

Capítulo 4

Tipos de haces

El haz es una forma tridimensional que representa la radiación emitida desde la antena del satélite y su intersección con la superficie terrestre, ya sea para régimen de transmisión o recepción. El tipo de haz depende del ancho haz, del tipo de antena y de la geometría de la antena. Con diferentes tipos de haz se tendrán diferentes coberturas, es decir, la huella del satélite cubrirá diferentes extensiones territoriales. Se cumple las siguientes relaciones:

- Un haz estrecho significa: mayor ganancia, menor ancho de haz, menor huella o *footprint*.
- Un haz ancho significa menor ganancia, mayor ancho de haz, mayor huella.

Un satélite puede tener diferentes haces, de distintos tipos y en diferentes bandas, dependiendo de las necesidades. A continuación se describirán los tipos de haces radiados desde el satélite y su cobertura.

La cobertura de un satélite es la extensión territorial que en un instante tiene garantizados los servicios de comunicación por satélite y depende principalmente de las características de la antena, de la órbita del satélite además de la densidad poblacional o forma geográfica de la zona que se desea cubrir con el patrón de radiación de la antena en el satélite. La cobertura se mide con la relación de ganancia de la antena y la temperatura de ruido proveniente de cada lugar. Se pueden tener constelaciones de satélites y ampliar la cobertura, sin embargo, se analizará el caso de un satélite individual.

4.1 Global

Para tener una cobertura global se utiliza un ancho de haz relativamente grande que implica una ganancia menor. Para el caso de un satélite geoestacionario se requiere de: $\theta_{3dB}=17.4^\circ$ y $G_{max}=20$ [dBi].

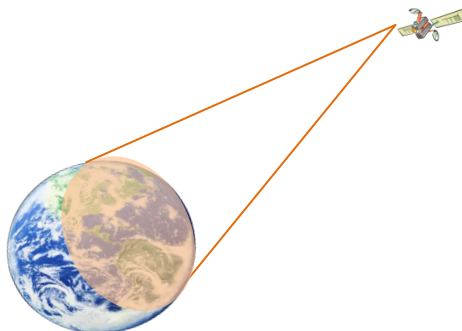


Figura 4.1 Haz global.

Una antena corneta piramidal o cónica es capaz de tener este tipo de haz desde un satélite geosíncrono. El ancho de haz requerido se determina de la siguiente manera:

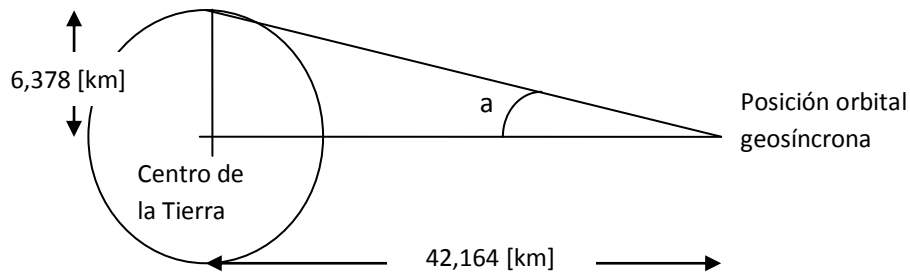


Figura 4.2 Ancho de haz para cobertura global.

De la Figura 4.2 se tiene que:

$$\theta_{3dB} = 2 \cdot a$$

$$a = \text{angtan} \left(\frac{6,378}{42,164} \right)$$

$$\theta_{3dB} = 2 \cdot 8.6 = 17.2^\circ \text{ }^1$$

Para el tamaño de la antena se tiene que:

$$\theta_{3dB} = 70 \frac{\lambda}{D}$$

$$17.2 = 70 \frac{\lambda}{D}$$

$$\frac{\lambda}{D} = 0.25$$

Entonces el tamaño de la antena debe ser aproximadamente cuatro veces mayor que la longitud de onda.

Las ventajas de este haz es que las estaciones se pueden encontrar en cualquier lugar. Puede haber zonas donde no se genera tráfico como en los océanos, recordando que la mayoría de la superficie del planeta es agua.

Fijando la posición del satélite, se puede interpretar a este tipo de haz como el límite superior de ancho de haz, ya que un ancho de haz mayor sobrepasaría la superficie de la Tierra. Anchos de haces menores a 17.5° tendrán haces más delgados como se verá a continuación. Lograr este haz no es tan complicado ya que no se requieren reflectores u otra tecnología como se vio en las

¹ Varía para otros autores.

alternativas para las antenas, como consecuencia, el precio de un sistema con este tipo de haz es barato ya que no implica mucha masa.

Este tipo de haz funciona para aplicaciones de difusión de televisión, servicios fijos. Tener línea de vista con un satélite que use este haz se dificulta para latitudes mayores a los 70° Norte y Sur. El ángulo de elevación para locaciones cercanas al ecuador es aproximadamente 90°, mientras que para locaciones cercanas a los polos, el ángulo de elevación tiende a cero y las estaciones en estos lugares están más expuestas a interferencias y reflexiones de la señal en el suelo.

Su cobertura.

Para el caso de cobertura global, a excepción de los polos o lugares de alta latitud, se necesitan ancho de haz de aproximadamente 17° y 2 ó 3 satélites geoestacionarios.

Para satélites de órbita baja, LEO, se requiere una constelación de aproximadamente 12, 24, 66² o más y se tiene cobertura en los polos.

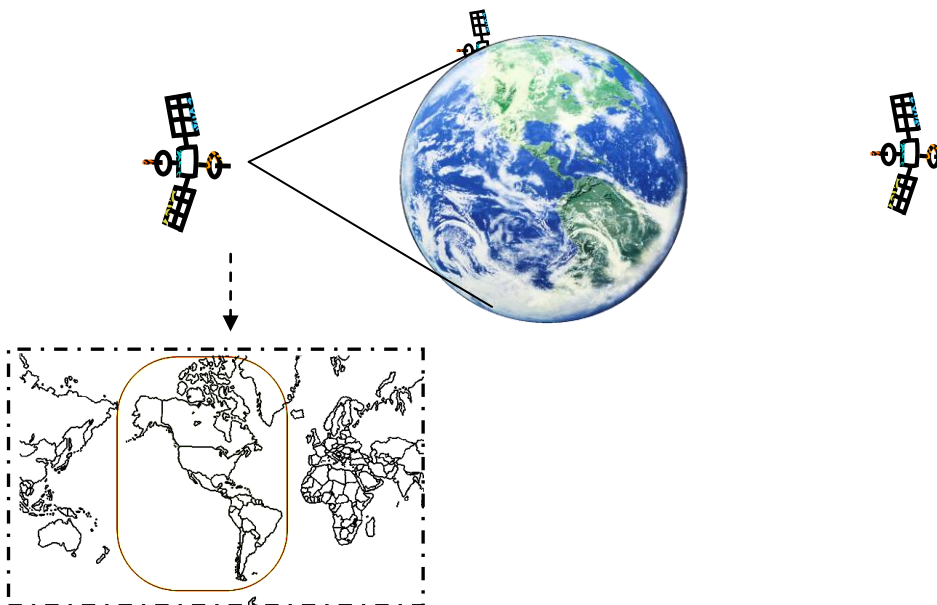


Figura 4.3 Cobertura global para satélites GEO.

Para el caso de satélites GEO, en este tipo de cobertura, se tendrá el centro de cobertura, el cual es un punto de referencia, apuntando al centro de la Tierra. El área abarca una tercera parte o un hemisferio del planeta.

² Ippolito, 2008.

4.2 Píncel

Este haz requiere de alta ganancia en la antena, es decir alta directividad (área grande del reflector) y como consecuencia un ancho de haz pequeño. Por lo que se requieren de antenas con reflectores. Sus parámetros pueden variar según: $\theta_{3dB} \leq 1 \dots 10^\circ$ y $G_{max} \geq 25$ [dBi].

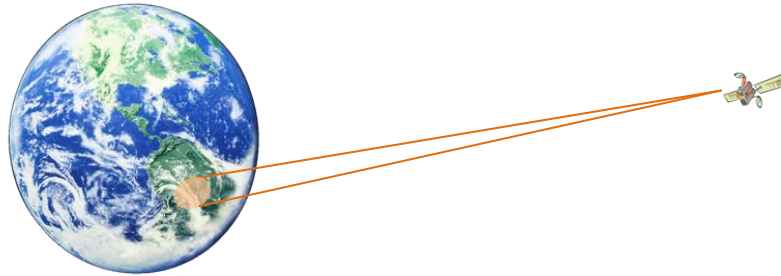


Figura 4.4 Haz píncel.

El apuntamiento del satélite geoestacionario hacia las estaciones terrenas requiere del cálculo de los ángulos de azimut y elevación del satélite para determinar el centro de cobertura, definidos como³:

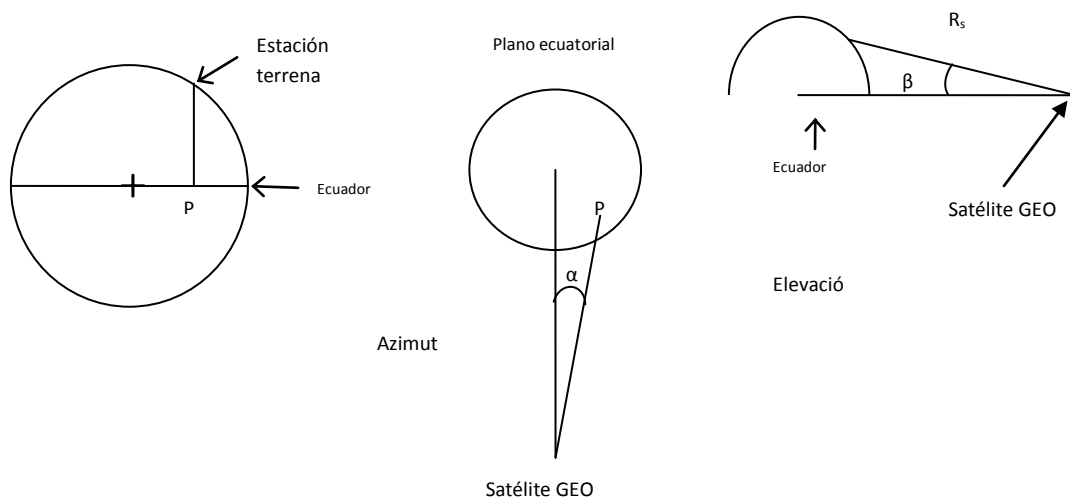


Figura 4.5 Azimut y elevación del satélite.

En la Figura 4.5 se aprecia que el punto P es la proyección de la localización de la estación terrena, donde se encuentra el centro de cobertura, en el plano ecuatorial. El ángulo de azimut está formado entre la línea que va del centro de

³ Maral 2009

la Tierra hacia el satélite y la línea proyectada de la línea de vista del satélite y se calcula de la siguiente manera:

$$\alpha = \text{angtan} \frac{R_E \cos l \sin \Delta L}{R_0 + R_E(1 - \cos l \cos \Delta L)}$$

El ángulo de elevación es el formado por la línea que va del centro de la Tierra y la línea de vista del satélite, se calcula de la siguiente manera:

$$\beta = \text{angtan} \frac{R_E \sin l \sin \alpha}{R_0 + R_E(1 - \cos l \cos \Delta L)}$$

Donde:

l : latitud de la estación terrena

ΔL : valor absoluto de la diferencia de longitudes de la estación terrena y el satélite

$R_e = 6,378$ [km] : radio de la Tierra

$R_0 = 35,786$ [km]: altura del satélite geoestacionario

Además se puede calcular la distancia entre el satélite y la estación de la siguiente forma⁴:

$$R_s = \sqrt{R_0^2 + 2R_E(R_E + R_0)(1 - \cos l \cos \Delta L)}$$

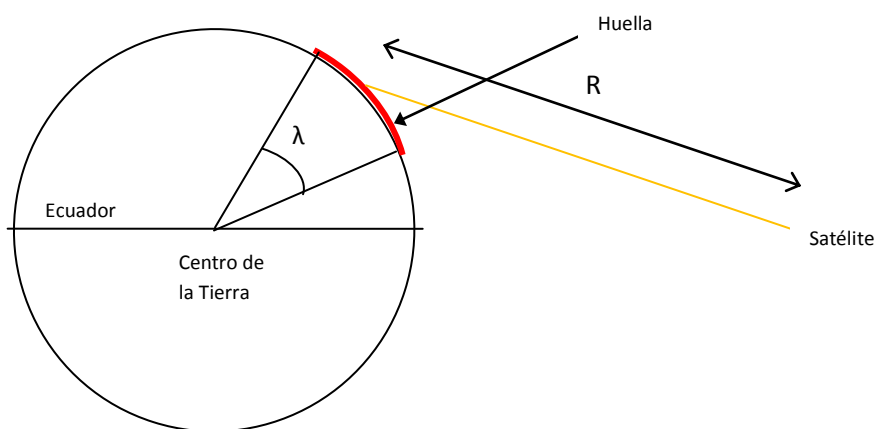


Figura 4.6 Tamaño de la huella.

⁴ Larson, 2005

La longitud en kilómetros de la huella se expresa como⁵:

$$L_F = 111.319\ 543 \cdot \lambda$$

El ángulo λ se forma por la diferencia de latitudes de los puntos más lejanos

Se pueden tener pinceles circulares cuyo patrón de radiación proyectado en la superficie de la Tierra sea una circunferencia, pinceles elípticos, o moldeados, es decir, que el patrón de radiación se acople a la forma geográfica donde se esté dando cobertura. También se pueden generar pinceles separados, sin desperdiciar potencia en zonas donde no se requiera huella del satélite. Usar este tipo de haces implica un costo alto debido al uso de grandes reflectores que incrementan la carga útil y el precio de lanzamiento. Sin embargo, sus ventajas deben ofrecer una cobertura del costo.

Su cobertura.

La cobertura es limitada a determinada región geográfica menor que la global, es decir, un país o grupo de países, regiones con el mismo idioma, extensión territorial, etcétera. El área de la región es menor a un tercio de la superficie terrestre y el centro de cobertura es donde apunta el eje del haz principal.

Variando las ganancias de un haz tipo pincel se obtienen distintas coberturas: Ancho de haz de 8° y ganancia de 26.2 [dBi] puede cubrir la zona Norte del continente americano, con 1.6° de ancho de haz y ganancia de 40.2 [dBi] se cubren estados, y para zonas metropolitanas en especial se debe lograr un ancho de haz de 0.5° y 50.3 [dBi] de ganancia⁶.



Figura 4.7 Cobertura regional vista del satélite.

La cobertura regional se hace más eficiente usando antenas que formen un haz que coincida con el contorno geográfico.

⁵ Ibídem.

⁶ Ippolito, 2008.

Cobertura puntual

Este tipo de cobertura se refiere a un área geográfica muy pequeña, como una ciudad, requiere de un haz muy delgado y alta ganancia. La estación terrena tiene más riesgo de tener pérdidas por mal apuntamiento.

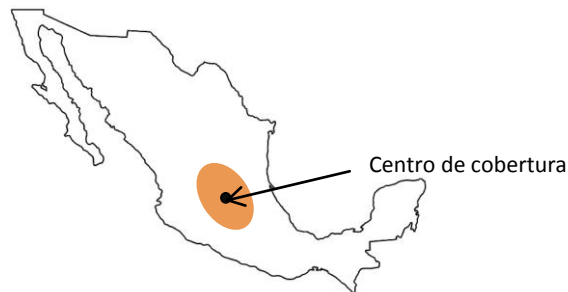


Figura 4.8 Cobertura puntual vista del satélite.

4.3 Haz moldeado

Dado que los límites geográficos, entre mar y tierra por ejemplo, son formas irregulares, es decir, no se acoplan con un haz circular o elíptico. Un haz que se ajusta a los límites geográficos de una región se debe a que el patrón de radiación es moldeado para ajustar los niveles de potencia al lugar de cobertura. Esto tiene ventajas como no desperdiciar potencia en zonas donde no se necesita el servicio de telecomunicaciones. El patrón moldeado se forma tanto para régimen de transmisión, como para recepción. El diseño de antenas con este haz requiere de simulaciones por computadora de prueba y error hasta lograr un patrón que cubra la región deseada y de máquinas especiales que las fabriquen.

Utilizando las alternativas mencionadas en la sección de antenas para el satélite como reflectores perfilados, múltiples alimentadores o antenas *reflect array*. Se puede lograr un solo haz que se acople a un territorio geográfico con un solo alimentador, sin embargo una cobertura moldeada también se puede lograr con múltiples haces.

Cobertura

Las extensiones territoriales pueden ser desde continentes hasta países. Su cobertura es más eficiente porque la potencia radiada sólo llega a destinos donde es requerida. Se pueden definir varias zonas de acuerdo a los idiomas, por ejemplo para diferentes contenidos de TV, zonas limitadas por divisiones políticas o geográficas, por ejemplo, Oceanía es una gran extensión de territorio rodeada por el mar y algunas aplicaciones no requieren ser transmitidas al océano, además se pueden tener zonas clasificadas por

densidades poblacionales, por ejemplo, zonas desérticas que no requieren un enlace de datos.

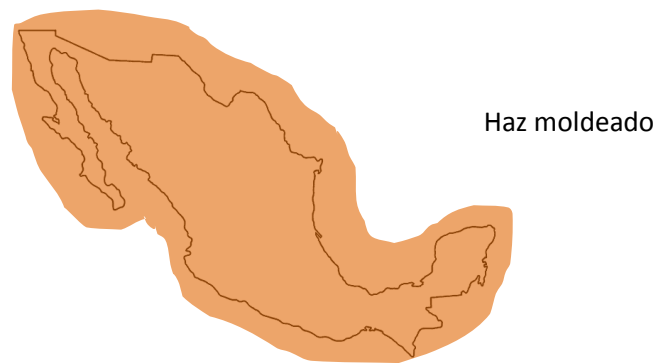


Figura 4.9 Cobertura regional.

Una desventaja del haz moldeado usando una antena de reflector perfilado es que en los lugares cercanos al borde de la cobertura, se necesita transmitir con mayor potencia y se recibe menos. En ese aspecto, el haz moldeado no tiene una ventaja notable sobre un haz de cobertura regional, más que el tipo de antena implica un ahorro en la carga útil del satélite. Sin embargo se puede optar por el uso de múltiples alimentadores para contrarrestar esta desventaja.

4.4 Múltiples haces

Un satélite puede tener varios haces pincel, usando varios alimentadores, para cubrir áreas separadas o la misma área con varios haces. Para un sistema simple de un repetidor son necesarios, como mínimo, dos haces; uno para el enlace de subida y otro para el enlace de bajada. Hay dos configuraciones posibles para usar múltiples haces, la primera es que cada haz, transmisión-recepción, es un enlace independiente o la segunda es que haya interconexión entre satélites, es decir se requieren haces que no apunten a la Tierra, sino, a otros satélites. Para lograr esto se es necesario usar múltiples alimentadores para un reflector.

Se trata de diferentes haces pincel o moldeados para cubrir zonas que respecto a la densidad poblacional no conviene usar un solo haz, además se tiene reutilización de frecuencias. Se pueden tener múltiples haces separados o contiguos, que se traslapan, para cubrir eficazmente una región o tener una red tipo celular. Se pueden usar distintas bandas de frecuencias y polarizaciones; con haces contiguos se tiene mejor cobertura en los puntos cercanos a los bordes de la huella a diferencia de un solo haz.

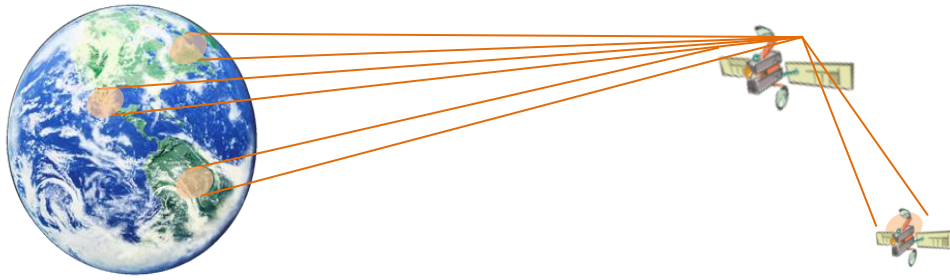


Figura 4.10 Múltiples haces.

Un fenómeno indeseado, es la interferencia entre haces, esto por uso de la misma densidad espectral de potencia para enlaces de bajada de diferentes haces o interferencia cocanal (CCI, *Co Channel Interference*). Además existe la interferencia de canal adyacente (ACI, *Adjacent Channel Interference*), esto quiere decir que la densidad espectral de un canal se alcanza a traslapar con la de otro canal, este traslape se considera ruido y afecta la capacidad del sistema.

Su cobertura.

El área puede variar dependiendo de la ganancia de los haces. Para el caso de varios haces separados, su cobertura es puntual para cada haz, es decir, de ciudades y que en conjunto se tiene una cobertura amplia. Para el caso de múltiples haces juntos, se puede tener una cobertura regional que comprenda ciudades o países. Es necesario que haya interconexión de haces a bordo del satélite.

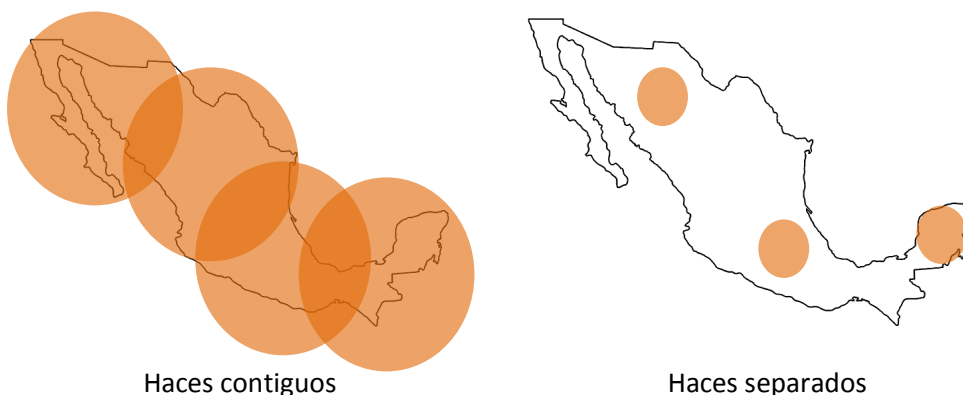


Figura 4.11 Múltiples haces.

Con los enlaces entre satélites, la cobertura se amplía, ya que se comunicarán estaciones que están fuera de la huella de un haz con las de otro.

Para el caso de utilizar haces que se traslapen, se tienen diferentes parámetros para lograr un punto eficiente, este punto eficiente significa un equilibrio entre el costo del sistema y su eficiencia donde el peso del equipo, dimensiones, cantidad de alimentadores.

El precio de tener varios alimentadores debe ser compensado con el ahorro y aprovechamiento del espectro usado. Además, utilizar múltiples haces implica ahorro en las estaciones terrenas al requerir un PIRE menor que en el caso de un solo haz, esto significa antenas no tan grandes y menos uso de energía eléctrica. Recordando que en la estación terrena es donde se pueden modificar los parámetros cuando el sistema ya está en funcionamiento. La reutilización de frecuencias permite mayor capacidad, más usuarios y mayores ingresos.

Como conclusión tenemos que la inversión en la carga útil del satélite se convierte en un ahorro en el segmento terrestre.

4.5 Haces de escaneo y haces ortogonalmente polarizados

Si se tienen varios haces, se pueden mover mecánicamente o electrónicamente variar el campo radiado y tener así un barrido geográfico con haces pincel de ganancia mayor a 20 [dBi].

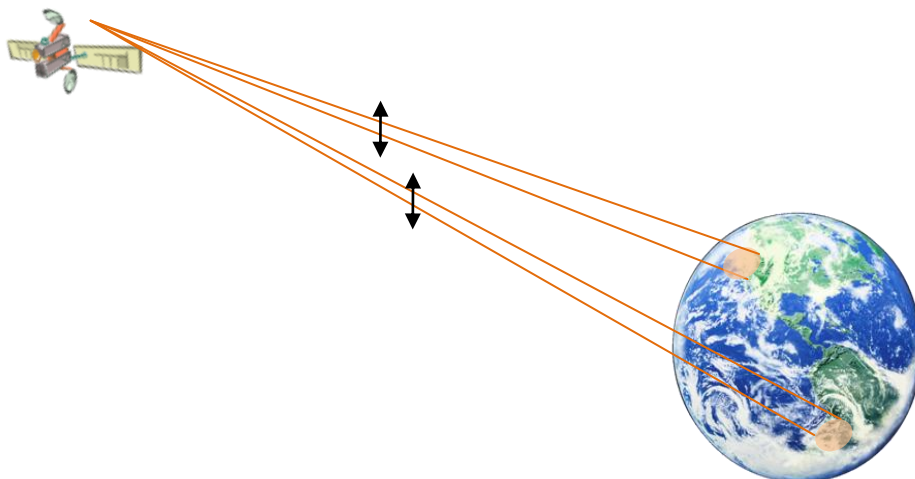


Figura 4.12 Haces de escaneo.

La cobertura de haces de escaneo puede ser mayor a la de un haz fijo, ya que la cobertura puede ser cíclica en un zona grande, sin embargo, la cobertura no se da todo el tiempo.

Cuando se transmite con polarización vertical y la antena receptora tiene polarización horizontal (o viceversa) no habrá comunicación debido al desfase de las componentes del campo eléctrico, esto permite reutilización de

frecuencias ya que dos haces pueden cubrir la misma zona y la interferencia no afectará.

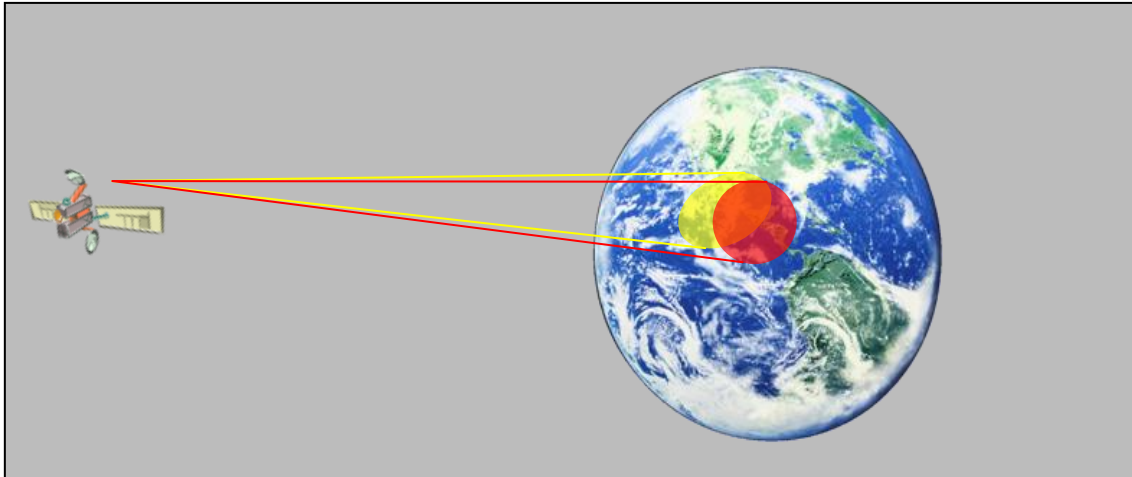
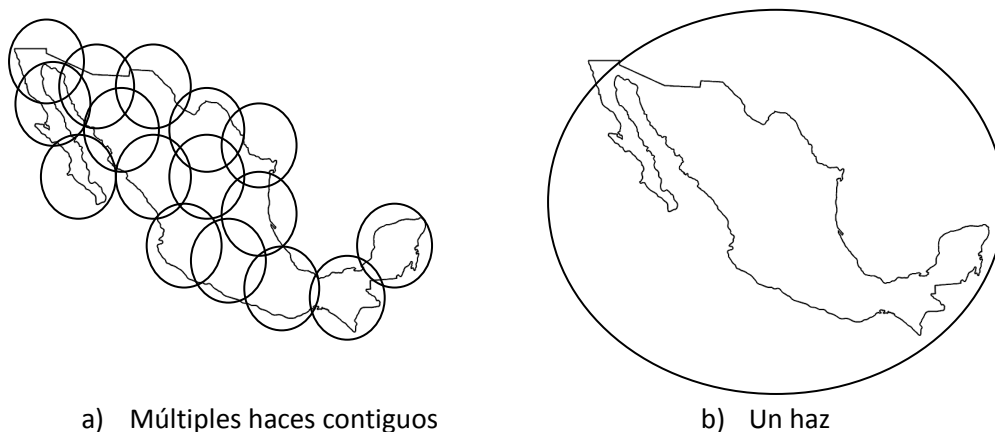


Figura 4.13 Haces ortogonalmente polarizados.

Esta propiedad, puede ser aprovechada para que el enlace de subida y bajada usen la misma frecuencia, esto significa usar eficazmente el ancho de banda, cuyo costo es elevado.

4.6 Ventajas y desventajas de múltiples haces

Las dos configuraciones a comparar son el uso de un haz individual y el uso de múltiples haces. El haz global, haces de escaneo u ortogonalmente polarizados son casos especiales de aplicaciones específicas y/o propiedades que pueden ser tomadas en cualquier sistema de comunicaciones vía satélite. Por lo tanto la disyuntiva que presenta la cobertura de una región es, básicamente, la elección de un haz o varios haces contiguos.



a) Múltiples haces contiguos

b) Un haz

Figura 4.14 Opciones de cobertura.

En la teoría y en la práctica, el uso de múltiples haces tiene mayores ventajas, puede haber aplicaciones que no necesiten de estas. Estas ventajas y desventajas del uso de múltiples haces o un solo haz se aprecian en el desempeño del enlace vía satélite. Esta comparación se hará mediante simulaciones que hagan ver los cambios en los parámetros del enlace satelital en una región. A continuación se presenta una comparación basada en la investigación bibliográfica⁷.

Tabla 4. 1 Múltiples haces.

Múltiples haces contiguos	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Mayor ganancia. • Economía: costo del segmento terrestre. • Reutilización espacial en coberturas separadas. • Con haces pincel juntos logra la función de un haz global o regional. • Mayor capacidad de la red sin incrementar ancho de banda. • Mayor tasa de datos más altas usando multiplexaje por división de tiempo usando menor potencia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Interferencia entre haces limita la potencia. • Necesidad de antenas grandes en la estación terrena. • Dispositivos cuyo diseño es complejo.

Tabla 4.2 Haz individual.

Un haz	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Diseño simple. • Enlaces largos. • Ahorro en carga útil 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad limitada sin reutilización espacial o de frecuencias. • Calidad reducida a zonas dispersas.

⁷ Maral, 2009

De acuerdo a un análisis, resultado de investigación bibliográfica, se tienen ventajas significantes para los satélites con múltiples haces. Se elige entonces como la opción más viable para tener enlaces vía satélite. Estas ventajas se justificaron con simulaciones hechas en software especializado.