis). En radares de apertura real (sin antena sintética) el ancho del haz corresponde a la relación:

$$\frac{\text{longitud de onda } (L_o)}{\text{largo antena}}$$

Como ya se ha mencionado, en la práctica, el ancho del haz varía entre 0,1° y 0,5°. La resolución, a lo largo de la línea de vuelo se la expresa:

$$\frac{\text{distancia al objeto } \times L_o}{\text{largo antena}}$$

Por lo que la resolución será mejor en el campo cercano (distancia al objeto menor) que en el campo lejano.

En el sistema APQ 97 (Westinghouse) la resolución en azimut (paralelo a la línea de vuelo) es de 14 ms para el campo cercano y 37 ms para el campo lejano.

En el radar de apertura (antena) sintética la resolución se logra mediante el registro y comparación de cambio de fases de las ondas reflejadas por efecto Doppler que es función de la distancia al objeto reflejante. En éste caso la resolución se mantiene constante durante el recorrido siendo la resolución azimutal:

Largo de la antena (efectivo)

2

El valor de la resolución azimutal en el radar APQ -102 de Good Year es de 16 ms.

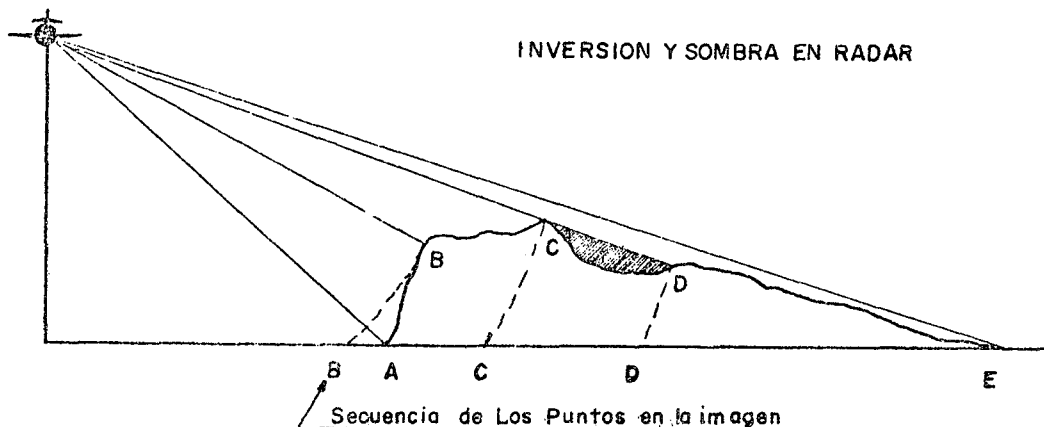
5-2-3- Factores de la reflectancia:

La señal recibida por el radar dependerá de las siguientes características de la superficie reflejante que posibilitan la extracción de información temática de la imagen resultante:

- conductividad y propiedades dieléctricas: a valores altos de constante dieléctrica mayor reflectancia.
- rugosidad de la superficie: determina la dirección e intensidad de la radiación reflejada.
- resonancia física: elementos con alta resonancia provocan mayor reflectancia.
- características topográficas: la pendiente del terreno es uno de los factores determinantes en la intensidad y dirección de la energía reflejada.

En el caso de zonas cubiertas de vegetación el radar registra también la reflexión producida por el terreno. Para las longitudes de onda de 1 mm. la vegetación tiene características de alta rugosidad salvo el follaje cuya señal de retorno es débil. (el espesor de la hoja es menor a λ).

La geometría del sistema hace que para resaltos topográficos muy altos se produzca inversión del relieve así como zona de "no retorno" (sombras). Las longitudes de las sombras que son siempre perpendiculares a la línea de vuelo permiten apreciar la altura de los objetos. La figura 9 muestra el efecto llamado "escorzo" (foreshortening) por el cual en dos pendientes de igual grado la que está hacia el campo cercano tendrá una representación menor que la que buza hacia el campo lejano.



Por el tipo de proyección utilizada para formar la ima gen la escala de la misma varía en el sentido perpendicular a la línea de vuelo.

La distorsión de las imágenes de radar se pueden deber a:

- Ajuste incorrecto (mala calibración) de los controles
- Variaciones en la altura de vuelo.
- Desviación lateral ó deriva
- Velocidad mal sincronizada
- Mal funcionamiento del equipo.

A estas causas corresponden por ejemplo: distorsiones geométricas de la imagen (un cuadrado se transforma en un pa ralelogramo), compresión de líneas, cuando la velocidad de calibrado es mayor que la velocidad real ó separación de las líneas en el caso contrario.

Los movimientos del avión (giro, cabeceo, balanceo, ines tabilidad) también producen deformaciones geométricas en la imagen.

Las imágenes producidas por algunos sistemas (Westinghouse- Gems) traen impresas escalas de distancia en sentido perpendicular a la línea de vuelo que sirven para controlar las variaciones entre el campo lejano y cercano.

5-3- Sistema Landsat:

El programa Landsat fué puesto en marcha por la NASA en la década del 60, motivado principalmente por necesidades del conocimiento geológico.

En el año 1972 se produjo el lanzamiento del primer satélite Landsat 1 (ex ERTS) portador de dos tipos de sensores multiespectrales que registran y transmiten a las estaciones terrenas del sistema, valiosísima información para el conocimiento de los recursos naturales. Posteriormente se puso en órbita el satélite Landsat 2 (1975) y Landsat 3 (previsto para marzo de éste año) y se espera poner en órbita el Landsat D para 1981. Este último cuenta con bandas para el registro del infrarrojo emitido y una mayor resolución en la información de superficie.

Los datos obtenidos con Landsat han revolucionado las posibilidades de estudio de la superficie terrestre como en su tiempo lo hizo el recubrimiento sistematizado de vuelos aerofotográficos de baja altitud.

En los EE.UU. la información Landsat es canalizada a través de US Geological Survey al EROS DATA CENTER, quién la distribuye a nivel mundial pudiendo tener acceso a ella cualquier entidad ó particular en forma oficial ó privada.

Además de los dos sensores que portan los satélites Landsat, éstos son utilizados como plataformas repetidores de datos de estaciones de registro automáticas instaladas en lugares de difícil acceso que envían datos sobre lluvias, nieves, temperatura, etc.

La información del satélite es registrada en tiempo real ó diferido en las estaciones terrenas instaladas en EE.UU., Brasil, Italia, Iran y para 1980 también en Argentina.

Con la estación a instalar en nuestro país, se cubrirá, en tiempo real, gran parte de América del Sur, según un radio de alcance de 2.700 Kms. Al sensor del satélite se lo activa desde tierra según se desee información ó no de la zona donde está orbitando.

La información Landsat es transmitida a las estaciones terrenas por ondas de radio en frecuencia muy alta (2.200 Mhz). A la antena de la estación terrena llega la información multispectral de los sensores y los datos métricos de los movimientos del satélite (giros, cabeceo, rolido, etc.) y su posición según coordenadas que sirven para las correcciones planimétricas de la imagen, tal cual ocurre con los movimientos del avión en relevamientos fotográficos ó de radar.

Los dos tipos de información son recibidas en forma codificada según un lenguaje binario.

En la "planta receptora" se reciben las señales y se registran en cintas de alta densidad (HDTR, High Density Tape Record) que pasan a la planta "procesadora" donde la cinta de alta densidad se descodifica, se realizan las correcciones planimétricas y finalmente se produce el registro en forma de imagen ó de cintas compatibles (CCT Computer Compatible Tapes).

La ventaja de contar en el país con una planta receptora y procesadora significa la obtención de imágenes y tapes en tiempo real siendo ésto de principal interés para estudios agronómicos en glaciología, nivología, hidrología y en menor grado para algunos fenómenos geológicos como el vulcanismo y remociones en masa. Para el interés geológico es importante por la obtención de registros (imágenes) de primera generación y por la facilidad de obtenerlas, también por la facilidad de seleccionar los mejores registros para procesamiento digitales donde la influencia atmosféricas y de superficie deben ser perfectamente conocidas.

5-3-1- Principales parámetros del sistema Landsat:

Altura: 900 Kms. (705 Km. en LANDSAT D)

Orbita: sub- polar

Recubrimiento de imágenes: máxima hacia los polos (85 % a 80° de latitud) y mínima en el ecuador (14 %).

Distancia entre órbitas sucesivas: 2.760 Kms.

Distancia entre órbitas adyacentes: 158 Kms. en el ecuador y 122 Kms. a los 40° latitud.

Período de repetición de órbita: 18 días

Ancho de la faja barrida por el sensor: 185 Kms.

Radio de cobertura de la estación terrena: 2.700 Kms.

5-3-2- El registro de la información Landsat:

Los satélites del sistema Landsat poseen dos tipos de sensores:

Sensor RBV: (Return Beam Vidicon Camera)

En Landsat 1 y 2 son tres cámaras que toman la misma escena (185 x 185 Kms) y operan en el rango de 0.475 a 0.830 micrones de longitud de onda (visible al infrarrojo).

En el Landsat 3 funcionan dos cámaras RBV sensibles al rango 0.505 y 0.750 mc. Cada una cubre un ancho de faja de 98 Kms.

El funcionamiento del RBV es similar a una cámara de TV.

Cada cámara posee una lente, filtro, obturador, muelle de enfoque y elementos electrónicos. Los filtros determinan el rango de sensibilidad espectral para cada cámara.

El poder de resolución es mayor que el del MSS. Las cámaras RBV en los satélites Landsat 1 y 2 funcionaron durante un corto período y las imágenes de las mismas han tenido poca difusión, por lo menos a nuestro nivel.

Sensor MSS (Multispectral Scanner)

Un espejo oscilante (Fig.11) desvía la radiación reflejada por la superficie terrestre hacia 24 detectores (fotomultiplicadores y detectores infrarrojos).

A cada banda corresponden 6 detectores:

- Banda 4: 0.5 - 0.6 micrones (verde)
- Banda 5: 0.6 - 0.7 (rojo)
- Banda 6: 0.7 - 0.8 (infrarrojo)
- Banda 7: 0.8 - 1.1 (infrarrojo)

Se agrega para el Landsat C una banda en el infrarrojo termal (10.2 - 12.6 micrones Lo).

El Landsat D tendrá 6 canales que registrarán las siguientes longitudes de onda.

visible	{	0.45 - 0.52 mc.	}	energía reflejada
		0.52 - 0.6 mc.		
		0.63 - 0.69 mc.		
		0.76 - 0.9 mc.		
infrarrojo	{	1.55 - 1.75 mc.	}	energía emitida
		10.4 - 12.5 mc.		

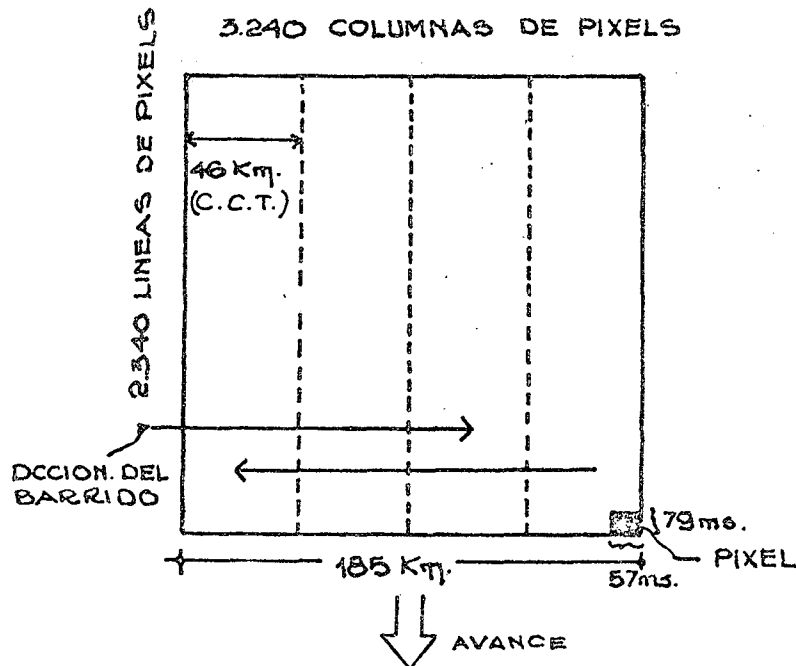
Las bandas del espectro a registrar se han estrechado existiendo tres bandas para el infrarrojo reflejado y una para el infrarrojo térmico (emitido). Aún no hay mayor difusión de datos sobre las características del Landsat D. La modificación de las bandas y el registro de infrarrojo térmico habrán sido motivados para lograr una aún mayor información temática. (geológica?).

Se produce una imagen por banda, estando las cuatro imágenes de la misma escena en perfecto registro. No se obtienen imágenes en color. Como veremos más adelante las imágenes en falso color compuesto no tienen nada que ver con el color real por ej. tomado con una cámara con película fotográfica.

5-3-3- Geometría del sistema Landsat:

El espejo explorador oscila en sentido Oeste-este, a una frecuencia de 13.62 ciclos por segundo (Fig.11), barriendo 6 líneas por oscilación perpendicularmente a la órbita del satélite y cubriendo una faja de la superficie con un ancho de 185,2 Kms. El campo visual instantáneo ó sea la resolución del sistema es un cuadrado de 79 x 79 ms (nominal). En la práctica el tamaño de ese cuadrado, llamado "pixels" (picture elements) es de 79 x 57 ms (resolución efectiva) por su perposición en el sentido del barrido (W-E) producida por la rotación de la tierra.

El Landsat D, la resolución será de 30 x 30 ms. para el registro de energía reflejada.



Una imagen Landsat está integrada por 3.240 columnas en sentido N S y 2.340 líneas en sentido Oeste-Este de "pixels" ó que por cada banda hay $7,6 \times 10^6$ " pixels".

A cada imagen de 185 x 185 Km. corresponden 4 cintas

(CCT) y cada una de éstas cintas contiene la información digital de las 4 bandas según una columna de 46 x 185 Kms.

A su vez, en cada pixel los detectores discriminan entre 127 niveles de energía que son traducidos a la imagen como valores de grises (0: negro; 127: blanco). En la banda 7 se discriminan solamente 64 niveles.

5-3-4- Precisión métrica en las imágenes Landsat (MSS):

Las deformaciones geométricas pueden estar causadas por errores internos del sensor (por ej. velocidad de barrido del espejo), por errores externos (por ej. variaciones de órbita y altura), por errores de procesamiento y de transmisión telemétrica de datos y finalmente por errores debido al relieve, rotación terrestre, etc.

Las imágenes son sometidas a distintas etapas de corrección. Las que normalmente utilizamos tienen el "procesamiento a granel" (MSS Bulk Output Product) donde la precisión de la ubicación de un punto en la imagen en relación al terreno puede tener un error de hasta 757 ms.

Los errores en el registro de un punto para las distintas bandas de la misma escena es de hasta 160 ms.

Los errores planimétricos de las imágenes con procesamiento de precisión pueden ser cinco veces menor que el logrado con el procesamiento a granel.

5-3-5- Los productos de la información Landsat:

La información Landsat puede ser adquirida por el usuario a las entidades representantes del Eros Data Center (en Argentina el Instituto Geográfico Militar) en forma de imágenes ó cintas magnéticas.

En el siguiente cuadro se detallan los diversos productos que distribuye el Eros Data Center:

Cintas: cada imagen Landsat de 185 x 185 Kms está integrada por 4 cintas CCT (Computer Compatible Tapes) según cuatro franjas de la imagen. Las cintas pueden adquirirse individualmente y cada una tiene la información de las cuatro bandas del MSS.

Imágenes:

<u>Tamaño</u>	<u>Imagen</u>	<u>Escala</u>	<u>Producto</u>	<u>Blanco y Negro</u>	<u>Falso Color</u>
55,8	mm.	1:3369000	film pos.	si	no
55,8	mm.	1:3369000	film neg.	si	no
18,5	cm.	1:1000000	papel	si	si
18,5	cm.	1:1000000	film pos.	si	si

<u>Tamaño</u>	<u>Imagen</u>	<u>Escala</u>	<u>Producto</u>	<u>Blanco y Negro</u>	<u>Falso Color</u>
18,5	cm	1:1000000	Film neg.	si	no
37,1	cm	1:500000	papel	si	si
74,2	cm	1:250000	papel	si	si

En las márgenes de la imagen se observan una serie de datos que responden a:

- latitud y longitud terrestres con intervalos de 30 minutos de arco. Por debajo de los 60 grados de latitud los intervalos son de 1°.
- próximas a los esquineros se encuentran las marcas de registro (cruces). Sirven para la superposición de las 4 imágenes de la misma escena en las distintas bandas y para la determinación del centro de la imagen trazando las diagonales.

En la parte inferior de la imagen y de izquierda a derecha se encuentran los siguientes datos:

- fecha de toma de la imagen
- coordenadas terrestres del centro de la imagen
- otros datos de coordenadas.
- ángulo de elevación del sol y su azimut.
- correcciones métricas efectuadas.
- código del proyecto, número de órbita, número de imagen, banda, etc.

Esta codificación ha sido modificada no disponiéndose de información para interpretarla totalmente.

También se coloca una escala tonal de 15 pasos cuyas variaciones de grises es función de la densidad del haz electrónico con el que se formó la imagen y permite la correlación con las intensidades de tonos en la imagen.

Formación de las imágenes en falso color:

Las imágenes en falso color se logran utilizando 2 ó 3 bandas de la misma escena y asignándoles a cada una un color complementario (amarillo, cyan ó magenta), ó cualquier otro color. Con la superposición de las tres bandas se logra una imagen en falso color.

Fotográficamente el falso color compuesto se puede lograr mediante el método Diazo, que consiste en la utilización de un celuloide sensible a la luz ultravioleta (película Diazo). Cada hoja tiene solamente uno de los colores primarios ó complementarios. El papel Diazo origina imágenes positivas por contacto, en éste caso con los films positivos de Landsat.

Asignando por ej. a la banda 5 el color magenta a la banda 4 el amarillo y a la banda 7 el cyan y superponiendo según marcas del registro los tres productos se obtiene una imagen en falso color compuesto.

También se logra electrónicamente en los diversos sistemas de procesamiento digital de información Landsat. El producto a obtener se visualiza finalmente a través de un circuito de televisión, donde la imagen resultante en falso color es fotografiada.

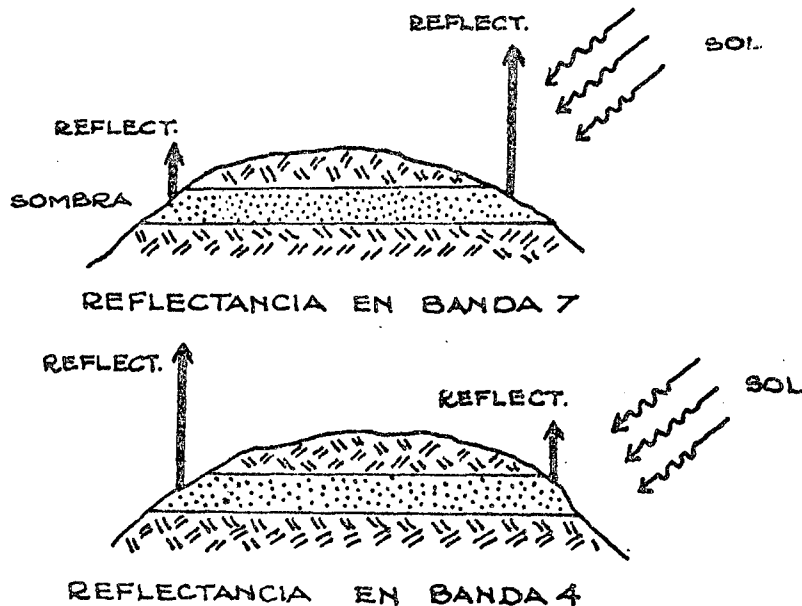
5-3-6- Aportes de la información Landsat en la geología y prospección minera:

En párrafos anteriores se ha tratado de definir la integración de los datos de percepción remota en las diversas etapas de un plan de prospección. Se ha hecho mención que a escalas de reconocimientos super-regionales el material obtenido con algunos sistemas de percepción remota es el que más se adecua a esos fines, en particular la información Landsat, cuyas ventajas están ya establecidas por las siguientes características:

- aspecto sinóptico: la superficie que cubre cada imagen (34.000 Km².) permiten visualizar las grandes unidades estructurales, unidades litológicas, contactos, lineaciones, megatrazas, "ratificando información geológica existente ó comprobando fenómenos geológicos supuestos".
- imágenes ortográficas: dada la altura de toma no influye el relieve y la imagen se puede considerar una proyección ortográfica de la superficie. Por ésta razón, ausencia de desplazamiento debido al relieve, no existe "paralaje" lo que imposibilita su observación estereoscópica en imágenes adyacentes con superposición.
- tono: por la rapidez de la toma las condiciones de luminosidad (intensidad de grises) es la real para toda la superficie de la imagen y obedece a distintas características del terreno. Por el contrario si observamos un mosaico realizado mediante el ensamble de fotografías aéreas convencionales es muy notable las variaciones tonales que entorpecen la obtención de información temática a partir del mismo. Estas variaciones de tono en un mosaico fotográfico se deben al cambio de la posición del sol durante las sucesivas tomas, al efecto topográfico y al proceso de revelado y copiado.
- registro multiespectral: la utilización simultánea de varias bandas espectrales para la misma escena aumenta el volumen de la información a obtener ya que cada "objeto" de la superficie tendrá una mayor ó menor reflejancia para las distintas longitudes de onda (verde -rojo- infrarrojo).

El uso de "razones" ó superposición de dos bandas permiten realizar ó delimitar unidades no visibles en cada una de

Las bandas, separadamente:



En éste ejemplo la razón 7/4 dará los mismos valores de reflectancia a la arenisca en toda la superficie aflorante.

En la interpretación visual de una imagen Landsat puede usarse el mismo criterio ó metodología que en la interpretación de una fotografía aérea convencional, basándose en la separación de unidades según las variaciones de tono y textura, las distintas expresiones morfológicas, (patrones y densidad del drenaje) propiedades de las rocas (resistencia, estratificación buzamientos, contactos, etc.) y características de la cubierta (material superficial, vegetación, cultivos). Para una región sin cartografía geológica existente, la interpretación visual de la imagen Landsat permitirá identificar rápidamente ambientes sedimentarios, ígneos y probablemente también metamórficos. Dentro de los primeros se puede categorizar el grado de plegamiento ó tectonización (ligero, moderado ó intenso) y también se puede sacar conclusiones sobre la granulometría de los depósitos sedimentarios (gruesos ó finos), obviamente a un nivel de detalle acorde a la escala de una imagen Landsat.

Respecto a su utilización en programas de prospección minera, insistiremos de que la información extraída de la imagen Landsat es un complemento más a combinar con la información geológica, geofísica y geoquímica a efectos de aproximarse y lograr la delimitación de área con posibilidades ciertas de yacencias de cuerpos mineralizados.

Las figuras 12 a y b, corresponde a un ejemplo tomado de un trabajo realizado por la Escuela de Minas de Colorado (USA) que tuvo el objetivo de demostrar la aplicabilidad de la información Landsat, habiéndose tomado una zona con distritos mineros explorados al detalle desde el siglo pasado; sobre la imagen (en la figura a escala 1:1000000) se identificaron estructuras circulares y elípticas en un ambiente intrusivo - efusivo de edad terciaria baja. Dichas estructuras, perfectamente visibles en la imagen, son la expresión, superficial de la intrusión de cuerpos ígneos que han dado origen a mineralizaciones en la periferia ó en relación a planos de fallas y fracturas producidas durante el emplazamiento de los cuerpos, removilizaciones de los mismos y posterior enfriamiento.

Las estructuras circulares y elípticas se visualizan debido a la integración en la imagen de variadas lineaciones dadas por fracturas, fallas, zonaciones litológicas, drenaje, vegetación, etc. La figura 12 b corresponde a un overlay de la imagen donde estan transferidas las estructuras circulares y lineaciones. En los sectores donde existía mayor densidad de lineaciones en los bordes ó proximidad de estructuras circulares estaban localizadas las principales minas de la región.

En el caso de la prospección uranífera las imágenes Landsat pueden constituir un material útil en la delimitación de posibles zonas de aporte, transporte y receptoras y en la identificación de algunos rasgos geomórficos como superficies de arrasamiento, escalones tectónicos, etc.

Las posibilidades de la imagen Landsat dependerá de las características climáticas de la zona y del ambiente donde se ubica la región en estudio (cordillera andina, cordilleras antiguas, regiones cratónicas, cuenca epicratónicas ó intercratónicas).

Un mayor aprovechamiento quizá pueda lograrse en regiones de "plateau", macizos y cuencas extraandinas donde las formaciones rocosas tienen grandes extensiones aflorantes y una madurez de relieve que favorecen la interpretación litológica, alteraciones, superficies de erosión, espesores de cubierta, siendo la expresión morfológica, diseños de drenaje, tonos y texturas representativos de las características del terreno.

En la interpretación visual se usa generalmente la banda 7, siendo conveniente el empleo simultáneo de las bandas 5 y 6.

Da buenos resultados observar la imagen en diferentes posiciones de forma de hacer variar la proyección de las sombras respecto al observador. También es aconsejable el uso de una lupa aplanática.

Existen instrumentos como el Mini Color Viewer (proyector multiespectral) que permite la visualización de la escena Landsat en sus 4 bandas yuxtapuestas en falso color, pudiendo

variar la intensidad de luz para cada banda siendo la escala de la ampliación fija.

5-3-7- Análisis digital de la información Landsat

Las posibilidades de usar sistemas de computación con la información Landsat se basa en las características de su registro, integrado en la imagen por "pixels" en los cuales se han discriminado 127 niveles de energía (tonos de grises). A su vez cada pixel responde distinto de acuerdo a la banda utilizada. Esta información está almacenada en cintas magnéticas (CCT) que son las que se usan para la computación.

Un análisis por computadora puede realizarse según una "clasificación controlada" ó sin "control".

El primer caso requiere conocimientos previos de campo y una selección de los elementos a clasificar (se conoce lo que se quiere clasificar). Los sistemas de procesamiento digital permiten una ampliación y visualización del área de estudio a una escala suficiente (hasta 1:25000) como para la ubicación en la misma de los puntos reconocidos en el terreno.

Esos puntos corresponden a pixels con determinados valores de energía. La máquina rastrea, selecciona y forma una imagen y registro numérico donde resaltarán los sectores con "pixels" que tengan la misma respuesta espectral.

En la exploración por uranio se han realizado trabajos más laboriosos de "clasificación controlada" donde se integran datos de tipo geofísico (radiometría aérea), geoquímicos, rasgos geológicos conocidos ó supuestos como controles de mineralización y valores espectrales en las distintas bandas Landsat. Un análisis estadístico valoriza y selecciona las distintas variables en relación a su mayor coincidencia con los sectores anómalos ya conocidos.

La computadora procesa las relaciones entre las distintas variables para una zona piloto y extrapola los resultados a zonas más extensas donde no será necesario que exista la cobertura geofísica, geoquímica ó conocimiento geológico detallado para determinar los sectores con mayores posibilidades uraníferas.

Con la utilización exclusiva de la información multiespectral Landsat y la identificación de puntos de control sobre el terreno se han realizado también investigaciones sobre uranio en sedimentos terciarios en Wyoming (EE.UU) tratando de valorizar áreas en base a la respuesta espectral Landsat en las distintas bandas y razones.

En el caso particular de zonas con mineralización de uranio la utilidad de la información Landsat se fundamenta en la respuesta espectral que tienen algunos minerales de Fe (hematita-timonita en sus diversas formas) que acompañan los sectores de

mineralización (en éste caso cuerpos tipo roll). Los resultados si bién positivos no se pueden considerar concluyentes ó espectaculares.

Muchas son las variables en el registro de la información Landsat que hacen que a similares características del terreno las respuestas no sean iguales ó también que materiales totalmente distintos dan la misma respuesta espectral por ej: arenisca con impregnación limonítica y acarreos eólicos recientes, sombreros de hierro y capas rojas, etc.

En una clasificación de éste tipo deben darse en el registro Landsat condiciones de uniformidad en:

- La respuesta del detector MSS
- La influencia de la atmósfera
- Condiciones a nivel de superficie (vientos, humedad)
- Cobertura (vegetación)
- Errores de procesamiento

La respuesta espectral de distintas superficies puede cuantificarse con la medición sobre el terreno mediante radiómetros.

En la clasificación "no controlada" se procede a la separación de unidades mediante el procesamiento digital utilizando las diversas razones que el sistema permita: (7/6, 7/5, 7/4, 6/5, 5/4 etc.) y filtros que resaltan la respuesta espectral en diversas direcciones que favorece la identificación de lineaciones y estructuras. El número de unidades a separar lo determina el usuario. No se sabrá a ciencia cierta a que respondan dichas unidades, pero el especialista geólogo puede suponer su relación con determinados rasgos geológicos (alteración, estructuras, litología, etc.) confirmándolos con posteriores chequeos de campo.

Algunos de los sistemas de procesamiento digital para información Landsat permiten el resaltamiento de la señal que se investiga, lográndose en la imagen resultante una mayor representación de los pixels con los niveles de energía buscados (Línear Stretch).

En el procesamiento digital para investigaciones de zonas mineralizadas se toman generalmente áreas de dimensiones a nivel de "distritos" ó sea del orden de algunos miles de Kms. cuadrados (2.000 a 5000 Kms²).

No es aventurado afirmar la conveniencia de mantenerse atentos a los avances de los procesamientos de información multiespectral ó de iniciar experiencias en relación a la prospección por uranio, ya que si bién no se deben esperar resultados espectaculares es indudable que tales procesamientos proveen de información útil en algunas etapas de la prospección siendo

de esperar que las bandas espectrales del Landsat D aumentan el caudal de información provisto por éste sistema.

- Sistemas de procesamiento digital:

Los siguientes son algunos de los sistemas más conocidos. Cada uno de ellos presentan distintos alcances en los aspectos cualitativos y métricos y en las posibilidades de interacción con otro tipo de información. Las características de cada uno determinarán su conveniencia en el uso para las distintas disciplinas (suelos, agricultura, geología, etc.): General Electric IMAGE - 100 (usada en el Eros Data Center); Bendix Multispectral Data Analysis System (MDAS); International Imaging Systems, Inc: I² S System 101); Jet Propulsion Laboratory Video Communication and Retrieval (VICAR) Electronic Systems Laboratory (ESL); Interactive Digital Image Manipulation Systems (IDIMS) Laboratory for Applications of Remote Sensing (LARSYS) y por último el sistema Stansort desarrollado en el Laboratorio de Sensores Remotos de la Universidad de Stanford, (U.S.A.) algunos de cuyos resultados tuvimos oportunidad de apreciar recientemente.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA:

- "Sensores Remotos y Principios de Percepción Remota" Daniel DE AGOSTINI R. Centro Interamericano de Fotointerpretación (CIAF) Bogotá - Colombia 1975.
- "Simultaneous use of geological, geophysical and Landsat Digital Data in uranium exploration". A. PRELAT y R.J.P. LYON. Stanford Remote Sensing Laboratory. Stanford University (U.S.A) 1977.
- "Multispectral Processing of Landsat Data for Uranium Exploration in the Wind River Basin, Wyoming" Bette C. Salmon and Willans Pillar. Research Institute of Michigan. ERDA (U.S.A.) 1975.
- "Remote Sensing in Uranium Exploration". T.W. Offield. U.S.G. Survey. Denver, Colorado (I.A.E.A. SM 208/15) 1976.
- "Targeting Mineral Exploration in Central Colorado using Landsat Imagery". D.G. Orr-Charles Trautwein. Eros Data Center Workshop Exercise. 1975.
- "Notas sobre Percepción Remota" J.N. Rinker, División Experimental de Fotointerpretación, Ingenieros del Ejército. Fort Belvoir Virginia (U.S.A.).
- "The Landsat Satellite System" D.C. Orr - J.V. Taranik Eros Data Center.
- "Uso de las Fotografías Aéreas en la Exploración de Yacimientos Económicos". E. van Es. CIAF. Bogotá, Colombia. 1972.
- Apuntes de clase del 2do. Curso Latinoamericano de Sensores Remotos Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales (CNIE) y Eros Data Center, Buenos Aires- Argentina 1977-
- Apuntes de clase del Seminario sobre Procesamiento Digital de Información Multiespectral en la Prospección Minera. CNIE-Universidad de Stanford Buenos Aires- Argentina-Agosto de 1978.
- Apuntes de clase del Curso Regular Fotointerpretación Geológica 1975. CIAF Bogotá-Colombia 1975.

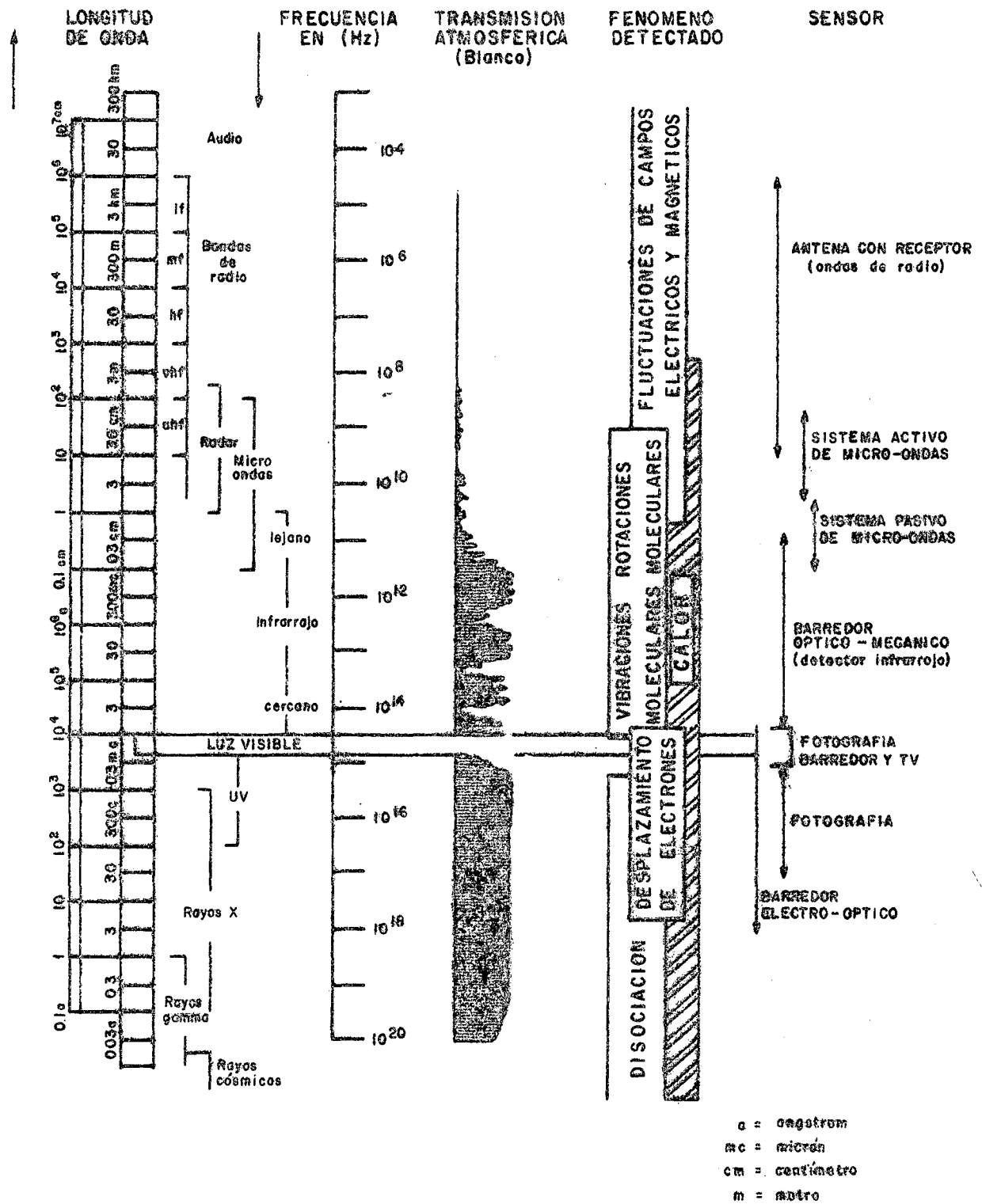


Fig.1 - División del Espectro Electromagnético

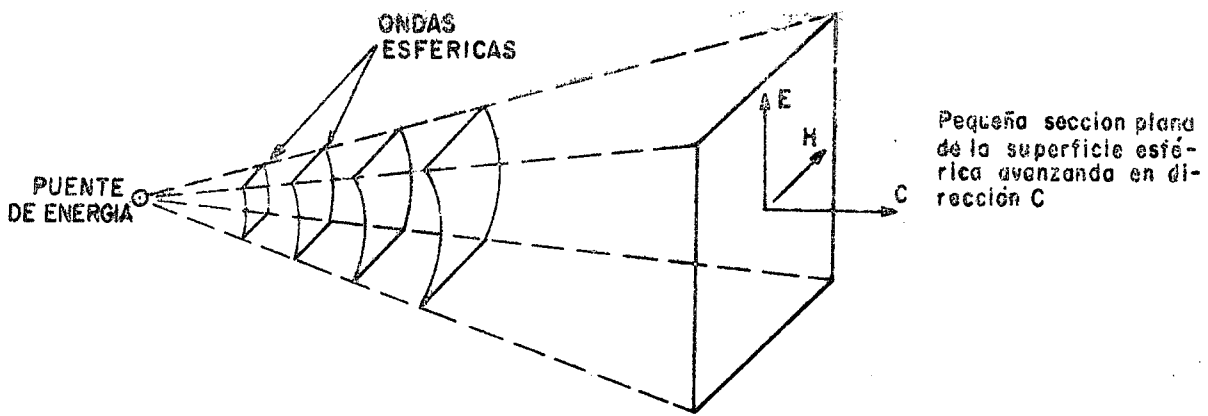


Fig. 2 - Propagación de ondas

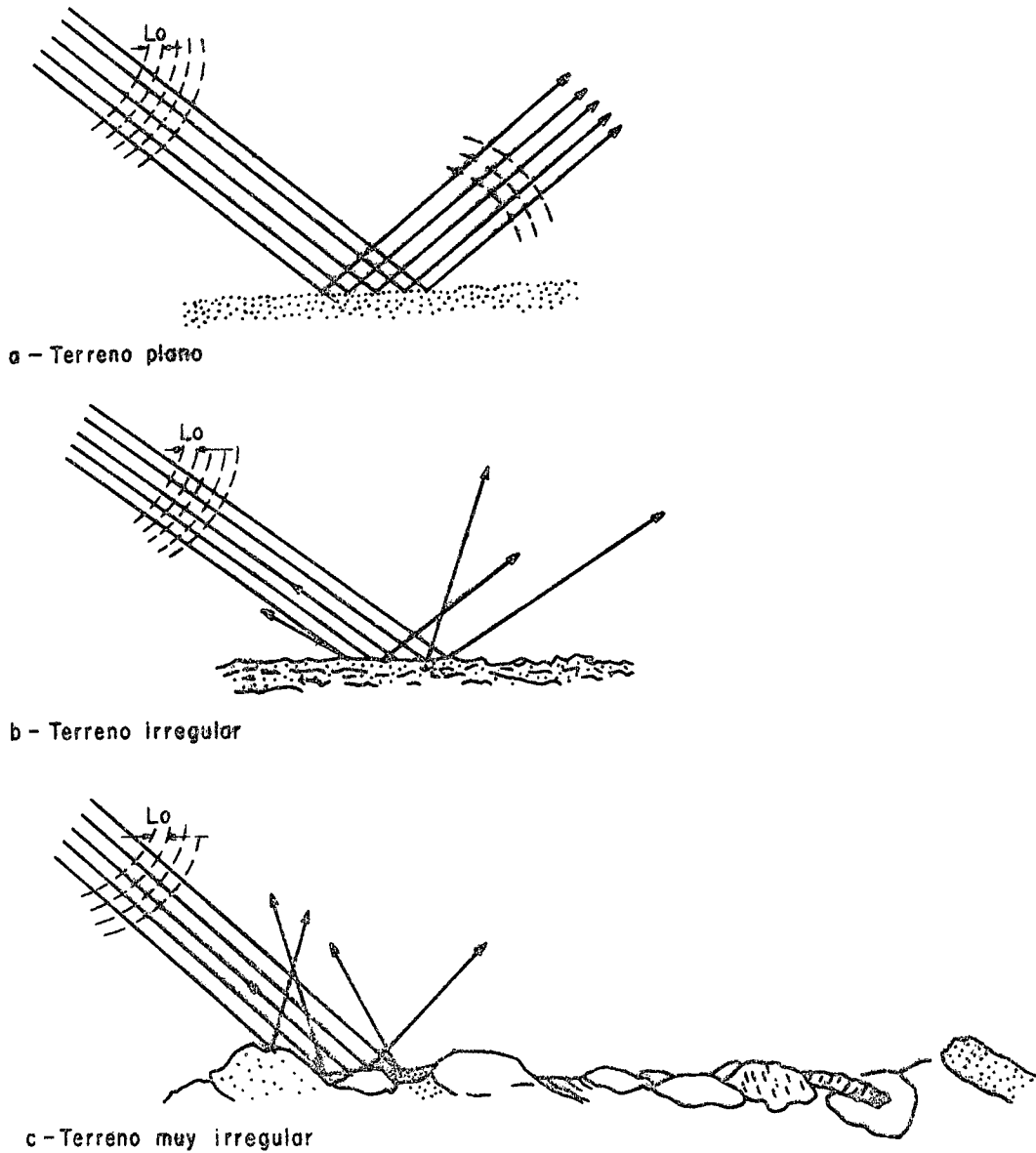


Fig. 3 - Reflexión especular (a) y difusa (b y c)

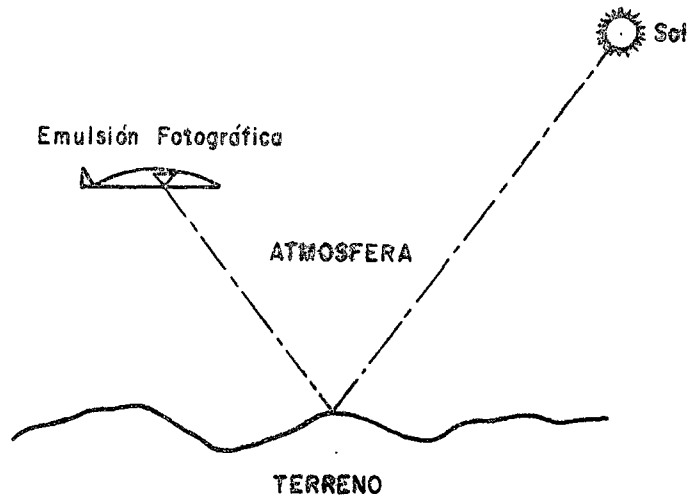


Fig.4 - Trayectoria de las radiaciones para la formación de fotografías aéreas convencionales

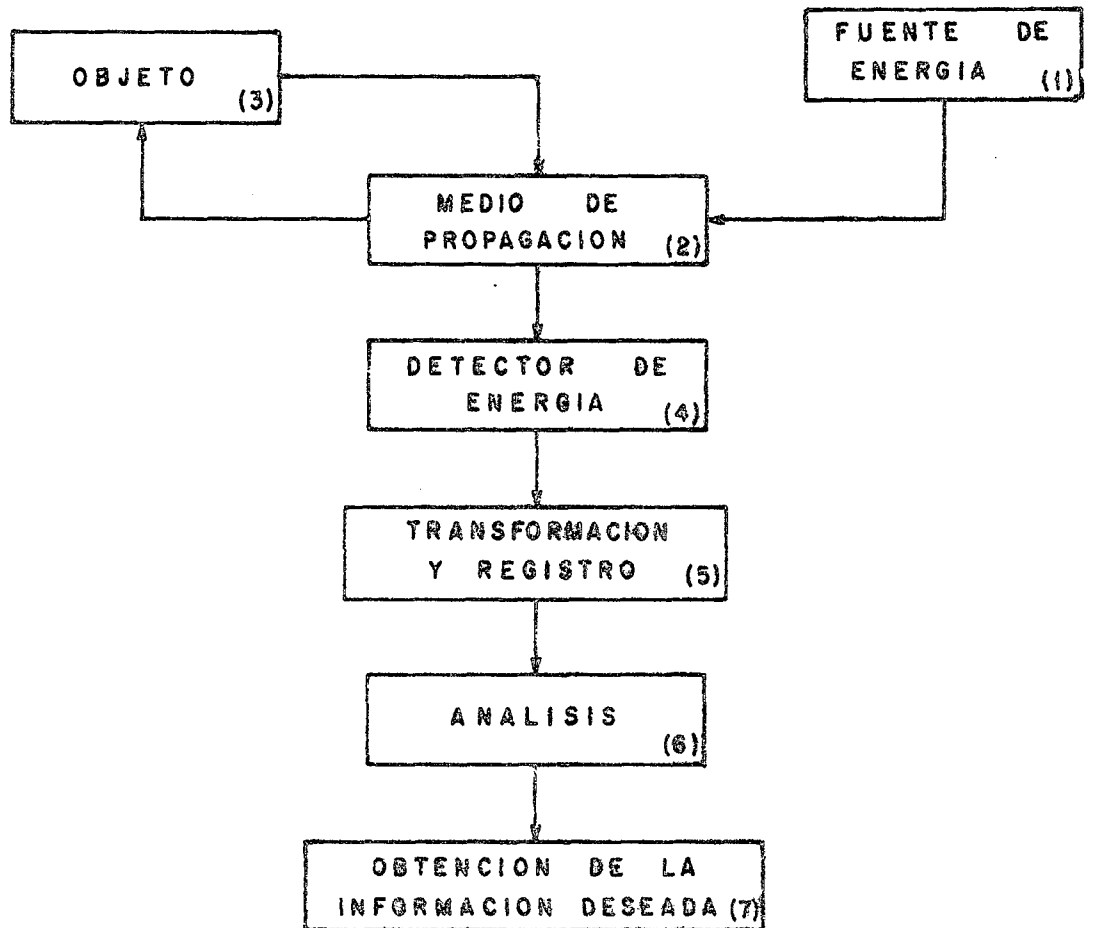


Fig.5- Diagrama del principio de percepción remota

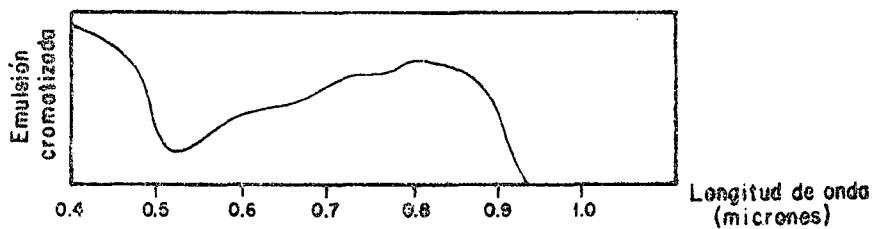
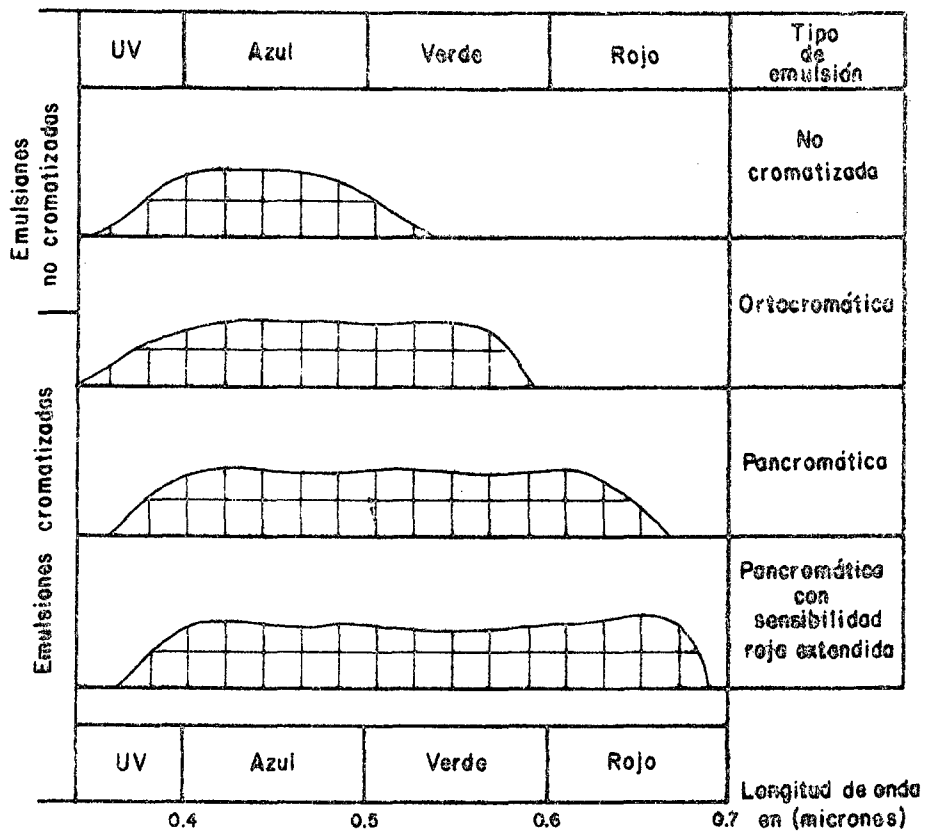


Fig.6-Espectrograma para diferentes tipos de emulsión

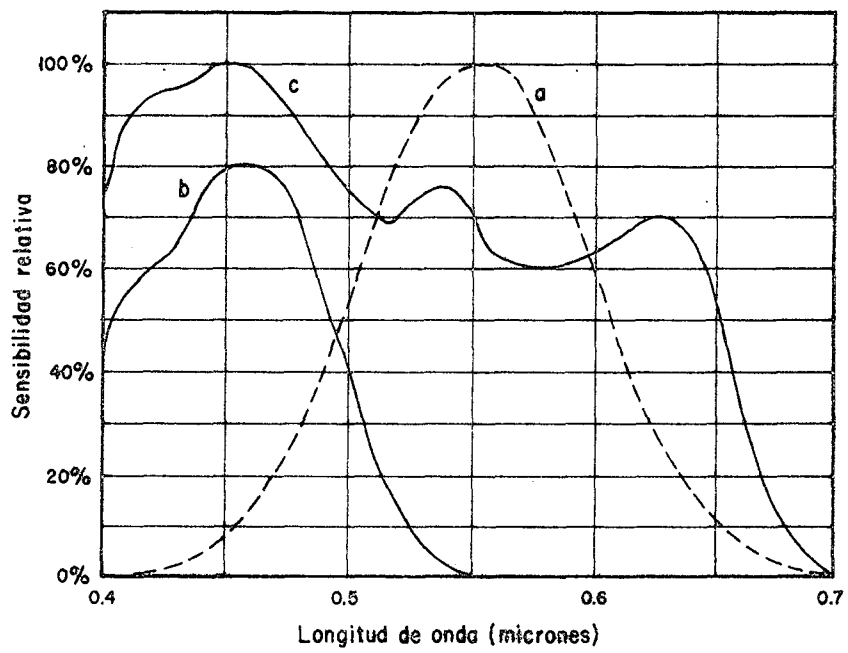


Fig 7 - Sensibilidad espectral de: el ojo (a); emulsión ortocromática (b); emulsión pancromática (c)

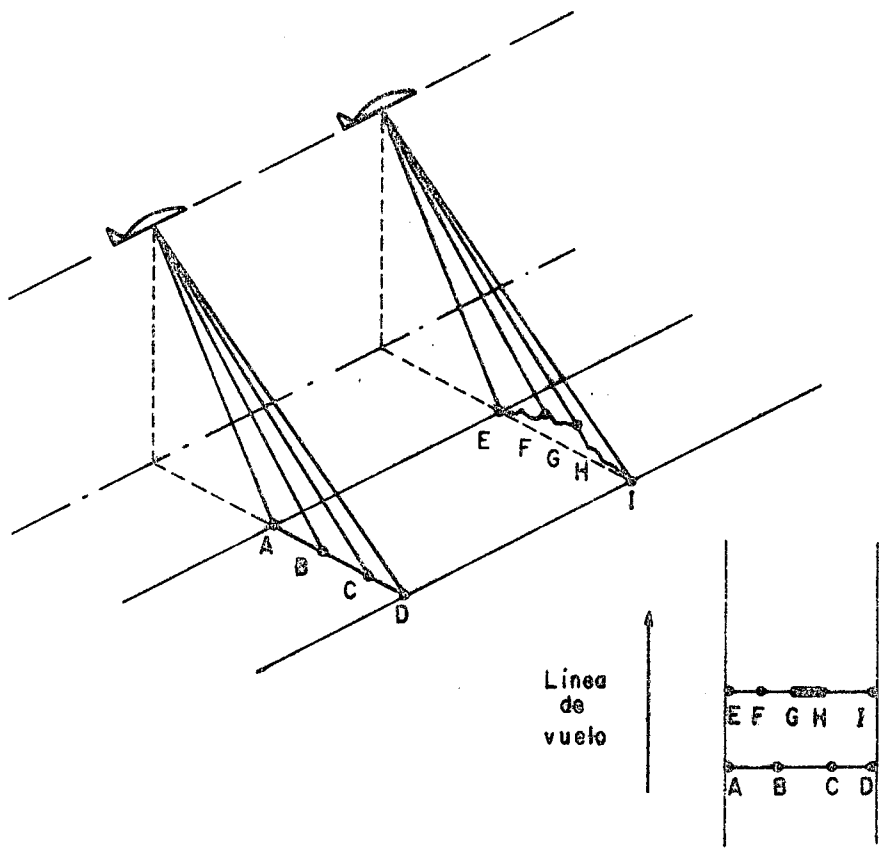


Fig.8 - Principio de la formación de imágenes SLAR

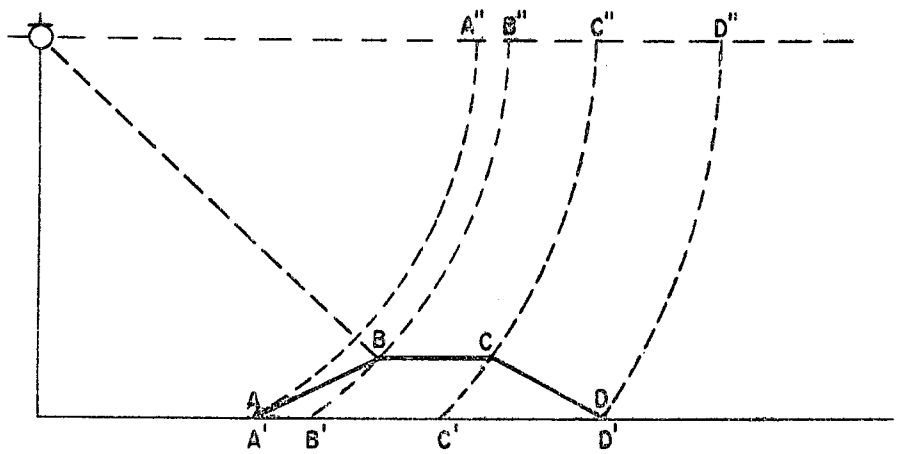
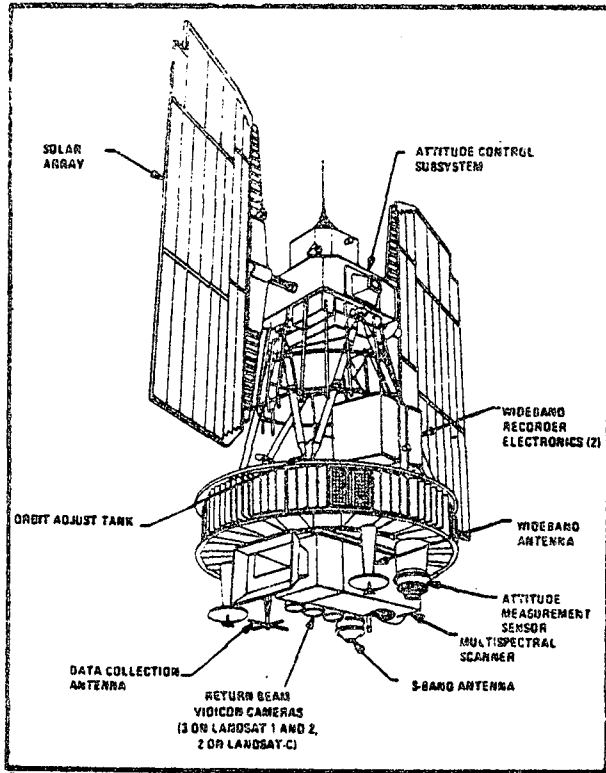
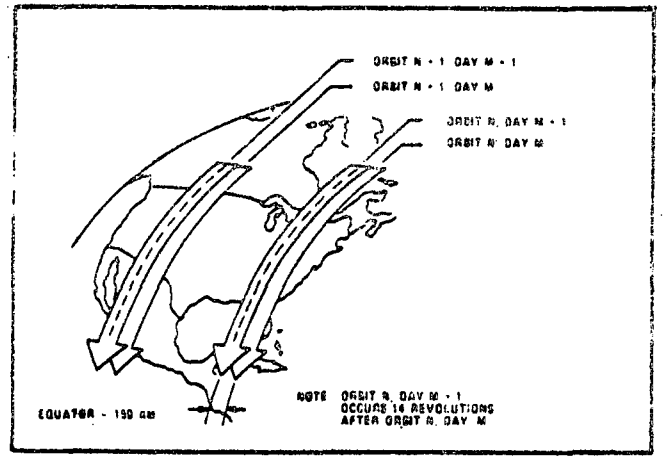


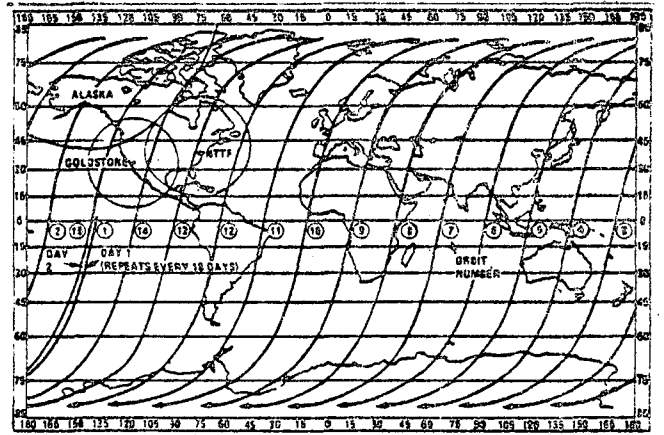
Fig. 9 - Escorzo (Radar)



a



b



c

Fig. 10- a) Satélite, b) Coberturas de órbitas, c) Pasaje diario del satélite Landsat

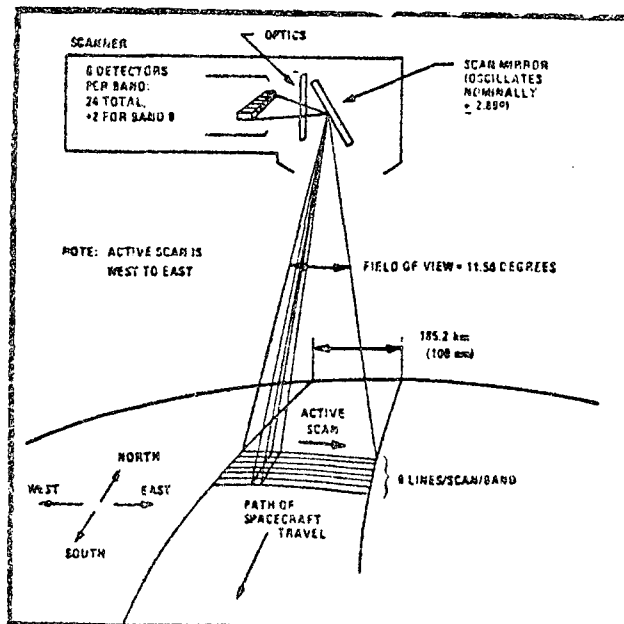


Fig. 11- Sistema de barrido del sensor MSS



W106-001

W105-301

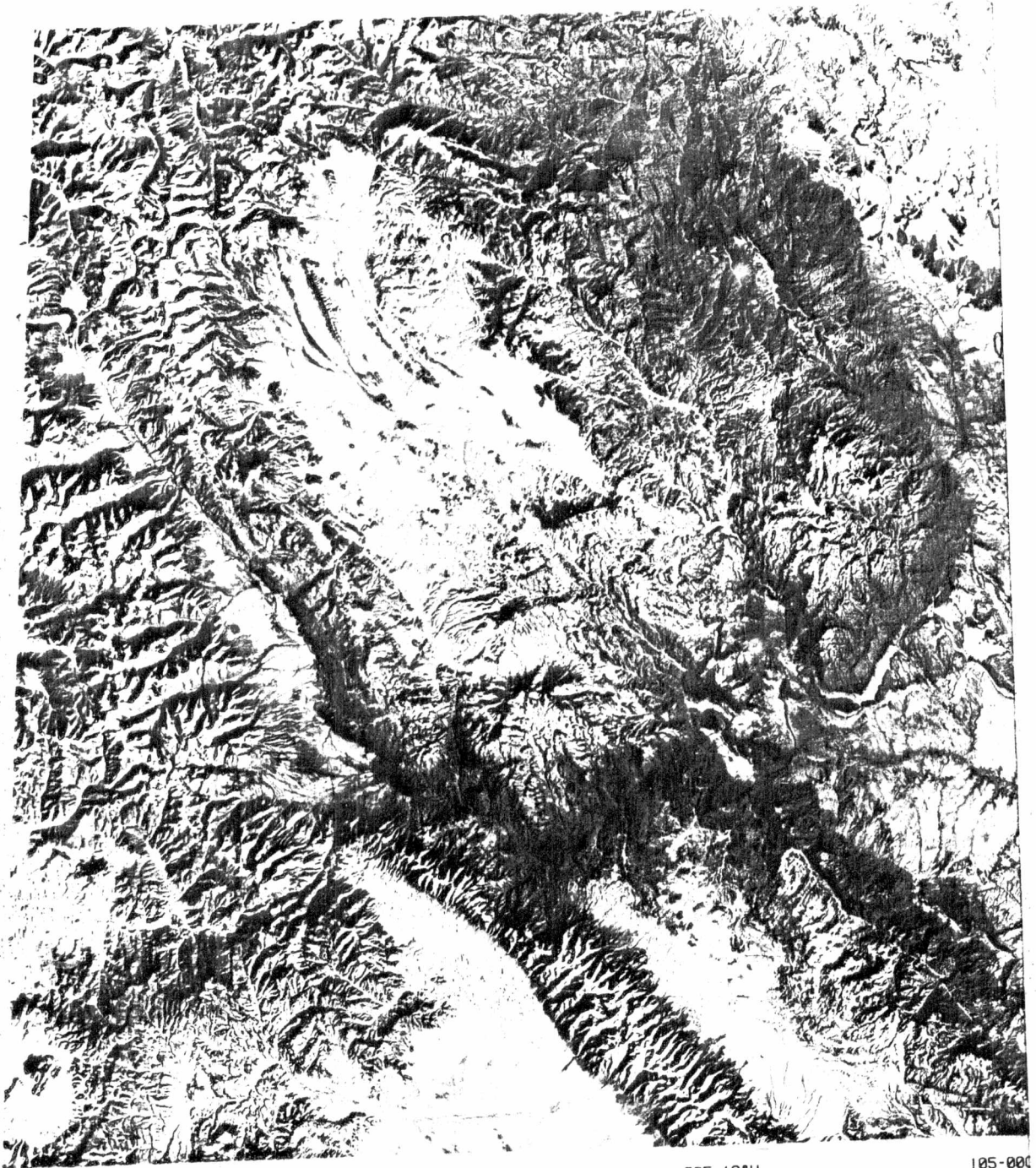
W105-001

IN039-30

100 : 0000 Z

100 : 0000 Z

100 : 0000 Z



11 JAN 73 C N38-44/W105-31 N N38-43/W105-26 MSS

N038-001

W106-001

7 D SUN EL23 AZ150 191-2398-G-1-N-D-1L NASA ERTS E-1

305-12°W

105-000

W106-30

W106-001

W105-301

W105-000



Fig. 12a - Imagen Landsat (Banda 7)
Escala 1:1.000.000

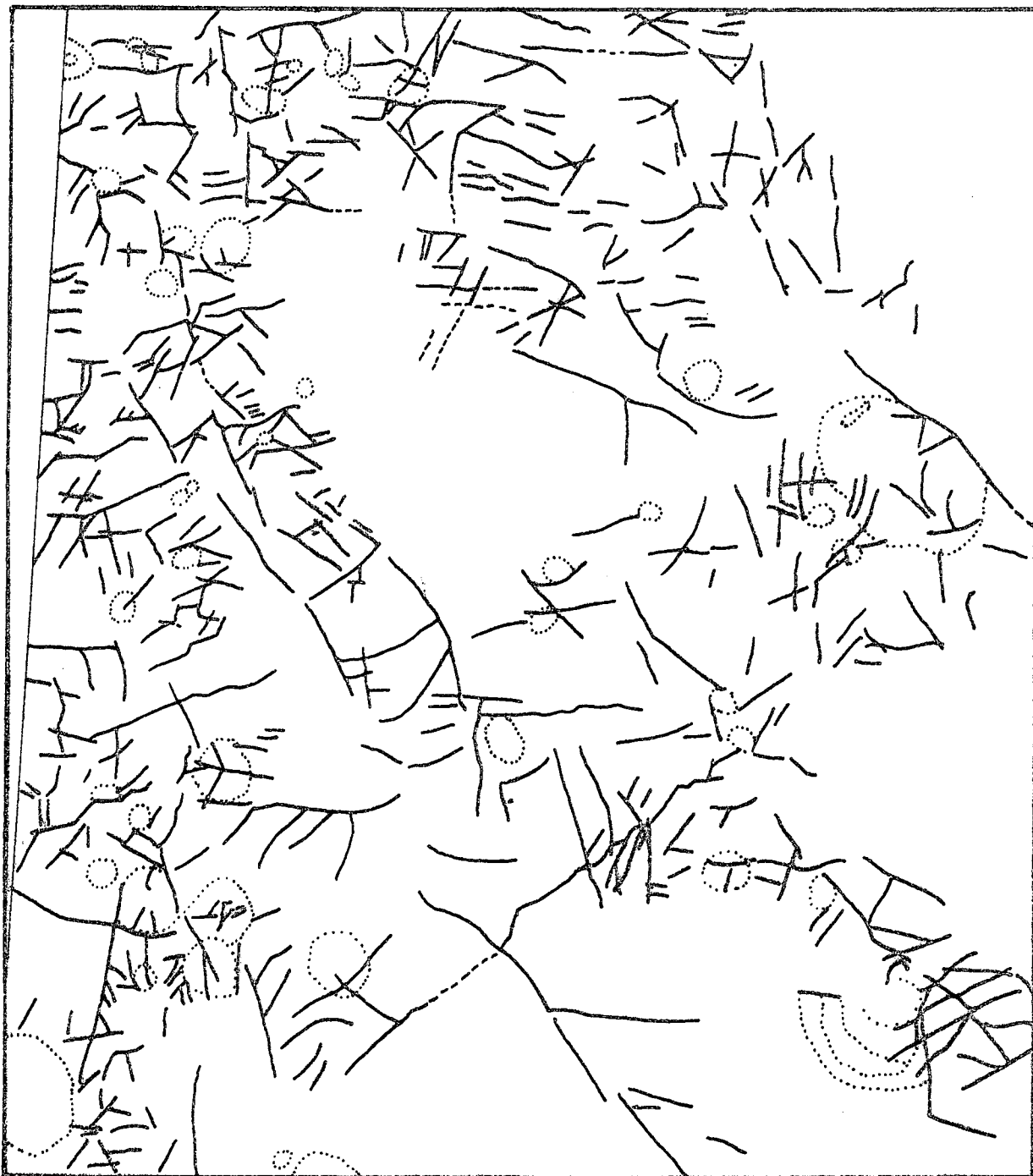


Fig 12b- Interpretación de lineamientos y estructuras circulares
Escala 1:1.000.000

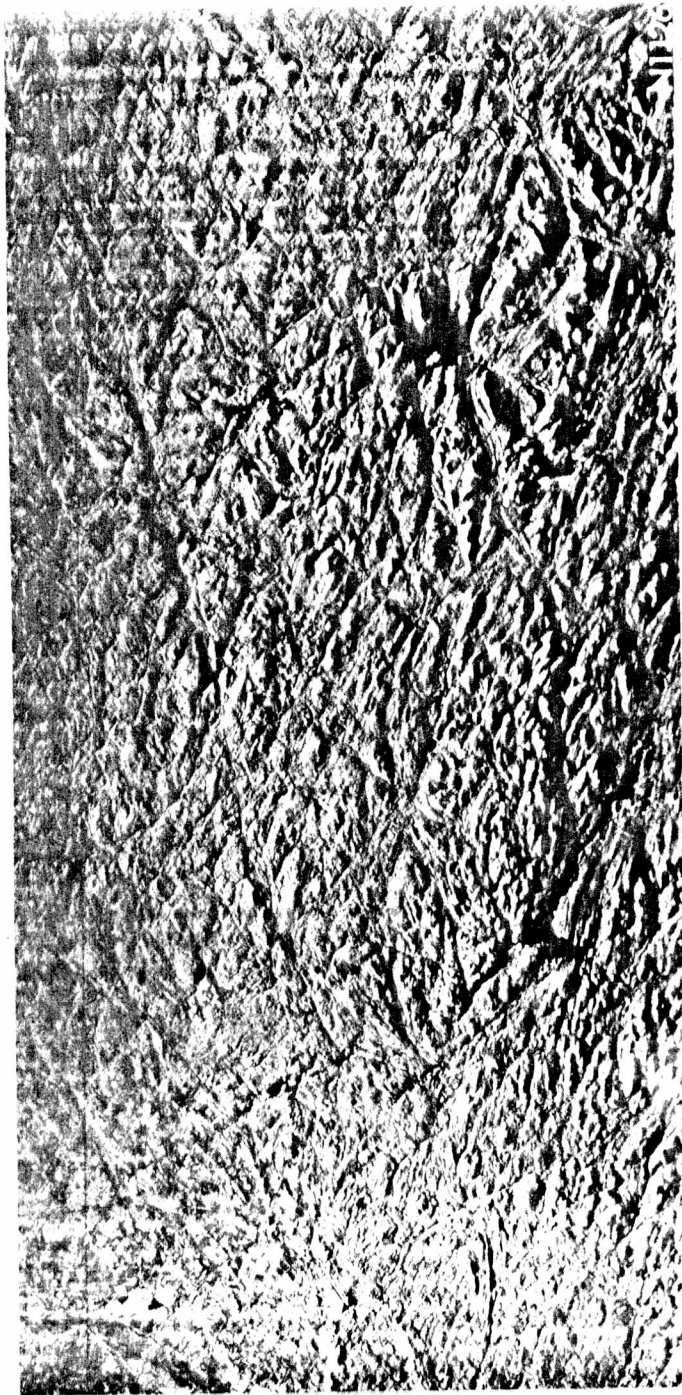


Fig. 13-- Imagen de radar SLAR (Good Year Aerospace Co.)

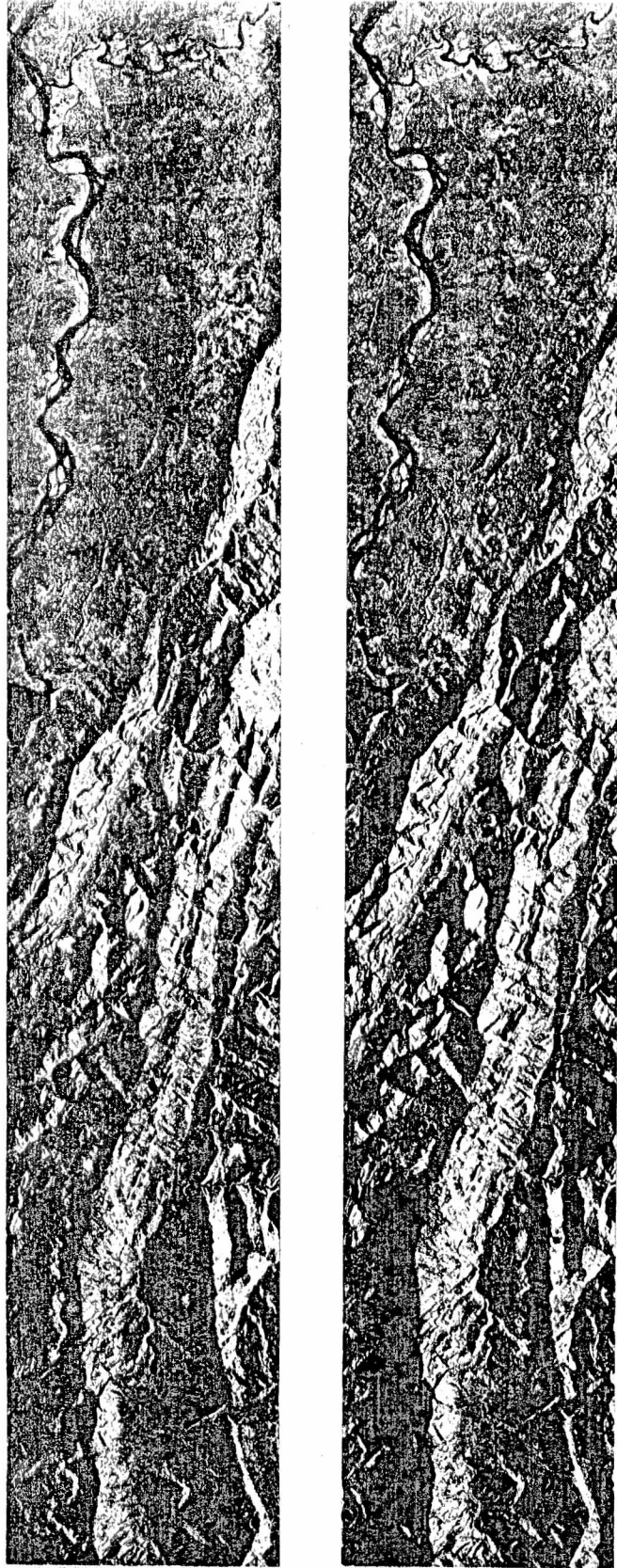


Fig.14 - Estereo modelo de imágenes radar (Good Year Aerospace Co.)