

Capítulo 3. Medición de la altura de los árboles

La importancia de la medición de la altura de los árboles radica en el hecho de que con esta variable, junto con el diámetro normal, es posible estimar otras importantes variables del árbol individual y, por extensión, también de la masa, como el volumen de madera, el volumen de leñas o la biomasa. Además, la altura de los pies que constituyen el estrato dominante de una masa (pies que forman el nivel superior de las copas) se emplea para la asignación de la capacidad productiva o calidad de estación del terreno en que se asienta.

La altura de los árboles también se emplea, entre otras cosas, para:

- Obtener la curva de alturas de la masa, que relaciona la altura de un árbol con su diámetro normal ($h = f(d)$).
- Calcular diversos parámetros de forma que son indicadores de la estabilidad mecánica del árbol (coeficiente de esbeltez, razón de copa viva, etc.).
- Clasificar, en selvicultura, los pies de una masa regular por su jerarquía o estatus sociológico.

3.1. VARIABLES DE ALTURA DEL ÁRBOL

La altura total de un árbol en pie (h) se define como la distancia, medida sobre el eje del árbol, que existe entre la zona de la base del mismo que está en contacto con el terreno y su ápice (ver Fig. 3.1). Se entiende por ápice del árbol la parte más alta de la copa en prolongación del eje del tronco. En el caso de árboles de ramificación monopódica o verticilada (típicas de la mayor parte de las coníferas), la altura total coincide con la longitud del tronco cuando éste es recto y mantiene un contacto desde la base del árbol en contacto con la parte superior de la ladera.

Aunque lo más frecuente es medir la altura total de un árbol, existen otras alturas denominadas alturas de referencia (Dale, 2000), que también se utilizan habitualmente para, por ejemplo, estimar el volumen, evaluar el efecto de la competencia de los árboles próximos, conocer la oportunidad de una corta de mejora, etc. Las alturas de referencia que se miden con más frecuencia en los árboles son las siguientes:

- Altura del fuste o altura maderable hasta un determinado diámetro en punta delgada.
- Altura directriz de Pressler.
- Altura hasta la base de la copa viva.
- Altura hasta un punto significativo del árbol (punto de rotura, bifurcación, etc.).

En la Figura 3.1 se representan algunas de las alturas que se pueden medir en un árbol. La altura del fuste se define como la distancia, medida sobre el eje del árbol, que existe entre la zona de la base del mismo en contacto con el terreno (o con la parte superior de la ladera en terrenos en pendiente) y el punto más alto del tronco cuyo diámetro no es menor que el especificado comercialmente para un determinado uso (diámetro en punta delgada). Como diámetro en punta delgada que marca el aprovechamiento máximo del fuste frecuentemente se emplean 7 ó 10 cm (en el caso de madera de trituración), 15 ó 20 cm (madera de sierra) y 35 cm (desenrollo o chapa a la plana). En el caso de que a una cierta altura del tronco exista una gran ramificación o algún tipo de defecto que limite o impida su aprovechamiento a partir de ese punto, la altura de fuste será la distancia, medida sobre el eje del árbol, desde la base del mismo en contacto con el terreno hasta dicho punto, con las mismas consideraciones que se hicieron anteriormente sobre terrenos en pendiente. No obstante, puede haber ramas por encima de ese punto que tengan aprovechamiento comercial en una determinada longitud (ver Fig. 3.1).

A la altura de fuste así definida se le debe descontar la altura del tocón h_s , para obtener la altura maderable o comercial h_{co} , cuyo valor es desconocido cuando el árbol está en pie. Sin embargo, en algunos países se da un valor predeterminado para la altura del tocón; por ejemplo, en Alemania se establece como la tercera parte del valor del diámetro normal, en Estados Unidos se le asigna el valor de 1 pie (30,5 cm), y en otros casos se considera la centésima parte de la altura total del árbol, pero en general va a depender de cómo se realice la corta.

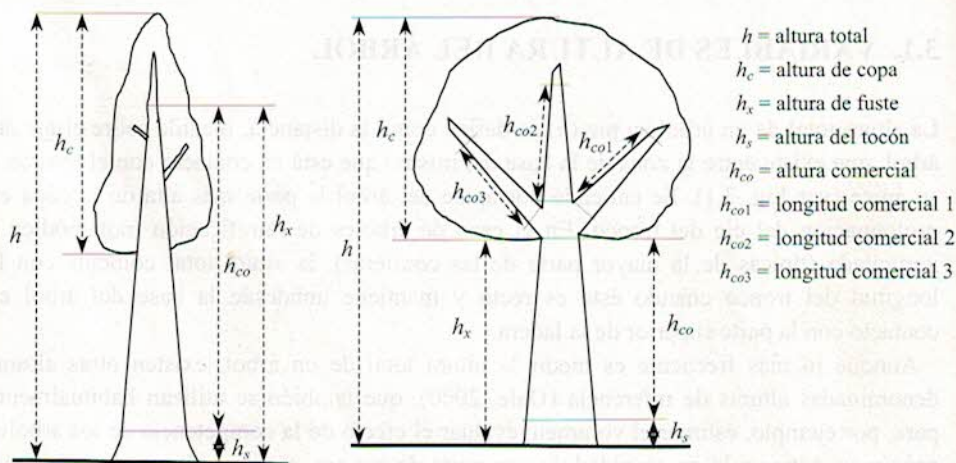


Figura 3.1. Distintas alturas que se pueden medir en un árbol. A la izquierda, ejemplo de un árbol con ramificación monopódica o verticilada. A la derecha, ejemplo de otro con ramificación simpódica o difusa.

En función del método de cubicación que se vaya a emplear puede ser necesario medir otra altura distinta de la altura total del árbol. Así, para la cubicación en pie de un árbol por el método de Pressler-Bitterlich (ver Apartado 8.1.8) es necesario medir la altura hasta el punto donde el diámetro sea exactamente la mitad del diámetro en la base, que se conoce como altura directriz de Pressler.

Por otra parte, la altura hasta la base de la copa viva (altura total menos la altura de la copa) proporciona una valiosa información sobre el pasado selvícola de un árbol, pudiéndose con ella sacar conclusiones sobre la competencia a la que ha estado sometido o sobre su capacidad de reacción ante la realización de una clara o de otro tratamiento.

En ciertas ocasiones puede ser necesario conocer la altura de algún punto singular del árbol, como la altura de bifurcación, la de rotura en el caso de árboles dañados por un temporal, etc.

3.1.1. Cómo medir la altura en casos especiales

Las consideraciones que se indican a continuación son válidas para las distintas alturas a medir en el árbol a lo largo del tronco, aunque en las figuras siguientes se hace referencia siempre a la altura total del árbol, por ser ésta la variable de altura que se mide con mayor frecuencia en los inventarios forestales.

Árboles bifurcados

En la medición de la altura de árboles bifurcados se pueden dar dos casos generales, dependiendo de si la bifurcación se produce por encima o por debajo de la altura normal.

Cuando la bifurcación se produce por encima de la altura normal (1,30 m) el árbol se considera, a efectos de inventario, como un solo individuo (ver Apartado 2.1.5), por lo que se medirá únicamente la altura de la rama principal, tal y como se observa en la Figura 3.2 (izquierda).

Por otra parte, en el caso de árboles bifurcados por debajo de la altura normal, cada rama o tallo que sale de la bifurcación se considera, a efectos de inventario, como un árbol diferente, por lo que se medirá la altura de las dos ramas o tallos, como se observa en la Figura 3.2 (derecha).

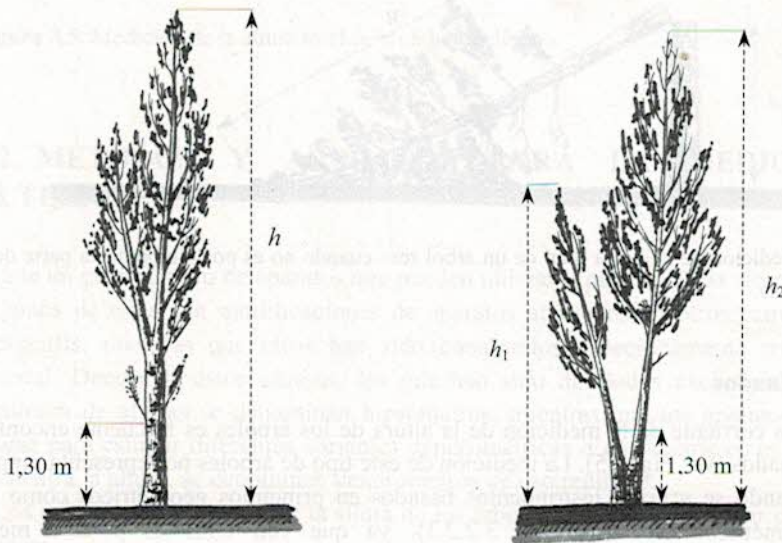


Figura 3.2. Medición de la altura en árboles bifurcados. A la izquierda, árbol bifurcado por encima de la altura normal. A la derecha, árbol bifurcado por debajo de la altura normal.

Árboles rotos

En la medición de la altura en árboles rotos se pueden dar también dos casos, según como se presente la parte rota: caída completamente sobre el suelo o enganchada sobre la parte del tronco que permanece en pie.

En árboles con la parte rota completamente caída sobre el suelo (Fig. 3.3), la altura se estima realizando dos mediciones. Por un lado se mide la altura del tronco en pie (A), y por otro se mide la altura del tronco sobre el suelo (B). La altura total del árbol será la suma de las dos longitudes medidas, es decir, $h = A + B$.

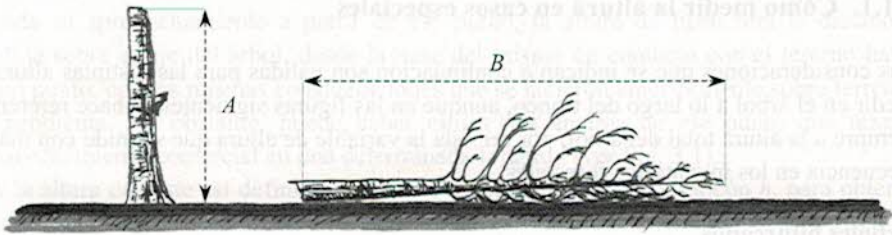


Figura 3.3. Medición de la altura total de un árbol roto con la parte caída completamente apoyada sobre el suelo.

En árboles rotos con la parte caída enganchada al tronco (Fig. 3.4), en los que no se puede medir directamente la longitud B , se mide la altura de la parte del tronco en pie (A) y posteriormente la distancia horizontal desde el tronco en pie hasta el ápice (C), siendo por tanto $B = \sqrt{A^2 + C^2}$. La altura total del árbol será, entonces, $h = A + B$.

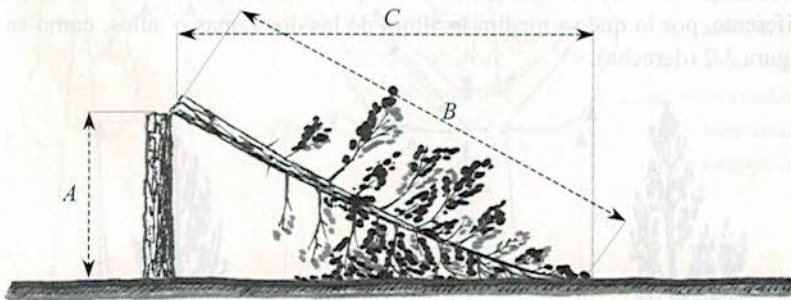


Figura 3.4. Medición de la altura total de un árbol roto cuando no es posible medir la parte de la copa enganchada.

Árboles inclinados

En la práctica corriente de la medición de la altura de los árboles es frecuente encontrar árboles inclinados (ver Fig. 3.5). La medición de este tipo de árboles no representa ningún problema cuando se utilizan instrumentos basados en principios geométricos como las reglas hipsométricas (ver Apartado 3.2.2.3), ya que con ellos es posible medir directamente la altura real h . En cambio, en el caso de emplear aparatos basados en principios trigonométricos (ver Apartado 3.2.2.4) o en impulsos ultrasónicos o láser (ver

Apartado 3.2.2.6), se debe tener en cuenta que con ellos se mide la altura vertical h' , por lo que si la pendiente de inclinación del árbol γ es superior a 5° será necesario corregir el valor de la altura proporcionada por el aparato h' para obtener la altura real del árbol h de la siguiente manera (ver Fig. 3.5):

$$h = \frac{h'}{\cos \gamma}$$

Por otra parte, para minimizar posibles errores, este tipo de árboles se deben medir desde un punto situado en un plano perpendicular al formado por el tronco y su proyección sobre el suelo (ver Apartado 3.4.3).

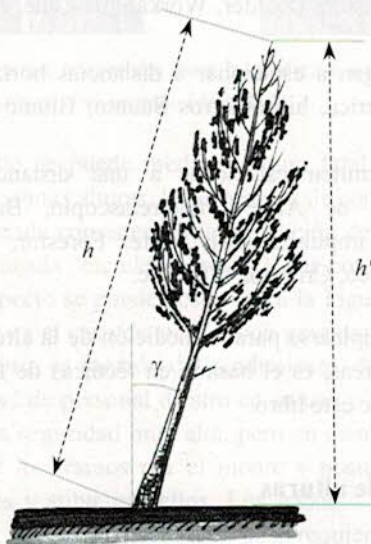


Figura 3.5. Medición de la altura total de un árbol inclinado.

3.2. MÉTODOS Y APARATOS PARA LA MEDICIÓN DE ALTURAS

Existe un gran número de aparatos que pueden utilizarse para medir la altura de un árbol. Algunos de ellos son modificaciones de aparatos utilizados en otros campos, como la topografía, mientras que otros han sido construidos específicamente para el trabajo forestal. Dentro de estos últimos, los que han sido diseñados exclusivamente para la medición de alturas se denominan hipsómetros, mientras que los aparatos que pueden usarse para estimar diferentes variables dendrométricas o dasométricas, entre las que se encuentra la altura, se denominan dendrómetros de uso múltiple.

Los métodos de medición de la altura de los árboles se pueden clasificar de la siguiente manera:

· Métodos directos: la medición no puede realizarse a distancia. Los procedimientos más habituales son la escalada del árbol y el empleo de jalones y pértigas telescópicas.

· Métodos indirectos: la medición se efectúa a distancia. Se pueden clasificar a su vez en seis categorías, en función del procedimiento de estimación de la altura en la que se basan los aparatos o métodos utilizados.

- Métodos elementales: método ocular, de la sombra arrojada, del espejo y del jalón de referencia.
- Aparatos que obligan a estacionar a una distancia igual a la altura del árbol: cruz del hachero.
- Aparatos que permiten estacionar a una distancia cualquiera desconocida: reglas hipsométricas (Christen, Daalder, Workampff-Laue, Jal y Lada) y dendrómetro de Kramer.
- Aparatos que obligan a estacionar a distancias horizontales predeterminadas: plancheta hipsométrica, hipsómetros Suunto, Blume-Leiss y Haga, relascopio de Bitterlich, etc.
- Aparatos que permiten estacionar a una distancia cualquiera conocida: clinómetros, nivel de Abney, tele-relascopio, Barr-Stroud, dendrómetros ultrasónicos o por impulsos láser (Vertex Forestor, Vertex III, Vertex Laser, LHP 1, Lem 300-Geo, Criterion 400), etc.

Otro método que puede emplearse para la medición de la altura de los árboles, cuando se dispone de fotografías aéreas, es el basado en técnicas de fotointerpretación, aunque este tema se sale del objeto de este libro.

3.2.1. Medición directa de alturas

Estos métodos precisan el contacto directo del aparato con el árbol para medir la altura. Son los métodos más exactos si se realizan correctamente y con aparatos de medición precisos. Los más utilizados son la escalada del árbol y el empleo de jalones y pértigas telescópicas.

Escalada del árbol

El procedimiento más común consiste en emplear escaleras ligeras de duraluminio, de dos o tres metros de longitud, que se acoplan unas a otras, y que se fijan firmemente al tronco mediante correas que lo rodean. El operario sube por la escalera provisto de un cinturón de seguridad y una cinta métrica de precisión hasta la máxima altura que permita instalar tramos de escalera sin riesgos (Fig. 3.6). La parte final del árbol se mide con una pértiga telescópica graduada.

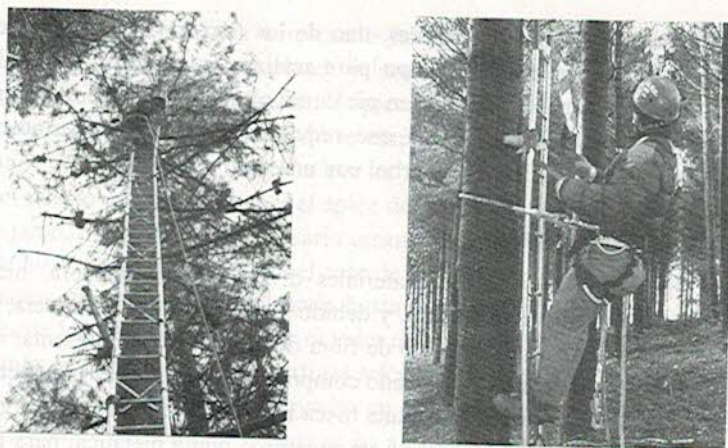


Figura 3.6. Escalera de tramos acoplables para la medición de árboles (izquierda) y detalle de equipo de seguridad necesario para su empleo (derecha).

Con este procedimiento se puede medir la altura total y la del fuste, así como los diámetros del tronco a distintas alturas, los espesores de corteza y los crecimientos.

Otros métodos de escalada consisten en la utilización de ganchos, estribos, equipos de alpinismo o de la denominada "bicicleta forestal", que consiste en pedales con garfios en manos y pies, y cuyo aspecto se puede observar en la Figura 3.7. La utilización de todos estos métodos es posible en el caso de árboles con gran parte del fuste limpio de ramas, y la elección entre uno u otro es función del rendimiento, de las condiciones de acceso al árbol, de la disponibilidad de personal diestro en su uso y de la seguridad. Las escaleras, por ejemplo, ofrecen una seguridad muy alta, pero en cambio tienen el inconveniente de que hay que transportar los tramos por el monte y posteriormente se requiere tiempo adicional para instalarlos y subir por ellos. Los ganchos tienen a su favor la ligereza, facilidad de transporte y rapidez de ascensión, pero requieren el dominio de la técnica de hincado de los mismos en el tronco. Además, causan daños al árbol y son menos seguros que el uso de escaleras (Notivol y Alía, 1992).



Figura 3.7. Aspecto de la "bicicleta forestal" empleada en la escalada de los árboles. Foto: Forestry Suppliers Inc. (1999).

Aparte de los condicionantes anteriores, uno de los mayores inconvenientes de estos métodos es que requieren mucho tiempo para realizar la medición; por ello, sólo se justifica su utilización para la medición en pie de árboles tipo o de árboles singulares, así como en los trabajos de investigación que requieran información periódica sobre la evolución de las variables métricas del árbol con una gran precisión.

Jalones y pértigas telescópicas

Los jalones son barras o varas de materiales diversos como madera, hierro, acero, aluminio o fibra de vidrio. Actualmente, y debido a su ligereza y resistencia, se emplean principalmente jalones de duraluminio o de fibra de vidrio. Suelen presentar una sección circular de 3-5 cm de diámetro y un tamaño comprendido entre uno y tres metros, aunque pueden acoplarse entre sí por medio de una rosca hasta alcanzar grandes longitudes. Uno de los tramos puede llevar en un extremo un regatón o punta metálica, para fijarlo sobre el terreno en caso de ser necesario. Estos jalones suelen llevar bandas de distintos colores que indican subdivisiones de su longitud (generalmente de 10 cm) y permiten realizar las mediciones de la altura de los árboles (Fig. 3.8). No obstante, la utilidad de los jalones no es únicamente la medición de alturas, ya que sirven para marcar puntos sobre el terreno que permiten definir alineaciones, esquinas o centros de parcelas, etc.

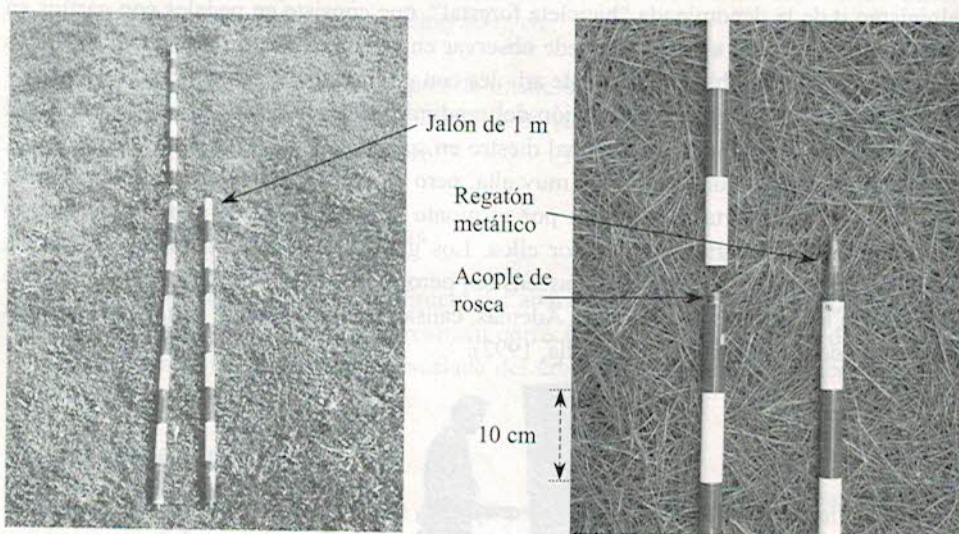


Figura 3.8. Aspecto de los jalones de tramos acoplables de duraluminio. A la derecha detalle del acople de rosca y del regatón metálico.

Las pértigas telescópicas están formadas por varias piezas de duraluminio o de fibra de vidrio con secciones circulares o rectangulares decrecientes, de modo que unas se encajan en el interior de las otras al modo de una caña de pescar. En la mayoría de los casos la longitud máxima con todas las piezas extendidas varía entre 8 y 15 m. Estos aparatos tienen la escala de medida invertida (el origen está en la parte superior de la pértiga), suelen llevar en el interior una cinta métrica unida al extremo superior y un lector de altura en el elemento inferior, que permite conocer la longitud de la pértiga que está desplegada en cada momento. Este contador es digital en los modelos más recientes.

Para la medición de la altura empleando jalones o pértigas telescópicas se procede colocándolos junto al árbol, y acoplando jalones o desplegando tramos de pértiga hasta hacer coincidir su extremo superior con el ápice del árbol o con la sección del tronco de la que se quiera conocer la altura. Cuando se emplean jalones se calcula la altura del árbol multiplicando la longitud de un jalón por el número de ellos que se hayan acoplado menos uno, puesto que normalmente el ápice del árbol no coincidirá con el extremo final del último jalón, por lo que será necesario estimar la longitud que reste hasta el ápice con la ayuda de las bandas de colores. En el caso de las pértigas, se opera de la misma manera con los tramos que se hayan desplegado hasta la punta del árbol, y si el aparato posee lector se puede leer en él directamente el valor de la altura (Fig. 3.9).

El uso tanto de jalones como de pértigas telescópicas requiere al menos dos operarios: uno sujeta la pértiga o los jalones apoyados en el árbol, y el otro, situado a una distancia conveniente, estima el momento en que se ha alcanzado el ápice del árbol y anota en los estadillos correspondientes las alturas medidas.

El empleo de jalones o pértigas telescópicas es un procedimiento rápido en plantaciones de poca edad, ya que su uso está limitado a la medición de alturas inferiores a 15 m, debido a su peso y a las dificultades operativas por la presencia de ramas o irregularidades en el tronco. La medición de una gran cantidad de árboles de mayor tamaño con pértigas telescópicas o jalones es un procedimiento lento y costoso.



Figura 3.9. Medición de la altura total de un árbol con pértiga telescópica (izquierda) y detalle del lector de la pértiga (derecha).

3.2.2. Medición indirecta de alturas

3.2.2.1. Métodos elementales

Son procedimientos sencillos para la estimación de alturas y de muy escasa utilización en la actualidad, pero permiten una estimación rápida, aunque poco precisa, en el caso de que no se cuente con aparatos adecuados.

Estimación ocular de la altura

Es un método que requiere de mucha práctica y que puede dar resultados aceptables en masas regulares que posean un dosel de copas muy uniforme. Es un método empleado con frecuencia por maderistas experimentados en la tasación de lotes de árboles. Aparte de precisar comprobaciones periódicas, también se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Es necesario extremar el cuidado al comienzo de la jornada de trabajo y después de los descansos, ya que se ha comprobado que en esos períodos hay una mayor tendencia al error.
- En el caso de las masas formadas por árboles muy esbeltos se suele incurrir en un error sistemático de sobreestimación de la altura; en cambio, en el caso de masas formadas por árboles corpulentos o de copas amplias se suele producir un error sistemático de subestimación de la altura.

Estimación de la altura por la sombra arrojada

Este método consiste en medir con una cinta métrica la sombra arrojada por un objeto de altura conocida y la sombra arrojada por el árbol (ver Fig. 3.10). Por semejanza de triángulos se puede estimar la altura de este último mediante la relación:

$$h = l \cdot \frac{h_1}{l_1}$$

Es un método que no se puede emplear en masas densas, en terrenos con pendiente variable o en días nublados.

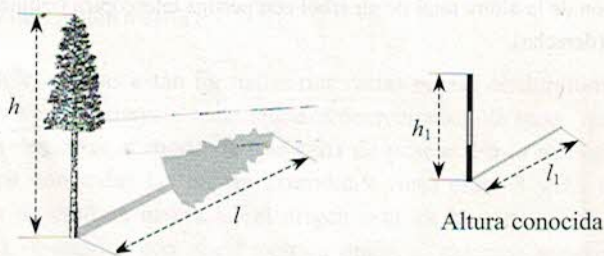


Figura 3.10. Medición de la altura total de un árbol por la sombra arrojada.

Método del espejo

Consiste en situar un espejo en el suelo y alejarse del mismo en dirección contraria al árbol hasta observar en el espejo su ápice (Fig. 3.11). La altura se puede estimar por semejanza de triángulos, midiendo con cinta métrica las distancias entre el operario y el espejo (l') y entre el espejo y el árbol (l), utilizando la siguiente relación:

$$h = l \cdot \frac{h'}{l'}$$

Siendo h' la altura entre el nivel del suelo y los ojos del observador. Debe tenerse en cuenta que este método no se puede emplear ni en terrenos en pendiente ni en masas densas.

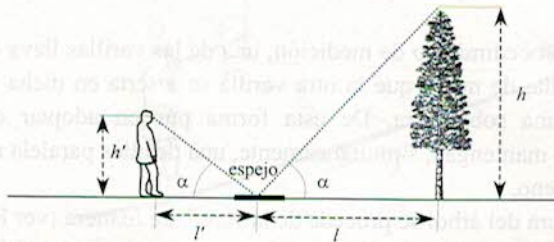


Figura 3.11. Medición de la altura total de un árbol por el método del espejo.

Método del jalón de referencia

Este método consiste en colocar un jalón o una vara (o una persona) de altura conocida h' al pie del árbol. Posteriormente, y desde una distancia adecuada, se desplaza mentalmente la longitud de ese jalón a lo largo del tronco del árbol. La altura será igual al número de veces que entra el jalón o la vara en el árbol multiplicado por su longitud. En el caso de la Figura 3.12, la altura es cuatro veces la longitud del jalón empleado como referencia, es decir $h \approx 4 \cdot h'$. A veces se puede facilitar la medición si se utiliza una regla graduada en la mano, que se ajusta visualmente con el jalón.

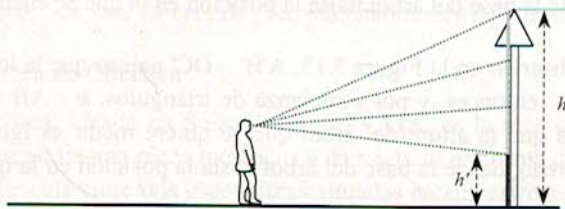


Figura 3.12. Medición de la altura total de un árbol por el método del jalón de referencia.

3.2.2.2. Aparatos que obligan a estacionar a una distancia igual a la altura

Estos aparatos se basan en la estimación de la altura de un árbol mediante semejanzas de triángulos y relaciones geométricas sencillas, al igual que algunos de los métodos elementales descritos anteriormente. A continuación se describe el modo de empleo del aparato de este tipo de uso más frecuente:

Cruz del hachero

Es un antiguo instrumento que también se denomina regla del leñador y que fue ideado para determinar, con cierta exactitud, el punto en el que caería el ápice del árbol al ser apeado (Mackay, 1964). Está formado por dos varillas de igual longitud (normalmente de unos 25 cm), sin ningún tipo de graduación y unidas por una rótula que permite el giro y el deslizamiento de una varilla respecto a la otra (Pita, 1984; López Peña y Marchal, 1994).

Para facilitar el procedimiento de medición, una de las varillas lleva en un extremo una anilla con una rótula, de modo que la otra varilla se inserta en dicha anilla permitiendo que se desplace una sobre otra. De esta forma pueden adoptar cualquier posición permitiendo que se mantengan, simultáneamente, una de ellas paralela al eje del árbol y la otra paralela al terreno.

Para medir la altura del árbol se procede de la siguiente manera (ver Fig. 3.13):

1. Situarse a una distancia del árbol que se desea medir lo más parecida posible a su altura real.
2. Colocar delante de la vista una de las varillas, manteniéndola paralela al eje del árbol, y al mismo tiempo sujetar la otra varilla paralela al terreno, con un extremo junto al ojo del observador y el otro apoyado sobre la primera varilla a una altura conveniente.
3. Mantener las varillas en la posición anterior y avanzar o retroceder hasta que la varilla paralela al eje del árbol sea, aparentemente, igual a la longitud de éste, es decir, hasta que el observador vea el ápice y la base del árbol por los extremos de esa varilla.
4. La altura del árbol se obtiene midiendo sobre el terreno, con una cinta métrica, la distancia desde la base del árbol hasta la posición en la que se encuentra el operario.

Como se puede observar en la Figura 3.13, $A'B' = OC'$ puesto que la longitud de las dos varillas es la misma; entonces, y por semejanza de triángulos, $h = AB = OC = l$. De esta forma se demuestra que la altura del árbol que se quiere medir es igual a la distancia, medida sobre el terreno, desde la base del árbol hasta la posición en la que está situado el operario.

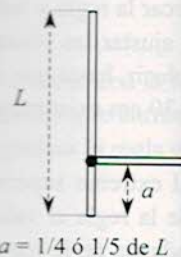


Figura 3.13. Cruz del hachero

3.2.2.3. Aparatos que

Los aparatos que permiten medir la altura de un árbol desconocida son las reglas hipsométricas.

- Son de construcción sencilla.
- Permiten estacionarse a una distancia cualquiera del árbol.
- Son independientes de la longitud del árbol.
- Obligan a utilizar una cinta métrica.
- Son poco precisos.

Regla hipsométrica de Christen

La regla de Christen, es una de las reglas hipsométricas. Es una regla de 1 m de largo, y con una escala de 1:100 (ver Fig. 3.14). Suele tener un jalón en un extremo para medir la altura del árbol. Para medir la altura del árbol (Bouchon, 1994).

El procedimiento de medición es el siguiente:

1. Colocar un jalón en un extremo del árbol.

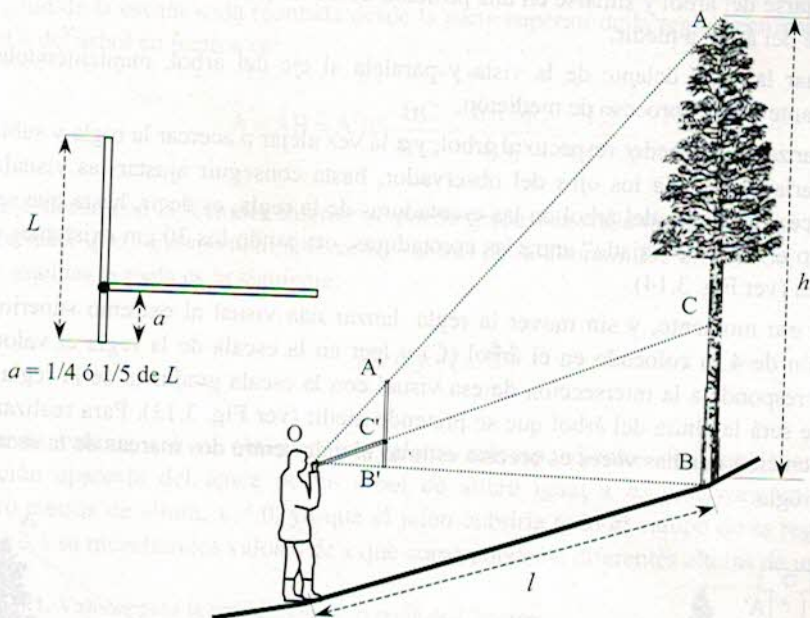


Figura 3.13. Cruz del hachero y procedimiento de medición de la altura total de un árbol con ella.

3.2.2.3. Aparatos que permiten estacionar a una distancia cualquiera desconocida

Los aparatos que permiten medir la altura de los árboles desde una distancia cualquiera desconocida son las denominadas reglas hipsométricas, y se caracterizan por:

- Son de construcción sencilla y fáciles de utilizar.
- Permiten estacionar a distancias desconocidas del árbol.
- Son independientes de la pendiente del terreno.
- Son independientes del grado de inclinación de los árboles.
- Obligan a utilizar un jalón, vara o pértiga de referencia de longitud conocida.
- Son poco precisos, con valores de precisión habituales del 10 % (Philip, 1994).

Regla hipsométrica de Christen

La regla de Christen, ideada en Suiza en el siglo XIX, es la más conocida de todas las reglas hipsométricas. Es una pieza metálica (o de madera) en forma de regla, de 34 cm de largo, y con una escala entre dos escotaduras situadas en sus extremos, que distan 30 cm (ver Fig. 3.14). Suele tener un orificio para poder sujetarla y mantenerla paralela al eje del árbol. Para medir alturas requiere el uso de un jalón de cuatro metros de longitud (Pardé y Bouchon, 1994).

El procedimiento de medición es el siguiente:

1. Colocar un jalón de 4 m de longitud junto al árbol y paralelo a su eje longitudinal.

2. Alejarse del árbol y situarse en una posición desde la que se divise bien el ápice y la base del árbol a medir.
3. Situar la regla delante de la vista y paralela al eje del árbol, manteniéndola así durante todo el proceso de medición.
4. Avanzar o retroceder respecto al árbol, y a la vez alejar o acercar la regla y subirla o bajarla respecto a los ojos del observador, hasta conseguir ajustar las visuales al ápice y a la base del árbol en las escotaduras de la regla, es decir, hasta que se vea todo el árbol "encajado" entre las escotaduras, ocupando los 30 cm existentes entre ellas (ver Fig. 3.14).
5. En ese momento, y sin mover la regla, lanzar una visual al extremo superior del jalón de 4 m colocado en el árbol (C) y leer en la escala de la regla el valor que corresponde a la intersección de esa visual con la escala graduada de la regla (C'), que será la altura del árbol que se pretende medir (ver Fig. 3.13). Para realizar esta operación muchas veces es preciso estimar el valor entre dos marcas de la escala de la regla.

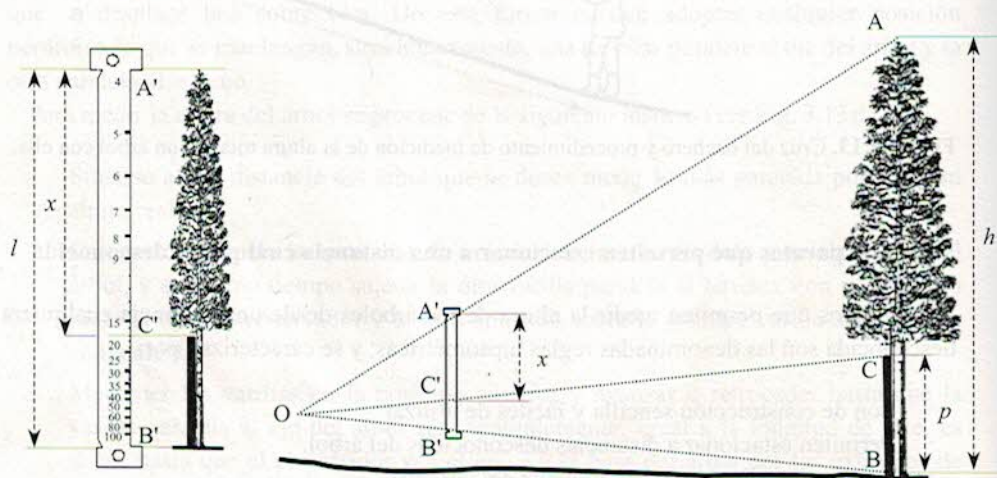


Figura 3.14. Medición de la altura total de un árbol empleando la regla de Christen.

La escala que aparece en la regla de Christen, en la que es posible medir directamente la altura de los árboles, se construye a partir de las relaciones geométricas que se comentan a continuación.

Si la regla se mantiene paralela al eje del árbol y se ha realizado lo explicado en el punto 4 del procedimiento de medición, entonces los triángulos OAB y OA'B' son semejantes, y por tanto se cumple que:

$$\frac{AB}{A'B'} = \frac{BC}{B'C'}$$

De la ecuación anterior se puede despejar la altura total del árbol (AB), cuyo valor va a depender de la longitud del jalón (BC), de la distancia entre escotaduras en la regla (A'B') y de la longitud aparente de la pértiga sobre la regla o lectura realizada (B'C'). Como en la

regla original hay 30 cm entre escotaduras y se utiliza un jalón de 4 m, si se llama x a la longitud de la escala leída (contada desde la parte superior de la regla), entonces la altura total h del árbol en metros es:

$$h = AB = A'B' \cdot \frac{BC}{B'C'} = \frac{0,3 \cdot 4}{0,3 - x} = \frac{1,2}{0,3 - x}$$

De acuerdo con la fórmula anterior se puede graduar la regla obteniendo las longitudes de escala x que corresponden a diversos valores de la altura h . De este modo, la fórmula para graduar la regla es la siguiente:

$$x = 0,3 \cdot \left(1 - \frac{4}{h}\right)$$

Dando valores a h se obtienen los valores correspondientes de x que marcarían la posición aparente del ápice de un árbol de altura igual a h . Así, para un árbol de cuatro metros de altura, $x = 0$, ya que el jalón cubriría todo el campo de la regla. En la Tabla 3.1 se muestran los valores de x que corresponden a diferentes alturas de un árbol.

Tabla 3.1. Valores para la graduación de la regla de Christen.

Altura del árbol (m)	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	30	40
Valor de x (cm)	0	6	10	12,9	15	16,7	18	20	22	24	26	27

Como se puede apreciar, a medida que aumenta la altura del árbol se reduce la distancia que separa las marcas de la escala. Así, entre la marca de cuatro y la de cinco metros hay seis centímetros de distancia, mientras que entre la marca de 30 y la de 40 m sólo hay un centímetro de separación, lo que da lugar a imprecisiones a la hora de realizar las lecturas cuando se miden árboles de altura superior a 20 m.

La precisión de la regla de Christen (separación entre graduaciones) es directamente proporcional a la longitud de la regla l y también al tamaño del jalón $p = CB$:

$$x = l \cdot \left(1 - \frac{p}{h}\right)$$

Por esta razón, una manera de evitar el inconveniente que tiene la regla descrita para medir árboles con alturas superiores a los 20 m sería aumentar el tamaño de la regla y/o del jalón. Una modificación de la regla de Christen, propuesta por Schmid, fue combinar un jalón de siete metros con una regla de 50 cm de longitud (Pita, 1984; Pardé y Bouchon, 1994), aunque el empleo de una regla larga dificulta enormemente el proceso de medición, puesto que es muy difícil observar a la vez el ápice del árbol, su base y el lugar de enrase de la pértiga sobre la escala de la regla. Además, las pértigas largas son difíciles de transportar y manejar, sobre todo con árboles muy ramosos.

En cualquier caso, a partir de la relación anterior es posible construir fácilmente reglas hipsométricas de longitud l (cm), para utilizar conjuntamente con jalones de longitud p (m).

Las principales ventajas que se derivan del empleo de la regla de Christen, son las siguientes:

- No es necesario colocarse a una distancia predeterminada, lo que representa una importante ventaja en terrenos abruptos o en masas densas en las que es difícil distinguir las copas.
- Puede emplearse en cualquier tipo de terreno, sin tener en cuenta la pendiente.
- Es de fácil manejo, sencilla de construir, cómoda de transportar, barata y rápida de usar, lo que permite que siga empleándose pese a la progresiva implantación de los modernos hipsómetros.

Por otra parte, los inconvenientes que presenta son los siguientes:

- Requiere el empleo de un jalón.
- No es sencillo apreciar simultáneamente la coincidencia del ápice del árbol con el extremo superior y la de la base con el inferior, y leer al mismo tiempo la altura del árbol sobre la escala graduada.
- Trabajando de forma precisa se comete un error mínimo de $\pm 5\%$ de la altura (Prodan et al., 1997).
- Al aumentar la altura del árbol las divisiones de la regla están cada vez más juntas, lo que da lugar a imprecisiones, por lo que no se debe emplear para medir árboles con alturas superiores a los 20 m (usando un jalón de 4 m).

Regla hipsométrica de Daalder

Es una regla hipsométrica basada en el principio de la regla de Christen y que evita el inconveniente de la falta de precisión cuando se miden árboles de gran altura, como consecuencia de la cercanía de las marcas de la escala. La regla de Daalder es una pieza metálica o de madera de 30 cm, con escotaduras a ambos lados, tanto en el extremo superior como en el inferior, y con dos escalas distintas. Una de ellas (la de la derecha) se utiliza con un jalón de cuatro metros, es decir, es igual a la de la regla de Christen descrita anteriormente, y tiene una muesca en la división correspondiente a una altura de 12 m, que está situada a una distancia de 10 cm del extremo inferior ($1/3$ de su longitud). La otra escala (situada a la izquierda de la regla) está diseñada para el empleo de una pértiga de 12 m (Pita, 1984; Pardé y Bouchon, 1994) y, por tanto, los valores de x se calculan tal y como se ha visto en la regla de Christen:

$$x = 0,3 \cdot \left(1 - \frac{12}{h} \right)$$

Esto permite que las divisiones de la escala para alturas comprendidas entre 20 y 40 m estén lo suficientemente separadas como para minimizar los errores de lectura. Utilizando la escala de la derecha y un jalón de 4 m es posible medir alturas de árboles menores de 20 m operando exactamente igual que como se ha indicado para la regla de Christen.

En el caso de árboles de gran tamaño (entre 20 y 40 m) el proceso de medición de su altura se realiza en dos pasos:

1. En el primero se sitúa un jalón de cuatro metros de altura sobre el árbol y se procede de modo similar a lo comentado para la regla de Christen, con la diferencia de que se hace coincidir la visual al extremo superior de la pértiga con la muesca realizada en la primera escala (a la derecha) a un tercio de su longitud. De este modo, el punto del árbol que coincide con la escotadura superior de la regla tendrá una altura de tres veces la longitud del jalón utilizado, es decir $4 \cdot 3 = 12$ m (Fig. 3.15). Finalmente se memoriza ese punto mediante alguna característica apreciable que exista en el tronco.

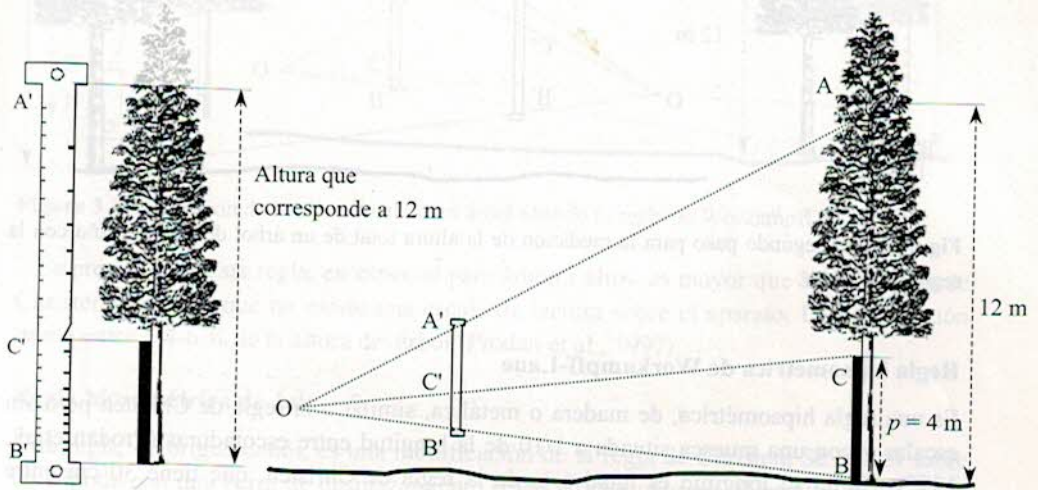


Figura 3.15. Primer paso para la medición de la altura total de un árbol de gran tamaño con la regla de Daalder.

2. En la segunda fase se emplea la escala izquierda con el jalón ficticio de 12 m que se corresponde con la altura medida en el paso anterior. La altura total del árbol se obtiene operando de una manera totalmente similar a lo indicado para la regla de Christen, es decir, enmarcando el árbol entre las escotaduras superior e inferior de la regla, y leyendo en la escala el valor que marca el punto del árbol, memorizado anteriormente, que se corresponde con los 12 m de altura (Fig. 3.16).

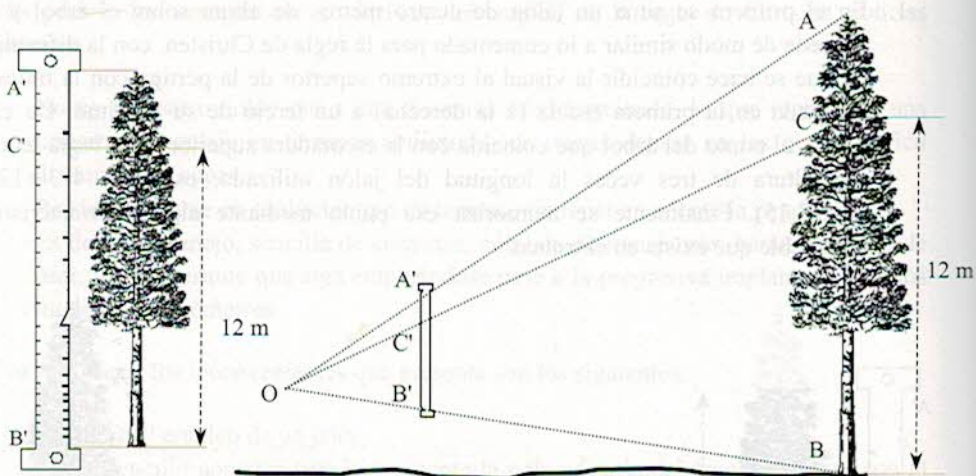


Figura 3.16. Segundo paso para la medición de la altura total de un árbol de gran tamaño con la regla de Daalder.

Regla hipsométrica de Workampff-Laue

Es una regla hipsométrica, de madera o metálica, similar a la regla de Christen pero sin escalas y con una muesca situada a $1/10$ de la longitud entre escotaduras (Prodan et al., 1997). Como su longitud es igual a la de la regla de Christen, que tiene 30 cm entre escotaduras, la muesca se sitúa a tres centímetros de la escotadura inferior.

El procedimiento de medición es el siguiente.

1. Sitarse a una distancia cualquiera desde la cual se observe el ápice y la base del árbol.
2. Desde esa posición, se ajustan las visuales al ápice y la base del árbol a las escotaduras superior e inferior de la regla, manteniéndola paralela al eje del árbol.
3. Una vez encuadrado el árbol, se memoriza el punto C sobre el árbol que coincide con la visual en la muesca de la regla.
4. Como la muesca se encuentra a $1/10$ de la longitud de la regla, otro operario procede a medir, con cualquier procedimiento, la altura CB (por ejemplo con una cinta métrica o una pértiga). La altura del árbol será $h = AB = 10 \cdot CB$ (Fig. 3.17).

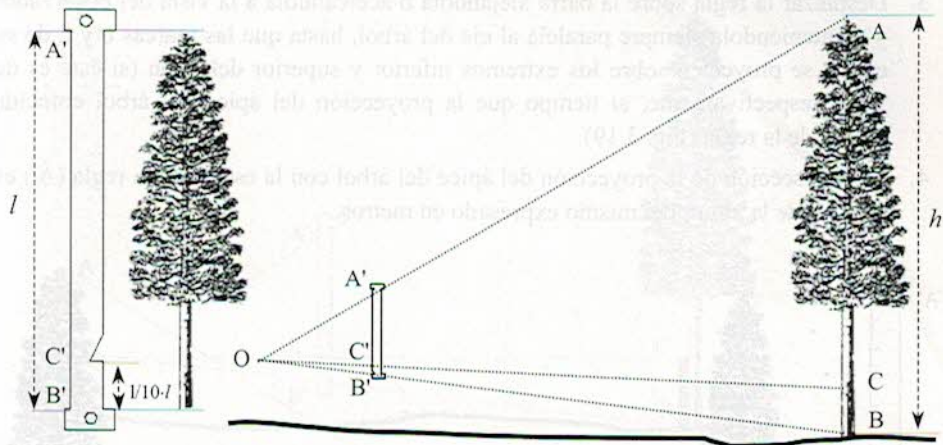


Figura 3.17. Medición de la altura total de un árbol usando la regla de Workampff-Laué.

La precisión de esta regla, en especial para árboles altos, es mayor que la de la regla de Christen, debido a que no existe una escala de lectura sobre el aparato. Dicha precisión oscila entre $\pm 4-6\%$ de la altura del árbol (Prodan et al., 1997).

Regla hipsométrica de Jal

Esta regla, de origen danés, es una modificación de la regla de Christen. Se utiliza sobre un trípode con una barra de desplazamiento (Fig. 3.18) y requiere el empleo de un jalón de longitud conocida (habitualmente de dos metros de longitud). Sobre una de sus caras la regla lleva una escala graduada en centímetros. Se considera el instrumento basado en principios geométricos más preciso (Brack, 1999), pero su instalación laboriosa hace que no sea uno de los instrumentos más recomendables (Rondeux, 1993).

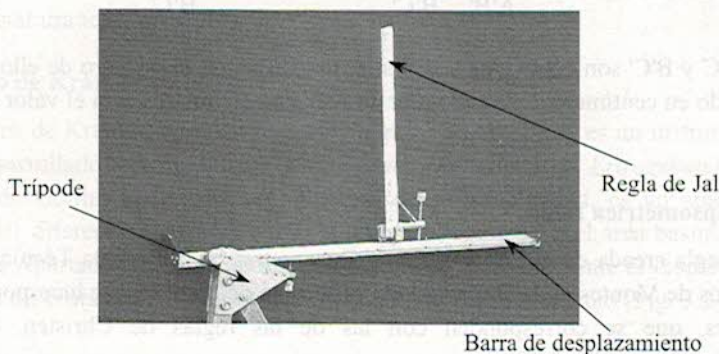


Figura 3.18. Aspecto de la regla de Jal montada sobre un trípode. Foto: Brack (1999).

El procedimiento de medición es el siguiente:

1. Colocar el jalón en posición vertical junto al árbol.
2. Situar el trípode con la regla a una distancia desde la cual se aprecie con claridad el jalón, el ápice y la base del árbol.

3. Desplazar la regla sobre la barra alejándola o acercándola a la vista del observador y manteniéndola siempre paralela al eje del árbol, hasta que las marcas 0 y 2 de su escala se proyecten sobre los extremos inferior y superior del jalón (si éste es de 2 m), respectivamente, al tiempo que la proyección del ápice del árbol coincida dentro de la regla (Fig. 3.19).
4. La intersección de la proyección del ápice del árbol con la escala de la regla (A') es el valor de la altura del mismo expresado en metros.

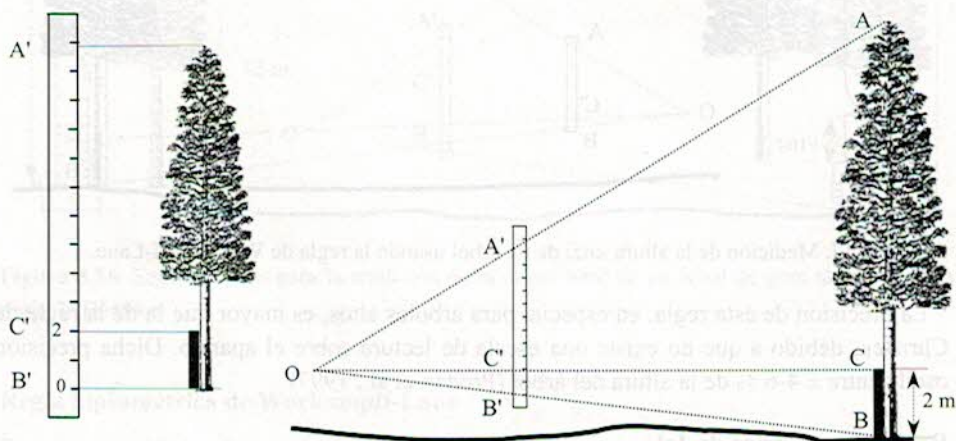


Figura 3.19. Medición de la altura total de un árbol empleando la regla de Jal.

Si la regla se mantiene paralela al eje del árbol, los triángulos OAB y $OA'B'$ son semejantes, y por tanto se cumple que:

$$\frac{AB}{A'B'} = \frac{BC}{B'C'} \Rightarrow AB = h = BC \cdot \frac{A'B'}{B'C'}$$

donde BC y $B'C'$ son conocidos y tienen el mismo valor, el primero de ellos en metros y el segundo en centímetros. Así, el valor de $A'B'$ en centímetros será el valor de $AB = h$ en metros.

Regla hipsométrica Lada

Es una regla creada en el Laboratorio de Dasometría de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid, que incorpora tres escalas diferentes, que se corresponden con las de las reglas de Christen, de Jal y de Workampff-Laue (Fig. 3.20).

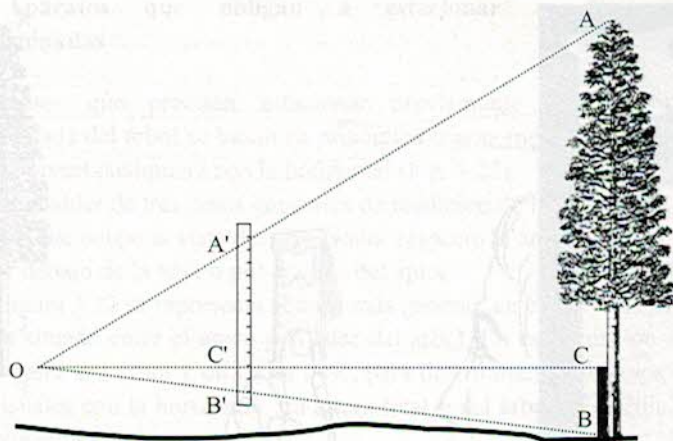


Figura 3.20. Medición de la altura total de un árbol con la regla Lada.

Entonces, en esta regla, partiendo de la relación $\frac{AB}{BC} = \frac{A'B'}{B'C'}$, se combinan las siguientes características:

$$BC \cdot A'B' = \text{cte (Regla de Christen)}$$

$$\frac{A'B'}{B'C'} = \text{cte (Regla de Workampff-Laue)}$$

$$\frac{BC}{B'C'} = \text{cte (Regla de Jal)}$$

Por otra parte, y en general para todas las reglas hipsométricas, los errores en la medición de alturas serán mínimos cuando el jalón de referencia tenga una longitud de $1/3$ ó $1/4$ de la altura total del árbol.

Dendrómetro de Kramer

El dendrómetro de Kramer, también llamado “abridor de botellas”, es un instrumento de medición desarrollado en el *Institut für Forsteinrichtung und Ertragskunde* de la Universidad de Göttingen (Alemania). A pesar de su simplicidad, es un aparato que permite estimar diferentes variables como la altura, el volumen o el área basimétrica de una masa (ver Apartado 8.3.1). La altura de un árbol se mide mediante el empleo de una pequeña regla de Workampff-Laue situada en un lateral del instrumento (Fig. 3.21).

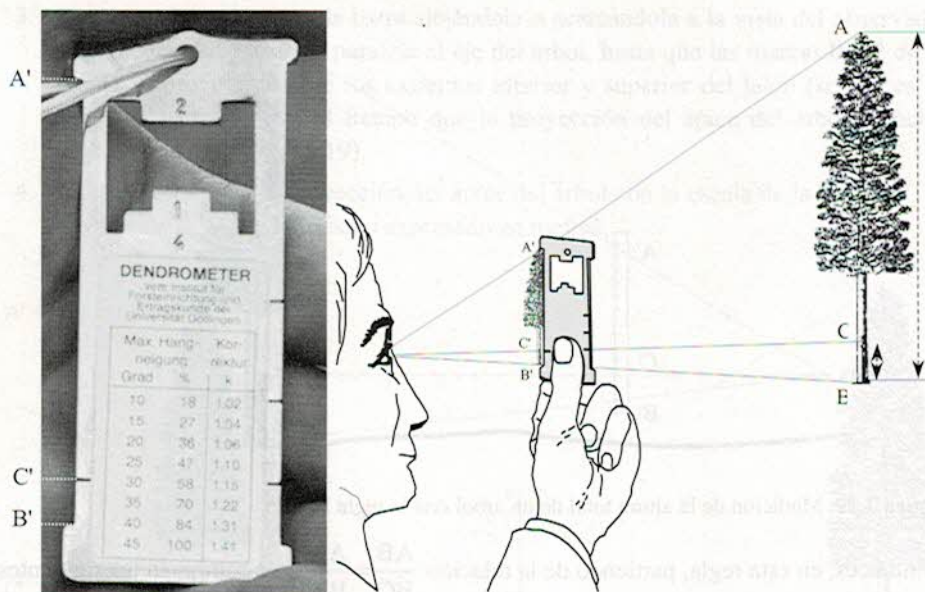


Figura 3.21. Dendrómetro de Kramer y procedimiento para medir la altura total de un árbol.

El pequeño tamaño del dendrómetro dificulta la medición de alturas de forma precisa, ya que para conseguir ver el árbol entre las escotaduras de la regla (entre los puntos A' y B' de la figura) es necesario acercarse al instrumento bastante al ojo o estar situado a gran distancia del árbol. Igualmente, es difícil apreciar con exactitud el punto (C) que corresponde en el árbol a la proyección de la ranura situada a una décima parte de la longitud del lado del aparato (punto C'). Debido a ello, su precisión es baja, siendo en el mejor de los casos del 5%. A su favor se encuentran las ventajas de su sencillez, su reducido tamaño y su precio.

El procedimiento de medición de alturas es el siguiente:

1. El observador se sitúa a una distancia desde la que se aprecien claramente el ápice y la base del árbol. Coloca el dendrómetro en posición vertical, paralelo al eje del árbol, frente a los ojos, y visa el árbol que se desea medir.
2. Se acerca o aleja y sube o baja el aparato respecto al ojo del observador hasta que el árbol quede enmarcado en la regla de medir alturas (el ápice debe coincidir con el punto A' y la base con el B', tal y como se aprecia en la Figura 3.21).
3. Por construcción, el segmento B'C' del dendrómetro es 1/10 del segmento B'A'; por tanto, la altura del punto C' proyectada sobre el fuste del árbol (C) corresponde a 1/10 de la altura total del árbol.
4. Se mide la altura del punto C en el árbol y se multiplica por 10 para obtener la altura total del árbol.

3.2.2.4. Aparatos que obligan a estacionar a distancias horizontales predeterminadas

Los aparatos que precisan estacionar previamente a una distancia horizontal predeterminada del árbol se basan en principios trigonométricos y miden el ángulo α que forma una visual cualquiera con la horizontal (Fig. 3.22).

Se puede hablar de tres casos generales de medición de la altura total de un árbol según la posición que ocupe la vista del observador respecto al árbol: entre la base y el ápice del árbol, por debajo de la base o por encima del ápice.

En la Figura 3.22 se representa el caso más general, en el que la vista del observador se encuentra situado entre el ápice y la base del árbol. En esa situación se debe lanzar una visual al ápice del árbol y otra a su base, para determinar los ángulos α y β que forman dichas visuales con la horizontal. La altura total h del árbol se calcula, entonces, a partir de las siguientes relaciones:

$$\left. \begin{aligned} \frac{AC}{OC} = \operatorname{tg}\alpha &\Rightarrow AC = OC \cdot \operatorname{tg}\alpha = D \cdot \operatorname{tg}\alpha \\ \frac{CB}{OC} = \operatorname{tg}\beta &\Rightarrow CB = OC \cdot \operatorname{tg}\beta = D \cdot \operatorname{tg}\beta \end{aligned} \right\} h = AC + BC = D \cdot (\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta)$$

Por tanto, para calcular la altura total h del árbol, es necesario conocer también la distancia D , en proyección horizontal, a la que está situado el observador.

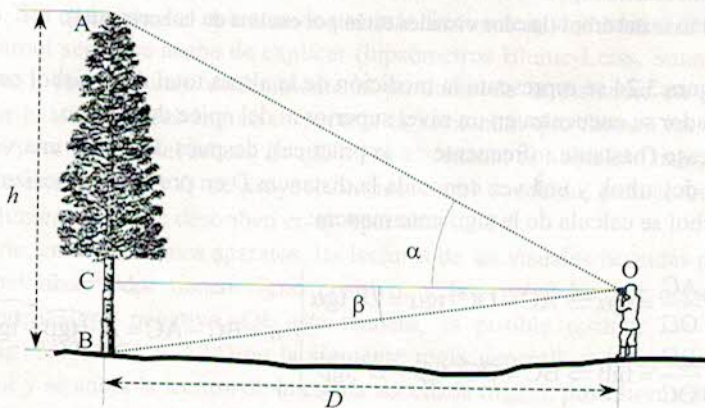


Figura 3.22. Medición de la altura total de un árbol cuando la vista del observador está situada entre el ápice y la base del árbol (una visual está por encima de la horizontal y otra por debajo).

En la Figura 3.23 se representa la medición de la altura total de un árbol cuando la vista del observador se encuentra en un nivel inferior a la base del árbol.

En esta situación, el observador lanza una visual al ápice del árbol y otra a la base para, igual que en el caso anterior, determinar los ángulos α y β que forman dichas visuales con la horizontal. La altura total del árbol, una vez conocida la distancia en proyección horizontal D a la que se encuentra el observador, se calcula de la siguiente manera:

$$\left. \begin{aligned} \frac{AC}{OC} = \operatorname{tg}\alpha &\Rightarrow AC = OC \cdot \operatorname{tg}\alpha = D \cdot \operatorname{tg}\alpha \\ \frac{BC}{OC} = \operatorname{tg}\beta &\Rightarrow BC = OC \cdot \operatorname{tg}\beta = D \cdot \operatorname{tg}\beta \end{aligned} \right\} h = AC - BC = D \cdot (\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\beta)$$

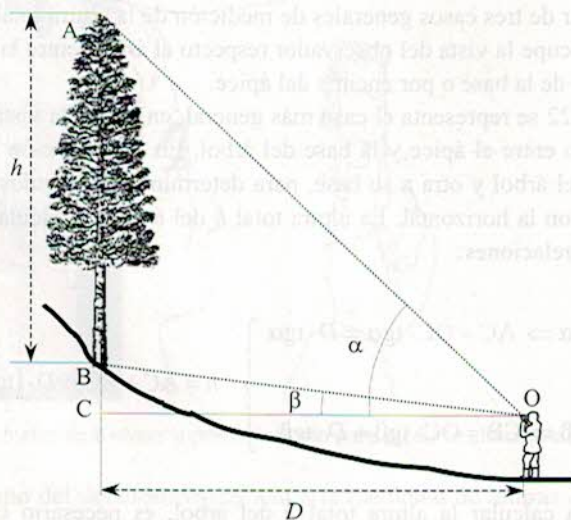


Figura 3.23. Medición de la altura total de un árbol cuando la vista del operador está situada por debajo de la base del árbol (las dos visuales están por encima de la horizontal).

En la Figura 3.24 se representa la medición de la altura total de un árbol cuando la vista del observador se encuentra en un nivel superior al del ápice del mismo.

En este caso (bastante infrecuente en la práctica), después de lanzar una visual al ápice y a la base del árbol, y una vez conocida la distancia D en proyección horizontal, la altura total del árbol se calcula de la siguiente manera:

$$\left. \begin{aligned} \frac{AC}{OC} = \operatorname{tg}\alpha &\Rightarrow AC = OC \cdot \operatorname{tg}\alpha = D \cdot \operatorname{tg}\alpha \\ \frac{BC}{OC} = \operatorname{tg}\beta &\Rightarrow BC = OC \cdot \operatorname{tg}\beta = D \cdot \operatorname{tg}\beta \end{aligned} \right\} h = BC - AC = D \cdot (\operatorname{tg}\beta - \operatorname{tg}\alpha)$$

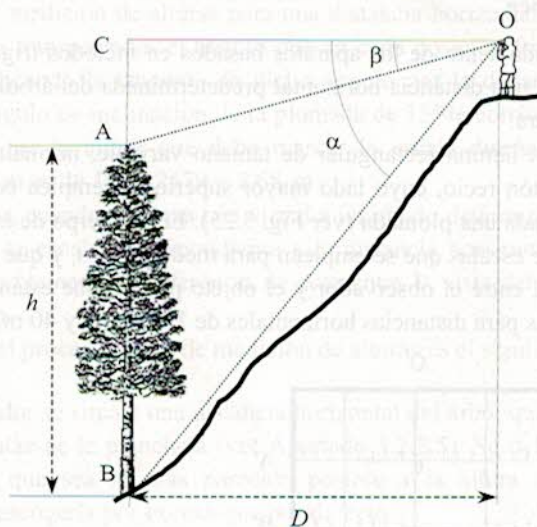


Figura 3.24. Medición de la altura total de un árbol cuando la vista del operador está situada por encima del nivel del ápice del árbol (las dos visuales están por debajo de la horizontal).

Estos procedimientos de medición de alturas son de aplicación para cualquier aparato que permita calcular la inclinación que forma una visual con respecto a la horizontal. Entre esos aparatos se encuentran los clinómetros, de los que se hablará en el Apartado 3.6. Sin embargo, los aparatos de uso más frecuente que permiten determinar la altura de un árbol según se acaba de explicar (hipsómetros Blume-Leiss, Suunto y Haga, relascopio, etc.), proporcionan directamente el producto de la distancia en proyección horizontal por la tangente del ángulo respecto a la horizontal que forman las visuales al ápice ($D \cdot \operatorname{tg} \alpha$) y a la base del árbol ($D \cdot \operatorname{tg} \beta$). Por esa razón, es necesario haberse situado previamente a una distancia D en proyección horizontal conocida, para lo cual existen varios procedimientos que se describen en el Apartado 3.2.2.5.

Por otra parte, en esos mismos aparatos, las lecturas de las visuales lanzadas por encima de la vista del observador tienen signo positivo, y las realizadas por debajo de esa horizontal tienen signo negativo. De esta manera, es posible resumir los tres casos anteriores (Fig. 3.22, 3.23 y 3.24) en la siguiente regla general: se lanza una visual al ápice del árbol y se anota la lectura de la escala adecuada ($h_{\text{ápice}}$); posteriormente se lanza otra visual a la base del árbol, anotando la lectura de la escala adecuada (h_{base}); la altura del árbol será siempre la resta de los dos valores anteriores $h = h_{\text{ápice}} - h_{\text{base}}$ con su signo correspondiente (positivo si la visual está por encima de la horizontal y negativo si está por debajo).

A continuación se describen los aparatos de uso forestal más frecuente que permiten medir la altura de los árboles estacionando a una distancia horizontal predeterminada: la plancheta hipsométrica, el hipsómetro Blume-Leiss, el hipsómetro Haga, el hipsómetro Suunto y el relascopio de Bitterlich.

Plancheta hipsométrica

Este aparato es el fundamento de los aparatos basados en métodos trigonométricos, que obligan a estacionar a una distancia horizontal predeterminada del árbol u objeto del que se quiere medir la altura.

La plancheta es una lámina rectangular de tamaño variable, normalmente de madera pulimentada o de cartón recio, cuyo lado mayor superior se emplea como elemento de puntería y lleva acoplada una plomada (ver Fig. 3.25). En el cuerpo de la plancheta existe un número variable de escalas que se emplean para medir alturas, y que se diferencian en la distancia horizontal entre el observador y el objeto para la que están diseñadas (en la figura aparecen escalas para distancias horizontales de 10, 20, 30 y 40 m).

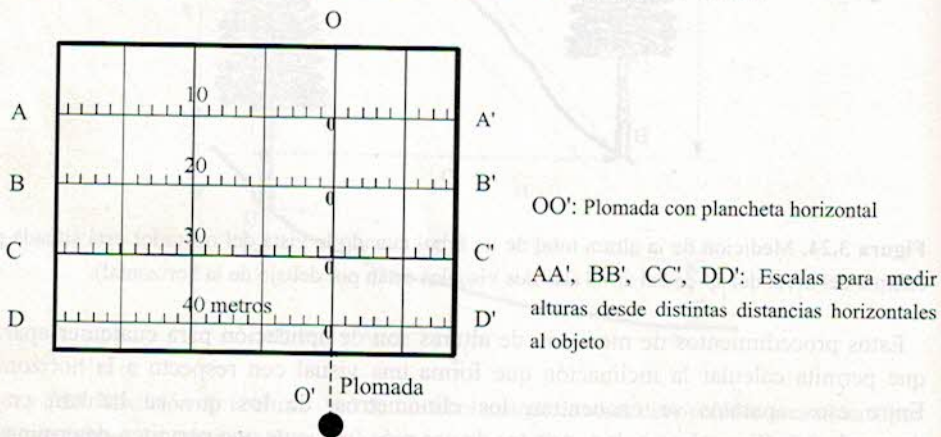


Figura 3.25. Esquema de la plancheta hipsométrica empleada para medir alturas.

Cuando la plancheta está nivelada, la plomada pasa por el origen de las escalas (posición OO' de figura anterior). Cuando se lanza una visual por encima o por debajo de la horizontal es necesario inclinar la plancheta, de tal manera que la plomada formará un ángulo α con el origen de las escalas, que será igual al ángulo que forme la visual con la horizontal (Fig. 3.26).

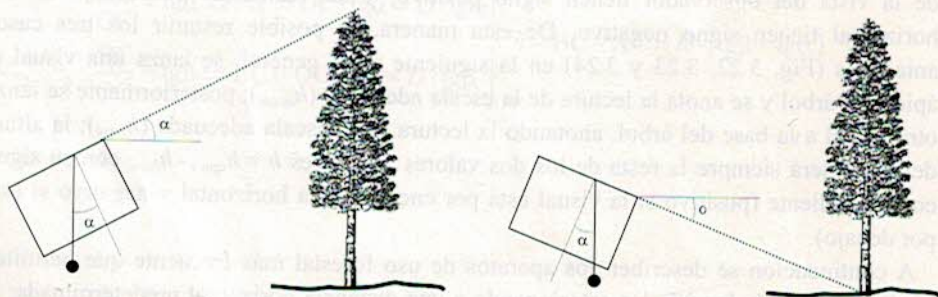


Figura 3.26. Medición de la altura total de un árbol con la plancheta hipsométrica. Visuales por encima de la horizontal (izquierda) y por debajo (derecha).

Las escalas de medición de alturas para una distancia horizontal D dada se construyen midiendo con un transportador el ángulo que en cada posición forma la plomada con el origen y multiplicando la tangente de dicho ángulo por la distancia horizontal D . Por ejemplo, a un ángulo de inclinación de la plomada de 15° le corresponde una tangente de 0,2679, por lo que la altura que debe marcar la escala diseñada para una distancia horizontal de 10 m es de $10 \cdot 0,2679 = 2,68$ m.

De esta manera, cuando se lanza una visual a un objeto determinado, la intersección de la plomada con la escala correspondiente a la distancia horizontal a la que está dicho objeto indica directamente la diferencia de cota entre la vista del observador y el punto del objeto visado.

En definitiva, el procedimiento de medición de alturas es el siguiente:

1. El observador se sitúa a una distancia horizontal del árbol que corresponda a alguna de las escalas de la plancheta (ver Apartado 3.2.2.5). Se debe escoger la distancia horizontal que sea lo más parecida posible a la altura real del árbol, siendo preferible escogerla por exceso que por defecto.
2. Se lanza una visual por el lado superior de la plancheta al ápice del árbol y se anota la lectura de la escala adecuada ($h_{\text{ápice}}$). Posteriormente se lanza otra visual a la base del árbol, anotando la lectura de la escala adecuada (h_{base}).
3. La altura del árbol será la resta de los dos valores anteriores $h = h_{\text{ápice}} - h_{\text{base}}$ con su signo correspondiente (positivo si la visual está por encima de la horizontal y negativo si está por debajo).

Hipsómetro Blume-Leiss

Es un instrumento de origen alemán, de concepción similar a una plancheta, pero con un péndulo que se puede bloquear, una carcasa de plástico resistente a golpes y un diseño que facilita su utilización (Fig. 3.27). Por ello, es posiblemente el hipsómetro más utilizado en todo el mundo.

Posee un elemento de puntería formado por un tubo hueco situado en la parte superior, que lleva dibujada una diana en el interior y que permite apuntar a la parte del objeto cuya diferencia de cota respecto a la vista del observador se quiere medir (normalmente el ápice y la base del árbol).

El aparato tiene cinco escalas, cuatro de las cuales están diseñadas para medir alturas cuando el observador se sitúa a distancias horizontales de 15, 20, 30 y 40 m del árbol. La quinta escala está graduada en grados sexagesimales y permite medir el ángulo que forma una visual con la horizontal, por lo que con ella se puede estimar la pendiente de forma sencilla.

Los modelos actuales (Fig. 3.27) llevan uno o dos péndulos cilíndricos, con una aguja solidaria que hace la misma función que la plomada de la plancheta. En la parte delantera del aparato existe un botón (o dos, si el modelo tiene dos péndulos) a modo de gatillo, que al presionarlo permite el libre movimiento del péndulo (y por tanto de la aguja) y al soltarlo lo bloquea, fijando la aguja. De esta forma, cuando se lanza una visual a un punto se debe apretar el botón para liberar el péndulo, y una vez que la aguja se haya estabilizado se puede soltar el botón, bloqueando la aguja, y se puede realizar la lectura de forma independiente al proceso de apuntar al objeto. Para saber cuando se estabiliza la

aguja, los modelos actuales llevan dibujado en el perímetro del péndulo cilíndrico una serie de bandas amarillas y negras, que se pueden observar a través del elemento de puntería al mismo tiempo que se lanzan las visuales. Esas bandas de colores se mueven cuando lo hace el péndulo, por lo que sirven para saber cuando se ha estabilizado la aguja y, por tanto, cuando hay que soltar el botón.

Por otra parte, algunos modelos llevan incorporado un visor dióptrico, que permite al observador, con ayuda de una mira desplegable que se apoya en el árbol, situarse a una cierta distancia fija del mismo, medida en proyección horizontal (ver Apartado 3.2.2.5).

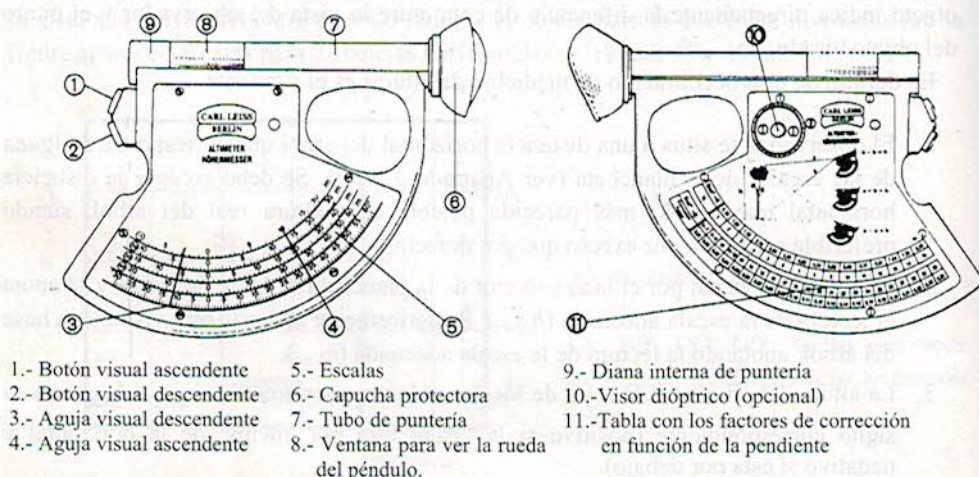


Figura 3.27. Elementos característicos de un hipsómetro Blume-Leiss modelo BL-6 (dos agujas con visor dióptrico).

Actualmente existen 4 modelos de Blume-Leiss, los modelos BL-7 y BL-8 con una única aguja (el segundo posee visor dióptrico) y los modelos BL-6 y BL-9 con dos agujas (el primero con visor dióptrico). Los modelos con visor dióptrico (BL-6 y BL-8) presentan en la cara opuesta a la de las escalas una tabla que permite corregir la altura del árbol cuando se estaciona en un terreno en pendiente con ayuda del visor dióptrico y su mira (ver Fig. 3.28). Los modelos sin visor dióptrico (BL-7 y BL-9) incorporan, en la cara donde aparecen las escalas, una tabla que proporciona la corrección que se debe efectuar a la altura del árbol cuando se realiza la medición desde una distancia distinta a una de las escalas del aparato.

El procedimiento de medición de alturas con el hipsómetro Blume-Leiss es el siguiente:

1. Situar a una distancia en proyección horizontal del árbol conocida, que coincida con alguna de las escalas del aparato (15, 20, 30 ó 40 m) y que sea lo más parecida posible a la altura del árbol (ver Apartado 3.2.2.5).
2. Utilizando la línea de puntería del aparato, y con el botón apretado para liberar el péndulo, lanzar una visual al ápice del árbol. Una vez estabilizado el péndulo (cuando las marcas negras y amarillas de la rueda del péndulo se hayan parado) se suelta el botón y se lee el valor $h_{ápice}$, que marca la intersección de la aguja con la escala correspondiente a la distancia horizontal a la que se ha estacionado previamente.

3. Se repite el proceso del punto anterior visualizando la base del árbol, para obtener h_{base} . Si se dispone de un modelo de dos péndulos y dos botones, se utiliza uno de ellos para la visual al ápice y el otro para la visual a la base del árbol. En caso contrario, cuando se cuenta con un modelo de un solo péndulo, es necesario memorizar la primera lectura antes de realizar la segunda.
4. La altura total del árbol se obtendrá restando los dos valores anteriores $h = h_{base} - h_{ápice}$, con sus signos correspondientes, teniendo en cuenta que las visuales por encima de la horizontal de los ojos del observador dan lugar a lecturas positivas (a la derecha del origen de las escalas), y las visuales por debajo de esa horizontal dan lugar a lecturas negativas (a la izquierda del origen de las escalas).

En el caso de que el observador haya empleado el visor dióptrico y la mira desplegable que viene con el aparato para situarse, en un terreno inclinado, a la distancia que requiere la escala que va a utilizar; la altura h determinada al proceder como se acaba de describir, debe corregirse para obtener la verdadera altura real h_{real} . El fundamento de dicha corrección se puede ver en el Apartado 3.2.2.5 (Fig. 3.42). En el caso del Blume-Leiss, dicha corrección puede realizarse fácilmente gracias a las tablas que están grabadas en la cubierta posterior de los modelos que montan visor dióptrico (ver Fig. 3.28). La tabla superior permite determinar un coeficiente corrector (CF) de la altura leída en función de la pendiente expresada en grados (Grad°). La tabla inferior permite transformar los valores de la pendiente de grados sexagesimales (Grad°) a porcentaje (%) y viceversa. El procedimiento a emplear es el siguiente:

1. Medir la pendiente del terreno. Para ello se lanza una visual paralela al terreno y se lee la pendiente en la escala inferior graduada en grados (ver Apartado 3.6).
2. Determinar el valor del coeficiente corrector (CF) entrando con el valor de la pendiente en la tabla inferior (ver Fig. 3.28).
3. La altura real h_{real} se obtiene multiplicando la altura leída h por el coeficiente corrector (CF) y dividiendo por 100, es decir $h_{real} = CF \cdot h / 100$.

Estas correcciones sólo son necesarias cuando la pendiente del terreno es superior a 4°, tal y como indica la tabla superior del Blume-Leiss (Fig. 3.28).

Todavía se encuentran modelos antiguos de este hipsómetro, cuyas principales diferencias respecto a los actuales (Fig. 3.29) son la carcasa externa metálica y de color gris, los elementos de puntería externos con un objetivo y una alidada de pínulas, y la existencia de dos botones, uno en un lateral que libera el péndulo y otro frontal que lo bloquea. Con estos modelos no es posible saber cuando se ha parado la aguja, ya que no se observa el péndulo cilíndrico al hacer la puntería, como sucede en los modelos actuales. Por tanto, es necesario mantener durante unos instantes el aparato fijo cuando se realiza la puntería para asegurar que se haya parado el péndulo.

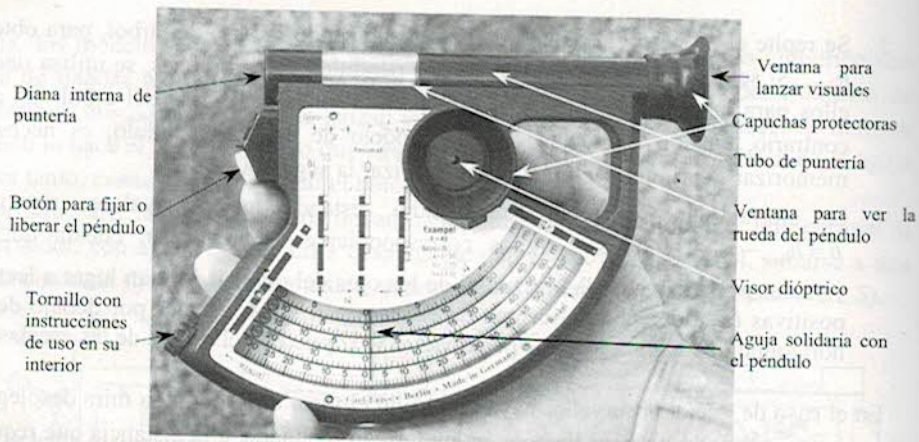


Figura 3.28. Arriba y abajo a la izquierda, aspecto del hipsómetro Blume-Leiss modelo BL-8 (con una aguja y visor dióptrico). Abajo a la derecha, detalle del factor corrector de la altura cuando se ha medido la distancia horizontal al árbol con ayuda del visor dióptrico y su mira en un terreno en pendiente.

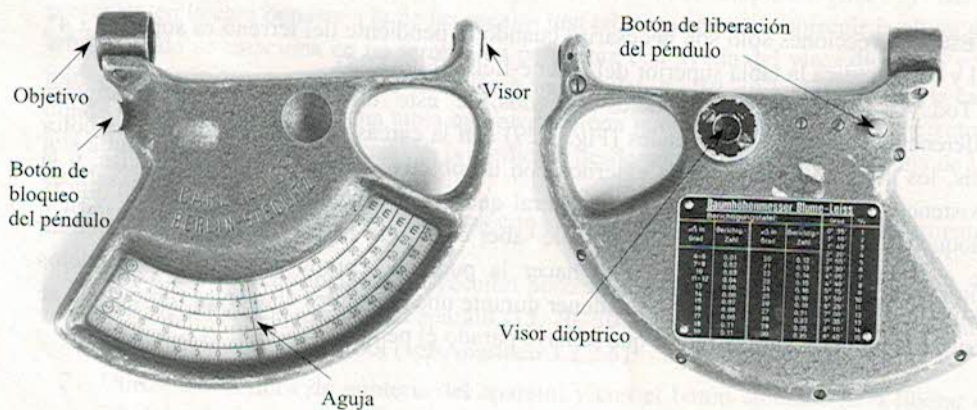


Figura 3.29. Aspecto de un modelo antiguo del hipsómetro Blume-Leiss.

Hipsómetro Haga

Es un hipsómetro muy similar al Blume-Leiss, con la particularidad de que sólo es visible la escala correspondiente a la distancia elegida, que se selecciona con una rueda situada en su parte frontal (Fig. 3.30), con lo que se limita la posibilidad de errores de lectura. El aparato tiene cinco escalas, cuatro de las cuales están diseñadas para medir alturas cuando el observador se sitúa a distancias horizontales del árbol de 15, 20, 25 y 30 m. La quinta escala está construida para calcular la altura de un objeto como un porcentaje de la distancia horizontal a la que se encuentre del observador, y puede utilizarse también para medir la pendiente del terreno, con un rango entre -40% y $+50\%$ (Rondeux, 1993).

La utilización de este hipsómetro requiere, por tanto, estacionar previamente a una distancia horizontal del objeto conocida, lo que se puede realizar con cinta métrica o por medio de una mira específica y un visor dióptrico similar al del Blume-Leiss que, opcionalmente, incorpora el aparato (ver Apartado 3.2.2.5).

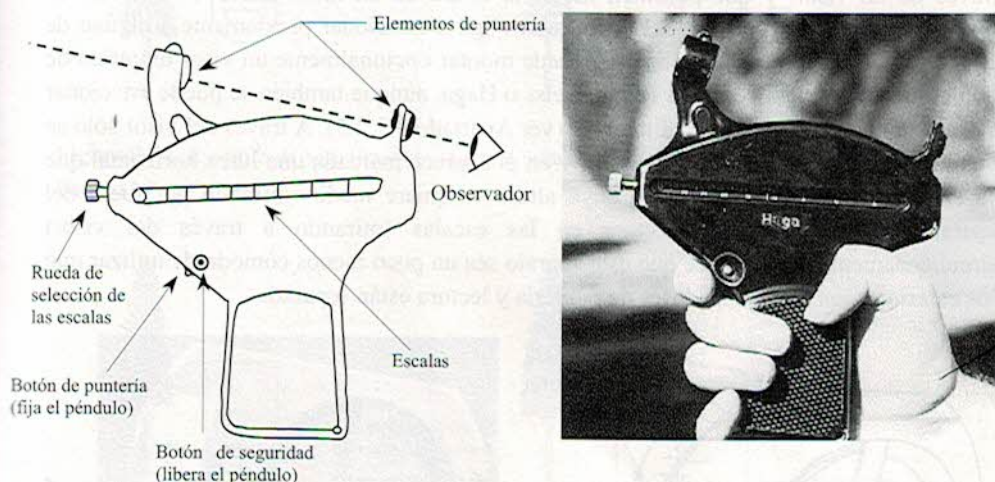


Figura 3.30. Esquema y aspecto del hipsómetro Haga. Foto: Brack (1999).

El procedimiento de medición de alturas con el hipsómetro Haga es el siguiente:

1. Situar a una distancia horizontal del árbol que coincida con alguna de las escalas (15, 20, 25 ó 30 m) del aparato (ver Apartado 3.2.2.5), y lo más parecida posible a la del árbol que se quiera medir.
2. Seleccionar la escala apropiada a la distancia de estacionamiento usando la rueda situada en el frontal del aparato.
3. Utilizando la línea de puntería del aparato, y con el botón apretado para liberar el péndulo, lanzar una visual al ápice del árbol. Una vez estabilizado el péndulo (para ello es necesario mantener unos instantes el aparato fijo), se suelta el botón y se lee el valor $h_{ápice}$ que marca la intersección de la aguja con la escala correspondiente a la distancia horizontal a la que se haya estacionado previamente.
4. Se repite el proceso del punto anterior visualizando la base del árbol, para obtener h_{base} .

- La altura se obtendrá restando los dos valores anteriores $h = h_{\text{ápice}} - h_{\text{base}}$, con sus signos correspondientes, teniendo en cuenta que las visuales por encima de la horizontal de los ojos del observador dan lugar a lecturas positivas, y las visuales por debajo de esa horizontal dan lugar a lecturas negativas.

También será necesario corregir la altura h así determinada si el observador se ha situado a la distancia que requiere la escala que se va a utilizar con el auxilio del visor dióptrico y el auxilio de la mira desplegable en un terreno con pendiente (ver Apartado 3.2.2.5).

Hipsómetro Suunto

Es un aparato de la casa finlandesa Suunto, que consiste en una pequeña caja metálica en cuyo interior hay un cilindro con dos escalas que se mueven como un péndulo, visibles a través de un visor, y que permiten medir la altura de un árbol desde 15 ó 20 m de distancia horizontal (ver Fig. 3.31), lo que obliga a estacionar previamente a alguna de esas distancias. Para ello, este aparato puede montar opcionalmente un visor dióptrico de doble refracción idéntico al del Blume-Leiss o Haga, aunque también se puede estacionar a esa distancia con otros procedimientos (ver Apartado 3.2.2.5). A través del visor sólo se ven las escalas, no la realidad exterior, y en él aparece marcada una línea horizontal que se emplea para apuntar al objeto cuya altura se quiere medir (mirando por fuera del aparato) y para hacer la lectura en las escalas (mirando a través del visor) simultáneamente, lo que hace que este aparato sea un poco menos cómodo de utilizar que los anteriores, en los que las fases de puntería y lectura están separadas.

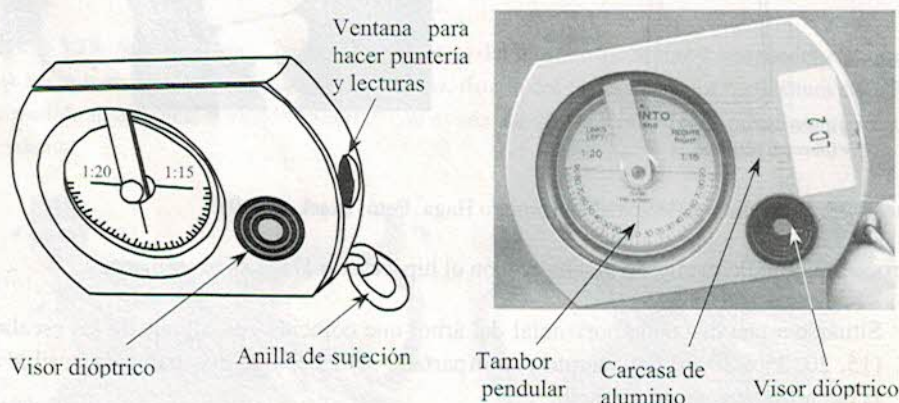


Figura 3.31. Esquema y aspecto exterior del hipsómetro Suunto.

El procedimiento de medición de alturas con el hipsómetro Suunto es el siguiente:

- Situarse a una distancia horizontal del árbol conocida, que coincida con alguna de las escalas (15 ó 20 m) del aparato (ver Apartado 3.2.2.5).
- Utilizando la línea horizontal de puntería del aparato lanzar una visual al ápice del árbol. Una vez estabilizado el péndulo se realiza la lectura $h_{\text{ápices}}$ que marca la intersección de la línea horizontal con la escala correspondiente a la distancia horizontal a la que se haya estacionado (ver Fig. 3.32).

- Se repite el proceso del punto anterior pero visualizando la base del árbol (ver Fig. 3.33) para obtener h_{base} .
- La altura se obtendrá restando los dos valores anteriores $h = h_{ápice} - h_{base}$, con sus signos correspondientes, teniendo en cuenta que las visuales por encima de la horizontal de los ojos del observador dan lugar a lecturas positivas, y las visuales por debajo de esa horizontal dan lugar a lecturas negativas.



Figura 3.32. Ejemplo de visualización al ápice para medir la altura de un árbol con el hipsómetro Suunto.

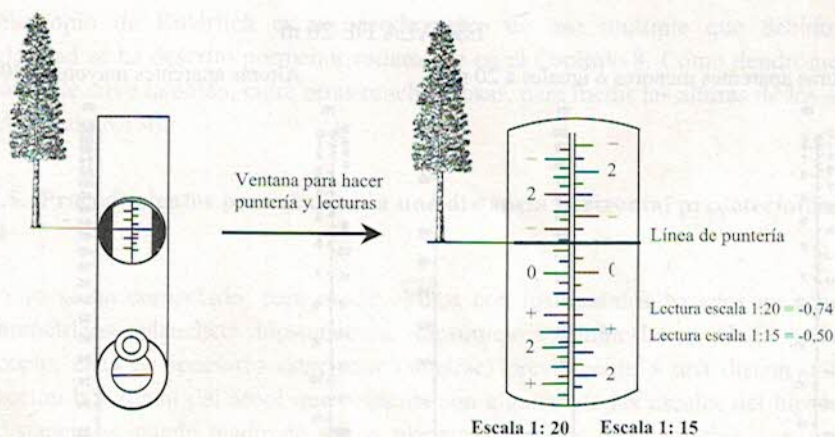


Figura 3.33. Ejemplo de visualización a la base para medir la altura de un árbol con el hipsómetro Suunto.

En el caso del árbol de las Figuras 3.32 y 3.33, suponiendo que el observador está situado a una distancia horizontal de 15 m, la altura total del árbol será $10,5 - (-0,5) = 11$ m.

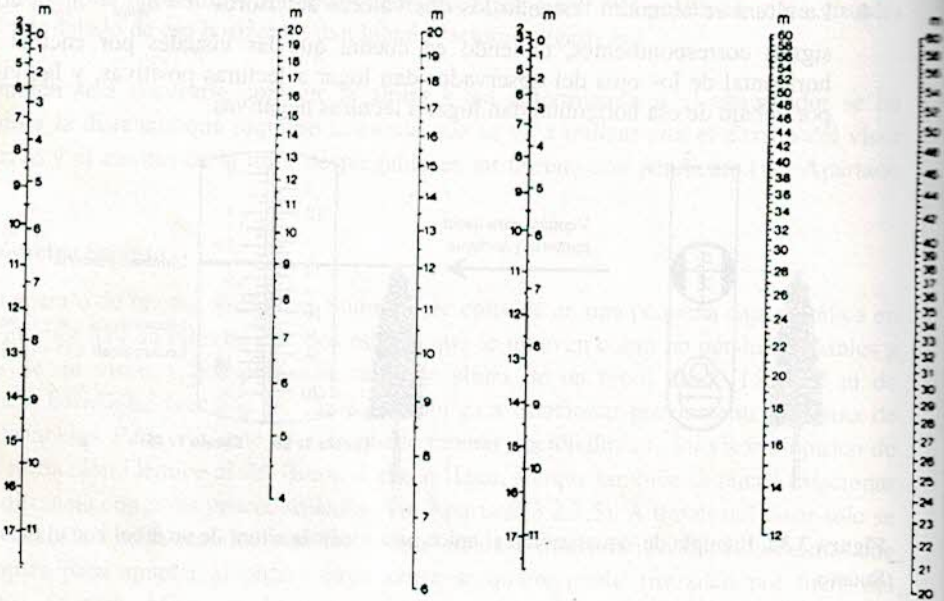
En el caso de que se haya estacionado en un terreno con pendiente a la distancia que requiere la escala que se va a utilizar mediante el empleo del visor dióptrico y su mira, la altura leída h se debe transformar en altura real h_{real} aplicando la corrección explicada en el Apartado 3.2.2.5.

También es posible realizar esa corrección mediante el empleo de unos ábacos que acompañan al aparato (Fig. 3.34).

ESCALA DE 15 m

Alturas aparentes menores o iguales a 20 m

Alturas aparentes mayores a 20 m



ESCALA DE 20 m

Alturas aparentes menores o iguales a 20 m

Alturas aparentes mayores a 20 m

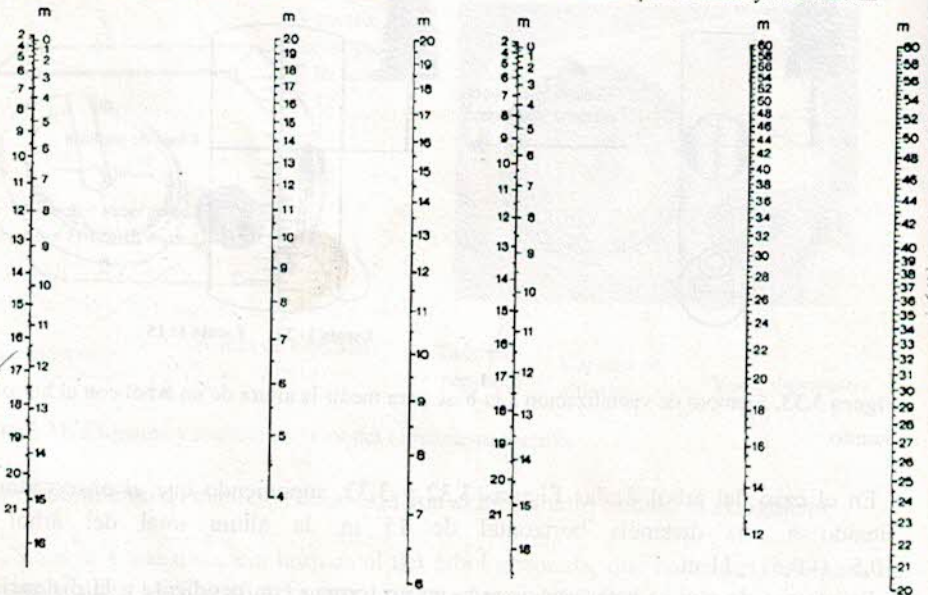


Figura 3.34. Ábacos para la corrección de la altura leída con el hipsómetro Suunto cuando se estaciona en terreno con pendiente a una de las distancias de las escalas del aparato con ayuda del visor dióptrico y su mira.

Existen cuatro ábacos diferentes, dos para la escala de 15 m (uno para árboles de alturas aparentes menores o iguales a 20 m y otro para árboles de alturas superiores) y otros dos para la escala de 20 m (uno para árboles de alturas aparentes menores o iguales a 20 m y otro para árboles de alturas superiores). Cada ábaco tiene tres líneas verticales graduadas en metros. La de la derecha representa la altura aparente o leída h , la central la altura real h_{real} y la de la izquierda representa la lectura en la base del árbol. Esta última tiene dos escalas diferentes, dependiendo de si la visual a la base está por debajo (en su parte izquierda) o por encima (en su parte derecha) de la horizontal (ver Fig. 3.34). Estas correcciones sólo serán necesarias cuando la pendiente del terreno es superior a 4° .

El procedimiento a emplear para utilizar los ábacos es el siguiente:

1. Escoger el gráfico adecuado en función de la escala empleada y de la altura aparente (mayor o menor de 20 m).
2. Marcar en la línea vertical de la izquierda la lectura obtenida en la base del árbol escogiendo la escala adecuada a la inclinación de la visual (por encima de la horizontal en la escala de la izquierda o por debajo en la escala de la derecha).
3. Marcar en la línea vertical de la derecha la altura aparente obtenida h .
4. Unir ambos puntos con una recta y la intersección con la línea vertical central indicará la altura real h_{real} .

Relascopio de Bitterlich

El relascopio de Bitterlich es un dendrómetro de uso múltiple que debido a su singularidad se ha descrito pormenorizadamente en el Capítulo 8. Como dendrómetro de uso múltiple sirve también, entre otras muchas cosas, para medir las alturas de los árboles (ver Apartado 8.1.4).

3.2.2.5. Procedimientos para situarse a una distancia horizontal predeterminada del árbol

Como ya se ha comentado, para medir alturas con los aparatos basados en principios trigonométricos (plancheta hipsométrica, hipsómetros Blume-Leiss, Haga y Suunto, relascopio, etc.) es necesario estacionar (situarse) previamente a una distancia fija en proyección horizontal del árbol que coincida con algunas de las escalas del hipsómetro. Esa distancia se puede medir de varias maneras: con una cinta métrica, con un visor dióptrico y una mira especial que traen algunos de estos aparatos, o mediante el uso de distanciómetros electrónicos.

En cualquier caso, siempre se puede medir la altura de un árbol desde una distancia que no corresponda a la de las escalas del aparato, siempre que sea conocida, con lo cual será necesario corregir la altura leída. Así, si el observador se encuentra a una distancia D_{real} del árbol (ver Fig. 3.35), pero utiliza la escala de medición del aparato correspondiente a una distancia D_{escala} , realmente estaría midiendo la altura A'B' correspondiente a un árbol aparente o ficticio situado a esa distancia D_{escala} , en vez de la altura AB del árbol real.

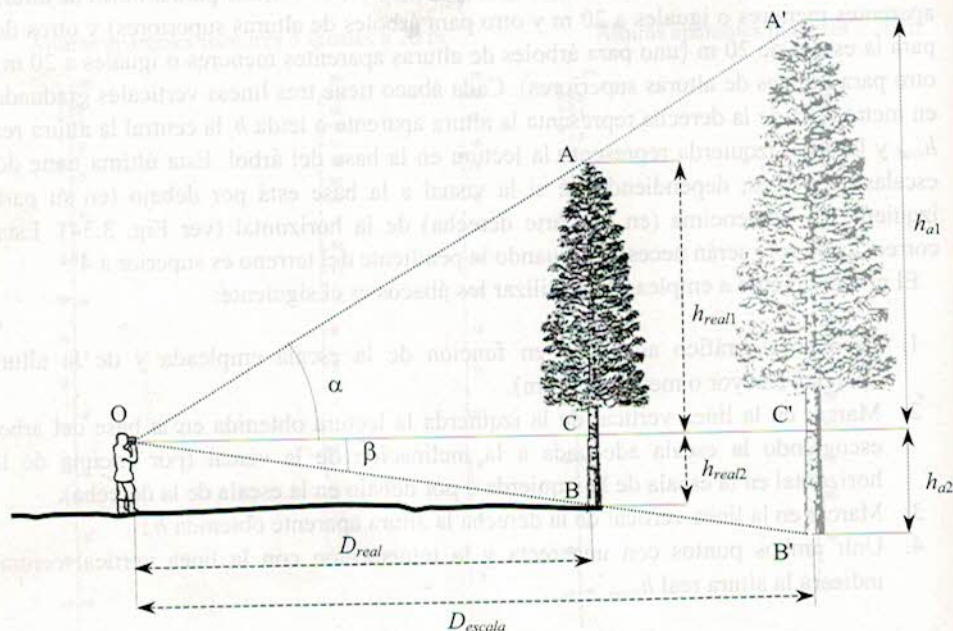


Figura 3.35. Procedimiento de corrección cuando se mide la altura del árbol desde una distancia horizontal distinta a la de las escalas del aparato.

En ese caso (Fig. 3.35), por semejanza de triángulos $\frac{OC}{AC} = \frac{OC'}{A'C'}$ y $\frac{OC}{CB} = \frac{OC'}{C'B'}$, por lo que:

$$h_{real1} = AC = \frac{OC}{OC'} \cdot A'C' \Rightarrow h_{real1} = \frac{D_{real}}{D_{escalas}} \cdot h_{a1}$$

$$h_{real2} = BC = \frac{OC}{OC'} \cdot B'C' \Rightarrow h_{real2} = \frac{D_{real}}{D_{escalas}} \cdot h_{a2}$$

Por tanto, la altura real h_{real} será:

$$h_{real} = h_{real1} + h_{real2} = \frac{D_{real}}{D_{escalas}} \cdot (h_{a1} + h_{a2}) = \frac{D_{real}}{D_{escalas}} \cdot A'B'$$

Es decir, se debe multiplicar la altura aparente leída (A'B') por el factor de corrección de las distancias $\frac{D_{real}}{D_{escalas}}$.

Por ejemplo, en el caso del árbol de las Figuras 3.32 y 3.33, y suponiendo que el observador se encontrase situado a una distancia horizontal del mismo de 20 m, la altura total sería $13,90 - (-0,74) = 14,64$ m. Por otra parte, la altura total leída en la escala 1:15 sería igual a $10,5 - (-0,5) = 11$ m, pero como se ha realizado esa lectura desde 20 m, es

necesario corregir este valor multiplicándolo por el factor de corrección $20/15=1,33$, con lo que la altura del árbol será de 14,64 m.

A continuación se explican los diferentes procedimientos para estacionar a una distancia horizontal predeterminada del árbol.

Empleo de una cinta métrica y un hipsómetro o un clinómetro

En terreno llano se puede emplear la cinta métrica para medir directamente la distancia horizontal correspondiente a la escala de alturas que se pretenda utilizar.

En el caso de terrenos con pendiente, lo más adecuado es medir directamente la distancia sobre una curva de nivel, o intentar mantener la cinta métrica horizontal elevándola o bajándola de un extremo para evitar la pendiente. Cuando no sea posible medir en línea de nivel ni realizar la corrección anterior será necesario medir la pendiente con un hipsómetro o un clinómetro y, en función de ella, estimar con calculadora o mediante tablas la distancia sobre el terreno D_{terreno} necesaria para estacionar a una distancia horizontal D igual a la de la escala que se vaya a emplear para medir la altura.

El procedimiento para situarse a una distancia horizontal predeterminada mediante el empleo de una cinta métrica y un hipsómetro o clinómetro es el siguiente (ver Fig. 3.36):

1. Colocarse a una distancia similar o mayor a la altura del árbol.
2. Medir el ángulo θ de la pendiente con un hipsómetro o clinómetro, lanzando para ello una visual paralela al terreno (OO'') y leyendo el valor del ángulo θ .
3. Calcular, con ayuda de una calculadora, el valor de D_{terreno} :

$$\cos \theta = \frac{D}{OO''} = \frac{D}{D_{\text{terreno}}} \Rightarrow D_{\text{terreno}} = \frac{D}{\cos \theta}$$

4. Medir la distancia D_{terreno} sobre el terreno con ayuda de una cinta métrica.

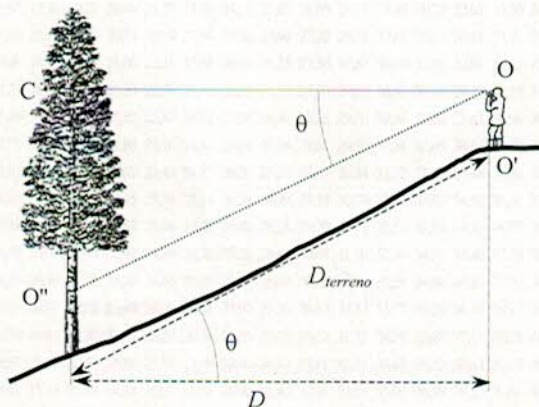


Figura 3.36. Método para situarse a una distancia horizontal predeterminada del árbol usando una cinta métrica y un hipsómetro o un clinómetro.

También se puede construir una tabla que proporcione la distancia real que es necesario medir sobre el terreno D_{terreno} para estacionar a una distancia horizontal del árbol predeterminada D , utilizando directamente el valor de la lectura de la pendiente (lanzando una visual "OO" paralela al terreno) realizada en alguna de las escalas de alturas de los hipsómetros basados en principios trigonométricos (ver Apartado 3.2.2.4).

Tablas similares se incluyen, por ejemplo, en el Segundo Inventario Forestal Nacional (ICONA, 1986), y la variable de entrada es la lectura de la pendiente del terreno realizada en la escala de los 20 m de un hipsómetro Blume-Leiss, Suunto, Haga, relascopio etc. (Tabla 3.2). La fórmula empleada para construir esta tabla se deduce de la siguiente manera (ver Fig. 3.36):

$$\cos\theta = \frac{D}{D_{\text{terreno}}} \Rightarrow D_{\text{terreno}} = \frac{D}{\cos\theta}$$

y como la lectura de la pendiente (L_{20}) que se realiza en la escala de los 20 m de los aparatos citados es igual a:

$$L_{20} = 20 \cdot \text{tg}\theta$$

entonces

$$D_{\text{terreno}} = \frac{D}{\cos\left(\arctg\left(\frac{L_{20}}{20}\right)\right)}$$

En el caso de que se quisieran construir otras tablas análogas para lecturas en otras escalas de los hipsómetros, bastaría con sustituir en la fórmula anterior los valores de 20 y L_{20} por los correspondientes a la de la nueva escala empleada.

Tabla 3.2. Valor de las distancias reales, en metros, a medir sobre el terreno para estacionar a una determinada distancia horizontal del árbol, también en metros, en función de la lectura de la pendiente del terreno realizada en la escala de los 20 m del Blume-Leiss, Haga, Suunto, relascopio, etc.

		DISTANCIAS HORIZONTALES (m)																																					
		10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	35	40															
LECTURA EN LA ESCALA DE 20 m DEL BLUME-LEISS, HAGA, SUUNTO, RELASCOPIO, ETC.	30	10,11	11,12	12,13	13,15	14,16	15,17	16,18	17,19	18,20	19,21	20,22	21,23	22,25	23,26	24,27	25,28	26,29	27,30	28,31	29,32	30,34	35,39	40,45															
	35	10,15	11,17	12,18	13,20	14,21	15,23	16,24	17,26	18,27	19,29	20,30	21,32	22,33	23,35	24,36	25,38	26,40	27,41	28,43	29,44	30,46	35,53	40,61															
	40	10,20	11,22	12,24	13,26	14,28	15,30	16,32	17,34	18,36	19,38	20,40	21,42	22,44	23,46	24,48	25,50	26,51	27,53	28,55	29,57	30,59	35,69	40,79															
	45	10,25	11,28	12,30	13,33	14,35	15,38	16,40	17,43	18,45	19,48	20,50	21,53	22,55	23,58	24,60	25,63	26,65	27,68	28,70	29,73	30,75	35,88	41,00															
	50	10,31	11,34	12,37	13,40	14,43	15,46	16,49	17,52	18,55	19,58	20,62	21,65	22,68	23,71	24,74	25,77	26,80	27,83	28,86	29,89	30,92	36,08	41,23															
	550	10,37	11,41	12,45	13,48	14,52	15,56	16,59	17,63	18,67	19,71	20,74	21,78	22,82	23,85	24,89	25,93	26,97	28,00	29,04	30,08	31,11	36,30	41,48															
	600	10,44	11,48	12,53	13,57	14,62	15,66	16,70	17,75	18,79	19,84	20,88	21,92	22,97	24,01	25,06	26,10	27,14	28,19	29,23	30,28	31,32	36,54	41,76															
	650	10,51	11,57	12,62	13,67	14,72	15,77	16,82	17,88	18,93	19,98	21,03	22,08	23,13	24,18	25,24	26,29	27,34	28,39	29,44	30,49	31,54	36,80	42,06															
	700	10,59	11,65	12,71	13,77	14,83	15,89	16,95	18,01	19,07	20,13	21,19	22,25	23,31	24,37	25,43	26,49	27,55	28,61	29,67	30,72	31,78	37,08	42,38															
	750	10,68	11,75	12,82	13,88	14,95	16,02	17,09	18,16	19,22	20,29	21,36	22,43	23,50	24,56	25,63	26,70	27,77	28,84	29,90	30,97	32,04	37,38	42,72															
	800	10,77	11,85	12,94	14,00	15,08	16,16	17,23	18,31	19,39	20,46	21,54	22,62	23,69	24,77	25,85	26,93	28,00	29,08	30,16	31,23	32,31	37,70	43,08															
	850	10,87	11,95	13,04	14,13	15,21	16,30	17,39	18,47	19,56	20,64	21,73	22,82	23,90	24,99	26,08	27,17	28,25	29,34	30,42	31,51	32,60	38,03	43,46															
	900	10,97	12,06	13,16	14,26	15,35	16,45	17,55	18,64	19,74	20,84	21,93	23,03	24,12	25,22	26,32	27,41	28,51	29,61	30,71	31,80	32,90	38,38	43,86															
	950	11,07	12,18	13,28	14,39	15,50	16,61	17,71	18,82	19,93	21,03	22,14	23,25	24,36	25,46	26,57	27,68	28,78	29,89	31,00	32,11	33,21	38,75	44,28															
	1000	11,18	12,30	13,42	14,53	15,65	16,77	17,89	19,01	20,12	21,24	22,36	23,48	24,60	25,71	26,83	27,95	29,07	30,19	31,30	32,42	33,54	39,13	44,72															
	105	11,29	12,42	13,55	14,68	15,81	16,94	18,07	19,20	20,33	21,46	22,59	23,72	24,85	25,98	27,11	28,24	29,37	30,49	31,62	32,75	33,88	39,53	45,18															
	110	11,41	12,55	13,70	14,84	15,98	17,12	18,26	19,40	20,54	21,68	22,83	23,97	25,11	26,25	27,39	28,53	29,67	30,81	31,96	33,10	34,24	39,94	45,65															
	115	11,54	12,69	13,84	15,00	16,15	17,30	18,46	19,61	20,76	21,92	23,07	24,22	25,38	26,53	27,68	28,84	29,99	31,15	32,30	33,45	34,61	40,37	46,14															
	120	11,66	12,83	13,99	15,16	16,33	17,49	18,66	19,83	20,99	22,16	23,32	24,49	25,66	26,82	27,99	29,15	30,32	31,49	32,65	33,82	34,99	40,82	46,65															
	125	11,79	12,97	14,15	15,33	16,51	17,69	18,87	20,05	21,23	22,41	23,58	24,76	25,94	27,12	28,30	29,48	30,66	31,84	33,02	34,20	35,38	41,27	47,17															
	130	11,93	13,12	14,31	15,50	16,70	17,89	19,08	20,28	21,47	22,66	23,85	25,05	26,24	27,43	28,62	29,82	31,01	32,20	33,40	34,59	35,78	41,74	47,71															
	135	12,06	13,27	14,48	15,68	16,89	18,10	19,30	20,51	21,72	22,92	24,13	25,34	26,54	27,75	28,96	30,16	31,37	32,58	33,78	34,99	36,19	42,23	48,26															
	140	12,21	13,43	14,65	15,87	17,09	18,31	19,53	20,75	21,97	23,19	24,41	25,63	26,85	28,08	29,30	30,52	31,74	32,96	34,18	35,40	36,62	42,72	48,83															
	145	12,35	13,59	14,82	16,06	17,29	18,53	19,76	21,00	22,23	23,47	24,70	25,94	27,17	28,41	29,64	30,88	32,11	33,35	34,58	35,82	37,05	43,23	49,41															
	150	12,50	13,75	15,00	16,25	17,50	18,75	20,00	21,25	22,50	23,75	25,00	26,25	27,50	28,75	30,00	31,25	32,50	33,75	35,00	36,25	37,50	43,75	50,00															
	155	12,65	13,92	15,18	16,45	17,71	18,98	20,24	21,51	22,77	24,04	25,30	26,57	27,83	29,10	30,36	31,63	32,89	34,16	35,42	36,69	37,95	44,28	50,61															
	160	12,81	14,09	15,37	16,65	17,93	19,21	20,49	21,77	23,05	24,33	25,61	26,89	28,17	29,45	30,73	32,02	33,30	34,58	35,86	37,14	38,42	44,82	51,22															
	165	12,96	14,26	15,56	16,85	18,15	19,45	20,74	22,04	23,34	24,63	25,93	27,22	28,52	29,82	31,11	32,41	33,71	35,00	36,30	37,60	38,89	45,37	51,86															
	170	13,12	14,44	15,75	17,06	18,37	19,69	21,00	22,31	23,62	24,94	26,25	27,56	28,87	30,19	31,50	32,81	34,12	35,44	36,75	38,06	39,37	45,94	52,50															
	175	13,29	14,62	15,95	17,27	18,60	19,93	21,26	22,59	23,92	25,25	26,58	27,90	29,23	30,56	31,89	33,22	34,55	35,88	37,21	38,53	39,86	46,51	53,15															
180	13,45	14,80	16,14	17,49	18,84	20,18	21,53	22,87	24,22	25,56	26,91	28,25	29,60	30,94	32,29	33,63	34,98	36,32	37,67	39,02	40,36	47,09	53,81																
185	13,62	14,98	16,35	17,71	19,07	20,43	21,80	23,16	24,52	25,88	27,24	28,61	29,97	31,33	32,69	34,06	35,42	36,78	38,14	39,50	40,87	47,68	54,49																
190	13,79	15,17	16,55	17,93	19,31	20,69	22,07	23,45	24,83	26,21	27,59	28,97	30,34	31,72	33,10	34,48	35,86	37,24	38,62	40,00	41,38	48,28	55,17																
195	13,97	15,36	16,76	18,16	19,55	20,95	22,35	23,74	25,14	26,54	27,93	29,33	30,73	32,12	33,52	34,92	36,31	37,71	39,11	40,50	41,90	48,88	55,87																
200	14,14	15,56	16,97	18,38	19,80	21,21	22,63	24,04	25,46	26,87	28,28	29,70	31,11	32,53	33,94	35,36	36,77	38,18	39,60	41,01	42,43	49,50	56,57																
205	14,32	15,75	17,18	18,62	20,05	21,48	22,91	24,34	25,78	27,21	28,64	30,07	31,50	32,94	34,37	35,80	37,23	38,66	40,10	41,53	42,96	50,12	57,28																
210	14,50	15,95	17,40	18,85	20,30	21,75	23,20	24,65	26,10	27,55	29,00	30,45	31,90	33,35	34,80	36,25	37,70	39,15	40,60	42,05	43,50	50,75	58,00																
215	14,68	16,15	17,62	19,09	20,55	22,02	23,49	24,96	26,43	27,90	29,36	30,83	32,30	33,77	35,24	36,71	38,17	39,64	41,11	42,58	44,05	51,39	58,73																
220	14,87	16,35	17,84	19,33	20,81	22,30	23,79	25,27	26,76	28,25	29,73	31,22	32,71	34,19	35,68	37,17	38,65	40,14	41,62	43,11	44,60	52,03	59,46																
225	15,05	16,56	18,06	19,57	21,07	22,58	24,08	25,59	27,09	28,60	30,10	31,61	33,11	34,62	36,12	37,63	39,14	40,64	42,15	43,65	45,16	52,68	60,21																
230	15,24	16,76	18,29	19,81	21,34	22,86	24,38	25,91	27,43	28,96	30,48	32,00	33,53	35,05	36,58	38,10	39,62	41,15	42,67	44,20	45,72	53,34	60,96																
235	15,43	16,97	18,52	20,06	21,60	23,14	24,69	26,23	27,77	29,32	30,86	32,40	33,94	35,49	37,03	38,57	40,12	41,66	43,20	44,74	46,29	54,00	61,72																
240	15,62	17,18	18,74	20,31	21,87	23,43	24,99	26,55	28,12	29,68	31,24	32,80	34,37	35,93	37,49	39,05	40,61	42,18	43,74	45,30	46,86	54,67	62,48																
245	15,81	17,39	18,98	20,56	22,14	23,72	25,30	26,88	28,46	30,05	31,63	33,21	34,79	36,37	37,95	39,53	41,11	42,70	44,28	45,86	47,44	55,25	63,25																
250	16,01	17,61	19,21	20,81	22,41	24,01	25,61	27,21	28,81	30,41	32,02	33,62	35,22	36,82	38,42	40,02	41,62	43,22	44,82	46,42	48,02	56,03	64,03																

Empleo de un visor dióptrico y su mira

La distancia horizontal de estacionamiento para medir la altura de un árbol se puede obtener teleméricamente por medio del visor dióptrico que incorporan, de forma opcional, los hipsómetros Blume-Leiss, Haga y Suunto, con el auxilio de una mira especial.

Un visor dióptrico es una lente prismática en cuyo eje vertical u horizontal hacen contacto dos medios con distinta refracción (vidrio y aire), lo que provoca una desviación de las imágenes reales bajo un ángulo constante θ , que en el caso de los hipsómetros Blume-Leiss, Suunto y Haga es de 3 dioptrías. Esta propiedad se puede emplear para estacionar a una distancia conocida de un objeto. Así, al visar a un objeto situado en un punto A a través de un visor dióptrico desde una distancia D , se observará su imagen real y una imagen duplicada A' situada a una distancia l sobre la vertical de la imagen A (Fig. 3.37), formada bajo el ángulo θ característico del visor.

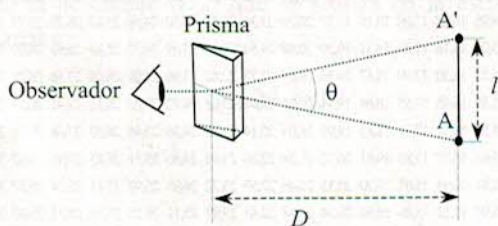


Figura 3.37. Esquema del principio de funcionamiento del visor dióptrico.

Además, existe la siguiente relación entre la distancia vertical l de separación entre ambas imágenes, real y duplicada, y la distancia D que separa el visor dióptrico del punto A:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{l/2}{D} \Rightarrow l = 2 \cdot D \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Para ángulos pequeños se cumple que $\operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) \approx \frac{\operatorname{tg}\theta}{2}$, por lo que $2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) \approx \operatorname{tg}\theta$, quedando la siguiente expresión:

$$l \approx D \cdot \operatorname{tg}\theta$$

es decir, el desplazamiento provocado por el visor dióptrico es proporcional a la distancia a la que esté localizado el objeto, y la constante de proporcionalidad es la tangente del ángulo θ cuyo valor depende del número de dioptrías de la lente:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{\text{n}^\circ \text{ dioptrías}}{100}$$

Como se ha comentado anteriormente, los visores dióptricos de los hipsómetros forestales citados tienen 3 dioptrías, y la constante de proporcionalidad vale por tanto

$\text{tg}\theta = \frac{3}{100} = 0,03$, por lo que se puede aplicar la propiedad indicada para ángulos pequeños y obtener el valor de l como:

$$l = D \cdot 0,03$$

De este modo, cuando por ejemplo se observa un objeto desde 20 m utilizando el visor dióptrico, la separación entre la imagen real y la duplicada sería de 60 cm.

Los aparatos que incorporan estos visores vienen acompañados por una mira desplegable con tramos de color negro y con unas marcas blancas que sirven de referencia, que permiten estacionar a distancias de 15, 20, 30 y 40 m de un árbol (Fig. 3.38).



Figura 3.38. Mira desplegable que incluyen los modelos con visor dióptrico de los hipsómetros Blume-Leiss, Haga y Suunto.

La longitud entre las marcas blancas de la mira se puede variar para obtener el valor adecuado a la distancia a la que se pretende estacionar, aplicando la relación anterior entre distancia y separación de imágenes. Así, para las distancias que corresponden a las escalas más frecuentes de los hipsómetros, la separación entre las marcas blancas son las que aparecen en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Longitudes entre las marcas blancas de la mira necesarias para medir distancias en proyección horizontal correspondientes a las escalas de medición de alturas de los hipsómetros con visor dióptrico.

Distancia horizontal (D)	Longitud de mira ($l = D \cdot 0,03$)
15 m	45 cm
20 m	60 cm
30 m	90 cm
40 m	120 cm

De esta manera, si se sitúa la mira sobre el tronco del árbol, desplegada con la longitud adecuada a la distancia a la que se quiere estacionar, y de modo que el centro de la mira quede a la altura de la vista del observador, al lanzar una visual a través del visor dióptrico se observará la imagen real (MN) y la imagen duplicada (M'N') (ver Fig. 3.39). A medida que se aleje el observador del árbol, ambas imágenes se separarán, de manera que aumentará la distancia MM'.

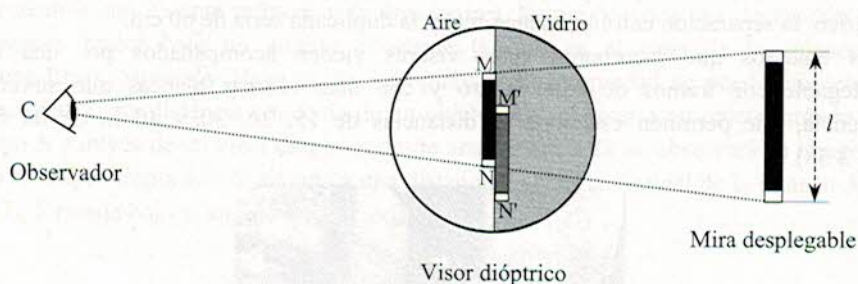


Figura 3.39. Esquema del duplicado de la imagen de la mira visando a través del visor dióptrico, cuando el observador se encuentra a una distancia de la mira menor que $D = l/0,03$.

Cuando el observador se sitúe exactamente a la distancia D del árbol, entonces el desplazamiento de la imagen producida tendrá un valor equivalente a la longitud l de la mira, por lo que el extremo superior de la imagen duplicada de la mira coincidirá con el extremo inferior de la imagen real de la mira, tal y como aparece en la Figura 3.40.

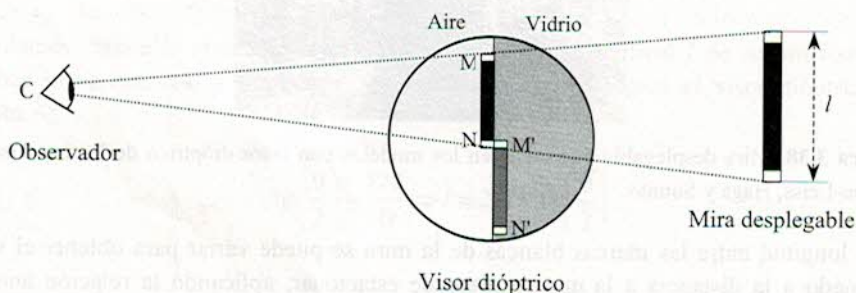


Figura 3.40. Imagen que se observa a través del visor dióptrico cuando el observador se encuentra situado a una distancia $D = l/0,03$ de la mira.

Según todo lo indicado, el procedimiento operativo para situarse a una distancia predeterminada del árbol consta de los siguientes pasos:

1. Colocar sobre el árbol la mira desplegada, de tal forma que su punto medio quede a la altura de los ojos del observador, utilizando para ello el clavo con rosca que trae el aparato. La longitud l entre las marcas blancas de la mira debe ser la adecuada a la distancia D al árbol a la que se pretende estacionar ($l = 0,03 \cdot D$).
2. Alejarse del árbol hasta situarse a una distancia aproximada a la deseada.
3. Lanzar una visual a la mira a través del visor dióptrico, acercándose al árbol si se observa lo indicado en el caso a) de la Figura 3.41, o alejándose si se observa el

caso b) de dicha figura, hasta hacer coincidir la banda inferior blanca de la imagen real de la mira con la banda superior blanca de la imagen duplicada de la misma, caso c) de la Figura 3.41.

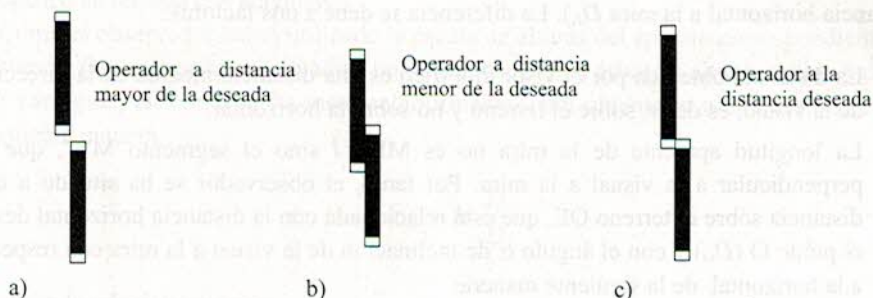


Figura 3.41. Esquema de las imágenes que se observan a través del visor dióptrico según el observador esté situado a una distancia mayor (a), menor (b) o igual (c) a la deseada.

El visor dióptrico permite al observador situarse de forma precisa a una distancia conocida, pero medida en la dirección que marca la visual a la mira. Por tanto, cuando esa dirección es horizontal, la distancia estará medida sobre la horizontal, pero en terreno con pendiente la visual no será horizontal y, por tanto, la distancia medida tampoco lo será. Por esa razón, las alturas medidas cuando se estaciona en terreno con pendiente utilizando el visor dióptrico necesitan ser corregidas.

La expresión matemática de la corrección que se debe aplicar en ese caso a la altura leída h para obtener la altura real h_{real} se deduce a continuación. Supóngase que se ha colocado en un árbol una mira de longitud $l = MN$ tal como se aprecia en la Figura 3.42.

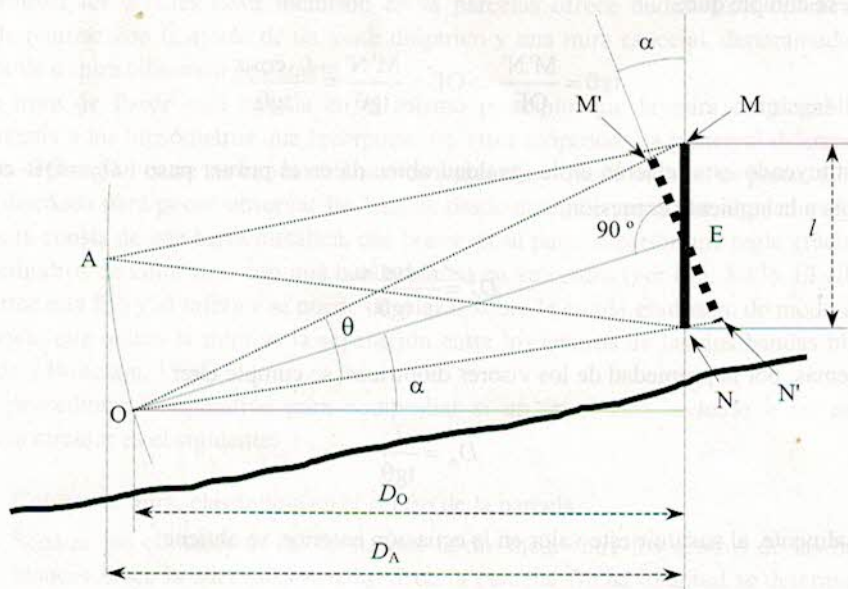


Figura 3.42. Esquema del que se deducen las correcciones necesarias cuando se emplea el visor dióptrico y su mira en un terreno con pendiente.

Si siguiendo el procedimiento descrito anteriormente para estacionar a una cierta distancia con el visor dióptrico, un observador se desplazaría hasta el punto O sobre el terreno (distancia horizontal D_O). Si el terreno hubiese sido llano se habría situado en el punto A (distancia horizontal a la mira D_A). La diferencia se debe a dos factores:

1. La distancia obtenida por el visor dióptrico es una distancia medida en la dirección de la visual, es decir, sobre el terreno y no sobre la horizontal.
2. La longitud aparente de la mira no es $MN = l$ sino el segmento $M'N'$, que es perpendicular a la visual a la mira. Por tanto, el observador se ha situado a una distancia sobre el terreno OE, que está relacionada con la distancia horizontal desde el punto O (D_O) y con el ángulo α de inclinación de la visual a la mira con respecto a la horizontal de la siguiente manera:

$$\cos\alpha = \frac{D_O}{OE} \Rightarrow D_O = OE \cdot \cos\alpha$$

Además, entre la longitud real de la mira $MN = l$, la longitud aparente $M'N'$ y el ángulo α de inclinación de la visual a la mira con respecto a la horizontal, existe la siguiente relación:

$$\cos\alpha = \frac{M'N'/2}{MN/2}, \text{ como } MN = l \text{ (longitud de la mira)} \Rightarrow M'N' = l \cdot \cos\alpha$$

Por otro lado, al haber utilizado el visor dióptrico con una longitud de mira aparente $M'N'$, se cumple que:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{M'N'}{OE} \Rightarrow OE = \frac{M'N'}{\operatorname{tg}\theta} = \frac{l \cdot \cos\alpha}{\operatorname{tg}\theta}$$

Sustituyendo esta relación en la igualdad obtenida en el primer paso ($D_O = OE \cdot \cos\alpha$) se llega a la siguiente expresión:

$$D_O = \frac{l \cdot \cos^2\alpha}{\operatorname{tg}\theta}$$

Además, por la propiedad de los visores dióptricos, se cumple que:

$$D_A = \frac{l}{\operatorname{tg}\theta}$$

Finalmente, al sustituir este valor en la ecuación anterior, se obtiene:

$$D_O = D_A \cdot \cos^2\alpha$$

relación existente entre la correcta distancia horizontal si el terreno fuese llano D_A y la distancia horizontal D_O a la que se sitúa un observador cuando se emplea el visor dióptrico en terreno con pendiente.

Como el observador habrá utilizado la escala de alturas del aparato correspondiente a la distancia D_A , pero se habrá situado a una distancia D_O del árbol, la altura medida h deberá ser corregida, tal como se ha visto anteriormente, para obtener la altura real h_{real} , de la siguiente manera:

$$h_{real} = h \cdot \frac{D_O}{D_A}$$

y según la relación anterior:

$$h_{real} = h \cdot \cos^2 \alpha$$

Por tanto, cuando se usa el visor dióptrico para estacionar en pendiente, la altura real se calcula multiplicando la altura aparente o leída por el coseno al cuadrado del ángulo que forma la visual con la horizontal. Esta corrección se debe aplicar únicamente cuando la pendiente del terreno es superior a 4° (Pita, 1984), y como ya se ha comentado, algunos aparatos, como el Blume-Leiss y el Suunto, poseen tablas o ábacos para facilitar su aplicación (ver Apartado 3.2.2.4).

Por otra parte, el visor dióptrico se puede emplear también para el replanteo sobre el terreno de parcelas circulares. Cuando se emplean este tipo de parcelas en la realización de un inventario forestal, el objetivo no es establecer los límites del círculo, sino determinar los árboles cuya inclusión en la parcelas ofrece dudas. Esta operación se puede realizar con la ayuda de un visor dióptrico y una mira especial, denominada mira de Pardé o mira cilíndrica deslizante.

La mira de Pardé está basada en el mismo principio que la mira desplegable que acompaña a los hipsómetros que incorporan un visor dióptrico. La principal diferencia es que la separación entre las bandas blancas es regulable y que la mira no es plana, sino que está diseñada para poder observar las bandas desde cualquier posición alrededor de ella. La mira consta de una barra metálica, que posee en su parte superior una regla graduada y dos cilindros de color rojo con una banda blanca en su centro (ver Fig. 3.43). El cilindro superior está fijo y el inferior se puede desplazar sobre la escala graduada, de modo que la distancia que marca la mira es la separación entre los centros de las dos bandas blancas (Pardé y Bouchon, 1994).

El procedimiento operativo para comprobar si un árbol está incluido o no en una parcela circular es el siguiente:

1. Colocar la mira, clavándola en el centro de la parcela.
2. Separar los cilindros de tal forma que la distancia entre los centros de las bandas blancas L sea la adecuada al radio R de la parcela. Dicha longitud se determina en función de la constante de proporcionalidad de los visores dióptricos:
 $L = R \cdot \text{tg}\theta = R \cdot 0,03$.

Situarse a un lado del árbol dudoso y lanzar una visual a la mira a través del visor dióptrico, pudiéndose dar alguna de las tres situaciones descritas en la Figura 3.44.

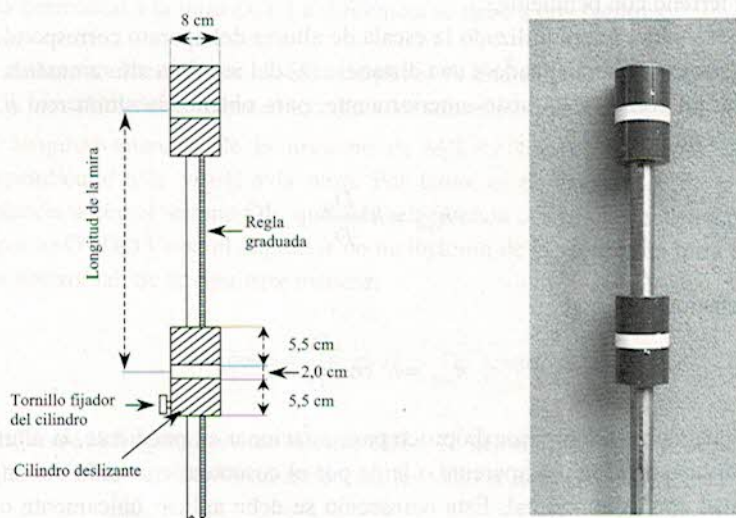


Figura 3.43. Esquema y aspecto de la mira de Pardé o mira cilíndrica deslizable.

- | | | |
|--|--|---|
| a) | b) | c) |
| <p>El árbol está situado a una distancia inferior al radio de la parcela y, por tanto, debe medirse.</p> | <p>El árbol está situado justo en el límite de la parcela.</p> | <p>El árbol está situado más allá del límite de la parcela y, por tanto, no debe medirse.</p> |

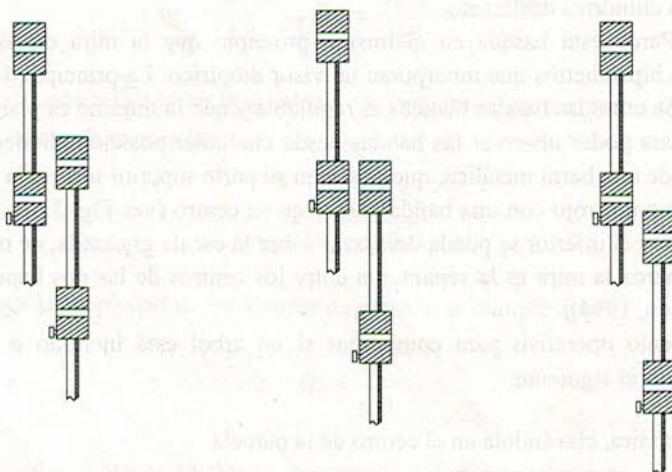


Figura 3.44. Esquema de las tres situaciones posibles al visualizar la mira de Pardé desde un árbol cuya posición con respecto al límite de la parcela se pretende conocer.

En el caso de los árboles dudosos (b), se podría realizar una comprobación con cinta métrica, si bien es habitual medir uno de cada dos árboles que se encuentren en esta situación.

Empleo de un distanciómetro electrónico

La aparición reciente de los distanciómetros electrónicos ha permitido mejorar sustancialmente la precisión, funcionalidad y rapidez del método clásico de medición de distancias con cinta métrica. Entre todos los modelos existentes en el mercado destacan, por sus buenas características, los distanciómetros láser, que poseen la ventaja de poder medir distancias con gran precisión sin necesidad de prismas de reflexión.

La medición se logra haciendo rebotar el rayo láser en cualquier cuerpo, independientemente de su solidez, textura e inclinación.

En general, se trata de instrumentos de muy reducido peso y tamaño que pueden ser usados por una sola persona, lo que permite ahorrar hasta un 40 % de tiempo y dinero en comparación con otros métodos convencionales de medición de distancias, como el empleo de la cinta métrica. Su alcance oscila entre los 50 y 500 m, dependiendo del aparato.

Ejemplos de estos distanciómetros son los modelos Disto Classic, Disto Memo y Disto Pro de la marca Leica (Fig. 3.45), que utilizan un haz de láser visible para la puntería y poseen una gran variedad de funciones incorporadas (cálculos básicos como sumas o restas, medición de áreas y volúmenes, promedio de mediciones, memoria de almacenamiento de los últimos valores de distancias, mediciones continuas, posibilidad de volcado de datos a un ordenador, etc.). Estos aparatos poseen un rango de medición de entre 30 cm y más de 100 m, que se puede considerar adecuado para muchas otras operaciones forestales, tales como replanteo de mallas y parcelas de inventario, croquización de masas, etc., y una precisión de hasta $\pm 1,5$ mm en el caso del modelo Disto Pro (Leica, 2000).

Existen otros muchos aparatos en el mercado basados en tecnología láser con prestaciones y precisiones similares, como por ejemplo los modelos de las series Impulse 100 y 200 de la casa Láser Technology Inc., o el modelo PH 30 de la marca Laseroptronix.

Otro ejemplo de distanciómetro es el modelo DME 201, de la marca Haglöf (Fig. 3.45), basado en tecnología de ultrasonidos. Este aparato se utiliza para obtener la distancia conjuntamente con los emisores de ultrasonidos tipo 1 o tipo 2 del Vertex Forestor o el emisor multifuncional del Vertex III (ver Apartado 3.2.2.6) y consiguen un alcance de 20 m, o más si las condiciones ambientales son adecuadas. La gran ventaja de este distanciómetro con respecto a los basados en tecnología láser, es que no es necesaria la visión directa entre los puntos del emisor y del receptor, es decir, se puede medir a través de vegetación (matorrales, follaje, etc.) con errores inferiores al 1 %.



Figura 3.45. Aspecto de algunos modelos de distanciómetro. Fotos: Leica (2000) y Häglöf (2000).

Hay que tener en cuenta que las distancias que se miden con estos aparatos son siempre en la dirección de las visuales, por lo que será necesario realizar una corrección de la distancia cuando el observador se encuentre en un terreno en pendiente (ver Apartado 3.2.2.5).

3.2.2.6. Aparatos que permiten situarse a una distancia cualquiera conocida

Los aparatos que utilizan estos métodos son los clinómetros, el nivel de Abney y los hipsómetros electrónicos de reciente aparición basados en impulsos ultrasónicos o láser (Vertex Forestor, Vertex III, Vertex Laser, LHP 1, Lem 300, Forest Pro, Criterion 400, etc.).

Existen también otros aparatos que se basan en estos métodos, como el tele-relascopio, que se describe en el Apartado 8.3.3 y el Barr-Stroud. Este último aparato es un telémetro que se usa como dendrómetro de uso múltiple. Para la medición de las alturas proporciona el valor del seno de los ángulos de las visuales con la horizontal; su utilización muy compleja y actualmente ya no se fabrica.

De los clinómetros se habla en el Apartado 3.6, en el que se trata de la medición de la pendiente, por lo que a continuación se explica el funcionamiento de los restantes aparatos citados.

Nivel de Abney

Es un instrumento usado en ingeniería que consiste en un tubo cuadrado y hueco que se emplea como elemento de puntería, en cuyo interior hay un espejo que permite leer el ángulo de inclinación de la visual con respecto a la horizontal en una escala de grados o porcentaje (Fig. 3.46). No es un hipsómetro, es decir, no tiene escalas para medir alturas directamente, sino que es necesario transformar los ángulos leídos en las visuales al ápice y a la base del árbol para obtener la altura.

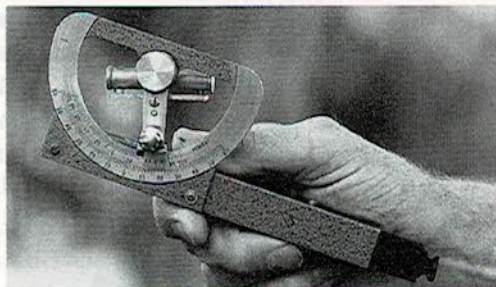
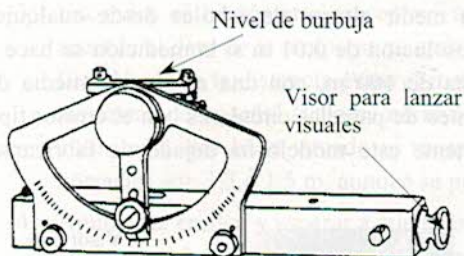


Figura 3.46. Nivel de Abney. Foto: Brack (1999).

El procedimiento de medición es el siguiente:

1. Situarse en un punto desde el que se aprecie el ápice y la base del árbol y medir la distancia horizontal que hay desde el punto de estacionamiento hasta el árbol (D).
2. Lanzar una visual al ápice del árbol y leer el ángulo que forma la visual con la horizontal (α).
3. Lanzar una visual a la base del árbol y leer el ángulo que forma la visual con la horizontal (β).
4. Calcular la altura del árbol según lo explicado en el Apartado 3.2.2.4, dependiendo de la posición del operador respecto a la base y el ápice del árbol.

Hipsómetro Vertex Forestor

Se trata de un hipsómetro digital fabricado por la firma sueca Haglöf, que funciona mediante impulsos ultrasónicos, y que consta de dos unidades: una unidad de medición (receptor) y un emisor de impulsos o Transponder, que puede ser de dos tipos: tipo 1 y tipo 2 (ver Figuras 3.47 y 3.48).

Este hipsómetro es de forma prismática, con unas dimensiones de $113 \times 52 \times 47$ mm y un peso de 215 gramos. En su zona frontal se encuentran situados el receptor de ultrasonidos, el sensor de temperatura y la ventana de salida del visor. En su parte posterior están situados la ventana para visar el árbol a medir, y un compartimento que almacena dos pilas de 1,5 voltios con las que funciona el aparato. En la cara superior presenta cuatro botones pulsadores, el botón de encendido o apagado ON/OFF, los botones UNDO y STEP, cuyas funciones se verán más adelante, y un botón rojo para realizar las mediciones. En uno de sus laterales presenta una pantalla de cristal líquido, en la que se muestran los parámetros de medición, y el transmisor de infrarrojos (transmisor IR) para transferir los datos a otro aparato o a un ordenador (ver Fig. 3.47).

El emisor tipo 1, con forma de pequeña caja y color azul, permite realizar mediciones apuntando desde el aparato hasta su cara frontal, con una amplitud horizontal de 60° , e incorpora pinchos metálicos retráctiles que al extraerlos activan el receptor y permiten fijarlo al árbol. El emisor tipo 2 presenta una forma cilíndrica de color naranja y permite la emisión de los impulsos hacia cualquier posición (cubre 360° de amplitud horizontal), situándolo sobre un jalón soporte que se puede adquirir con el aparato. La activación del emisor se consigue al colocarlo sobre el jalón, que presiona un botón en su parte inferior (Haglöf, 1996).

El Vertex Forestor puede utilizarse para medir alturas de árboles desde cualquier distancia menor de 40-45 m, teniendo una resolución de 0,01 m si la medición se hace a menos de 20 m. Permite medir alturas hasta de 100 m, con una resolución media de 0,1 m. Puede emplearse también en el replanteo de parcelas circulares con el emisor tipo 2, y como medidor de distancias. Actualmente este modelo ha dejado de fabricarse, siendo sustituido por el Vertex III.

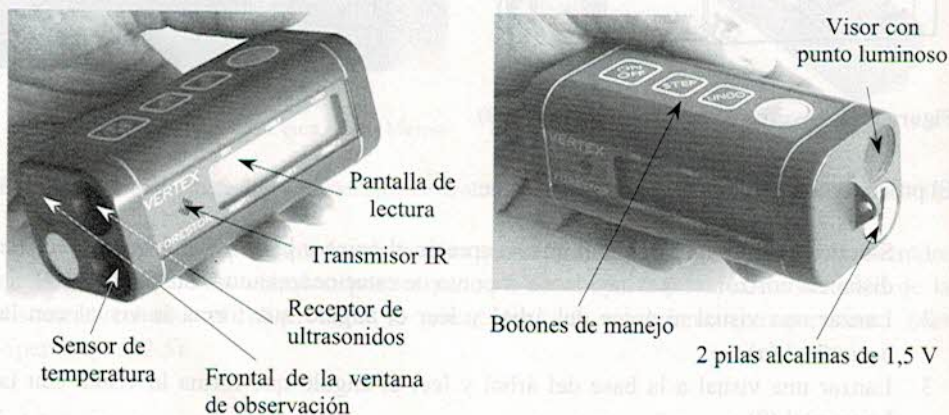


Figura 3.47. Aspecto del hipsómetro Vertex Forestor.

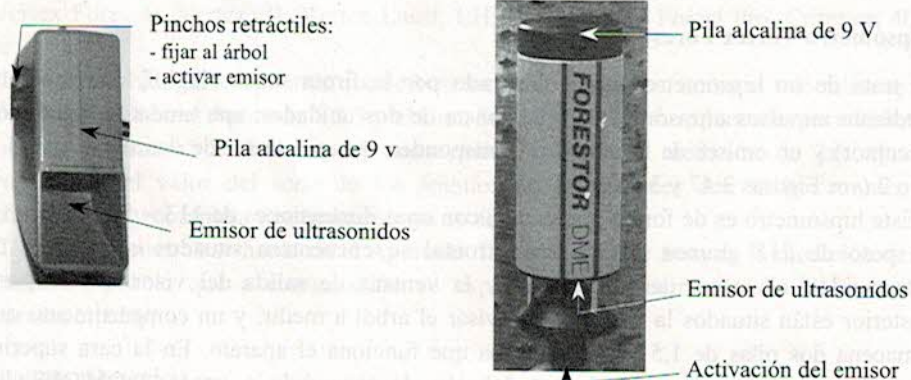


Figura 3.48. Aspecto de los Transponder o emisores tipo 1 (izquierda) y tipo 2 (derecha) del Vertex Forestor.

Se pueden distinguir dos procedimientos distintos de medición según se emplee o no el emisor de ultrasonidos (Häglof, 1996).

El procedimiento de medición de alturas usando emisor es el siguiente:

1. Activar el emisor (la forma de hacerlo depende del tipo de emisor empleado).
2. Colocar el emisor en el árbol a una altura prefijada (generalmente 1,3 m sobre su base).

3. Encender el hipsómetro (receptor) apretando el botón ON/OFF. En la pantalla aparece el dato de la temperatura ambiente y dos valores: *Pivot offset* y *TRP height*. El primero es la distancia entre el instrumento y un punto virtual donde convergen las líneas de la señal (valores normales son 0,3 ó 0,4 m) y el segundo debe ser la altura a la que haya situado el receptor con respecto al nivel del suelo (valores normales son 1,3 ó 1,5 m, aunque se pueden variar a criterio del operario).
4. Apuntar al emisor y esperar a que aparezca en el visor un punto luminoso. Mantener apretado el botón rojo de la parte superior del aparato hasta que el punto luminoso del visor desaparezca por un instante (3-4 segundos, aproximadamente). En ese momento en la pantalla aparecen tres valores: distancia sobre el terreno, ángulo que forma la visual con la horizontal y distancia horizontal entre el emisor y el receptor. Se debe comprobar que los datos sean coherentes, y en caso contrario se debe repetir el proceso.
5. Apuntar al ápice del árbol a través del visor. Pulsar el botón rojo de la parte superior hasta que el punto luminoso del visor desaparezca (1-2 segundos). En la pantalla se muestra una primera medición (*height 1*), que representa la altura desde el suelo al punto visado, ya que el aparato suma automáticamente *TRP height*, que es la distancia entre el receptor y el suelo. El Vertex permite registrar hasta tres alturas consecutivas medidas sobre el mismo árbol.

Las mediciones del hipsómetro Vertex pueden ser transferidas directamente a forcímulas electrónicas tipo Mantax o Mantax Digitech, suponiendo una ventaja operacional ya que posteriormente se puede descargar toda la información conjuntamente (diámetros y alturas) a un ordenador. También se pueden transferir los datos del hipsómetro directamente a una agenda electrónica u ordenador equipados con un receptor de infrarrojos (modelo Forestor IR-6 ó IR-7).

Aunque se pierde gran parte de la ventaja operacional de este hipsómetro, también se puede medir la altura sin emplear el emisor de ultrasonidos. El procedimiento de medición de alturas es, entonces, el siguiente:

1. Marcar sobre el árbol a medir un punto de altura conocida (usualmente 1,30 m) y que sea visible desde el lugar donde se va a medir.
2. Situarse en un punto desde el que se vea bien el ápice del árbol, y medir la distancia desde dicho punto hasta la referencia marcada en el árbol (distancia sobre el terreno).
3. Encender el hipsómetro pulsando el botón ON/OFF y comprobar los valores de temperatura, *Pivot offset* y *TRP height* (este último debe hacerse coincidir con la altura del punto de referencia marcado sobre el árbol).
4. Presionando el botón rojo, el aparato solicitará que se introduzca el valor de la distancia medida en el paso 2, *Manual distance*, para lo cual aparecerán en la pantalla tres dígitos, incluido un decimal. Inicialmente aparece un cursor intermitente sobre el dígito de las decenas, que permite cambiar su valor empleando para ello los botones STEP (cuenta hacia delante) y UNDO (cuenta hacia atrás). Una vez que se ha puesto el valor correcto de las decenas se pulsa el botón rojo de

la parte superior del aparato para confirmar y el cursor pasa al dígito de las unidades, que se modifica de la misma forma, y posteriormente al de los decimales.

5. Lanzar una visual a través del visor al punto marcado en el árbol y apretar el botón rojo durante uno o dos segundos, hasta que el punto luminoso desaparezca por un instante. En la pantalla aparecerá la distancia que el observador ha introducido, el ángulo y la pendiente entre la horizontal y el punto de referencia, y la distancia horizontal desde el observador al árbol.
6. Apuntar al ápice del árbol a través del visor. Pulsar el botón rojo de la parte superior hasta que el punto luminoso del visor desaparezca (1-2 segundos aproximadamente). En la pantalla se mostrará una primera medición *height 1*, que representa la altura desde el suelo al punto visado.

Es necesario tener en cuenta que este aparato determina la distancia mediante impulsos ultrasónicos, y la velocidad del sonido en el aire depende de varios factores como la temperatura, el grado de humedad y la presión atmosférica. El instrumento está calibrado para unos valores estándar de dichas variables, y además lleva incorporado un sensor, mediante el cual se corrige automáticamente la influencia de la temperatura. Es muy importante esperar a que el sensor determine la temperatura ambiente antes de calibrar el aparato o proceder a realizar mediciones, por lo que se aconseja esperar entre 10 y 15 minutos antes de realizar lecturas cuando el aparato se ha transportado en fundas o bolsas. En caso contrario, el error en una medición de 10 m es aproximadamente de 2 cm por cada grado centígrado de diferencia entre la temperatura del sensor y la temperatura ambiental.

Una vez que se ha estabilizado la temperatura, se puede proceder a calibrar el hipsómetro. Para ello, se coloca el receptor a una distancia horizontal del emisor múltiplo de 10 m (10, 20, 30 ó 40 m) medida con ayuda de una cinta métrica. Una vez situados a dicha distancia se activa el aparato y se apunta al emisor presionando ON/OFF y simultáneamente el botón UNDO hasta que aparezca sobre la pantalla la distancia de calibración a la que haya estacionado el observador.

Si es necesario actualizar los valores *Pivot offset* y *TRP height*, hay que encender el aparato pulsando simultáneamente los botones ON/OFF + UNDO y aumentar o disminuir los datos con los botones STEP y UNDO respectivamente; los valores se fijan pulsando el botón rojo.

Por otra parte, es necesario que la pantalla del hipsómetro esté en un plano totalmente vertical, para que el ángulo de inclinación que registre el aparato sea correcto.

Hipsómetro Vertex III

Es un modelo posterior al Vertex Forestor, pero con el mismo principio de funcionamiento. También consta de dos unidades: el Vertex III o unidad de medición (receptor) y el emisor o Transponder III (ver Fig. 3.49). La unidad de medición es muy ligera (160 gramos), de aluminio y en forma de paralelepípedo de 80 × 50 × 30 mm (ver Fig. 3.50). En uno de sus extremos lleva el visor con un puntero en forma de cruz luminosa, un transmisor de infrarrojos (IR) y la tapa de la pila alcalina de 1,5 voltios que proporciona energía al aparato; en el otro extremo lleva un sensor de temperatura, un receptor de ultrasonidos y el frontal de la ventana para visar. En la cara superior lleva tres

botones (ON, IR, DME) y en una de sus caras laterales incorpora una pantalla de cristal líquido de alto contraste en la que se presentan los parámetros de medición: distancia, ángulo visado o altura (Häglof, 1999).

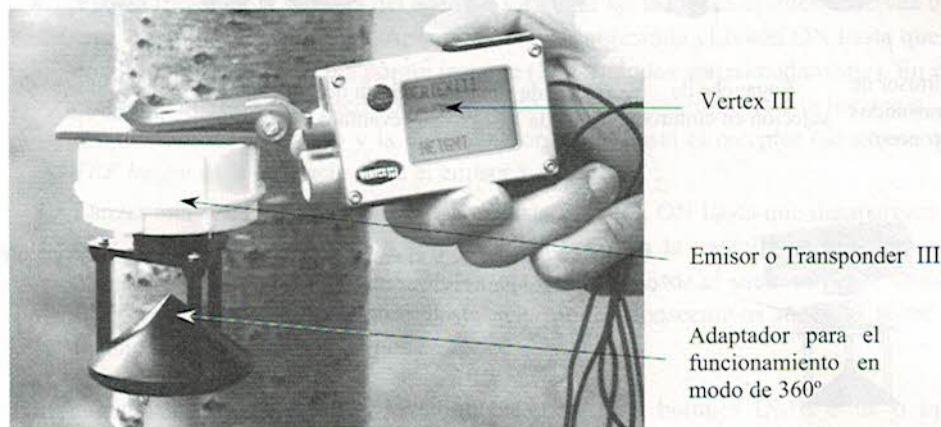


Figura 3.49. Aspecto del hipsómetro Vertex III con el emisor multifuncional o Transponder III montado sobre un adaptador instalado en un jalón, que le permite emitir los impulsos ultrasónicos en cualquier dirección horizontal.

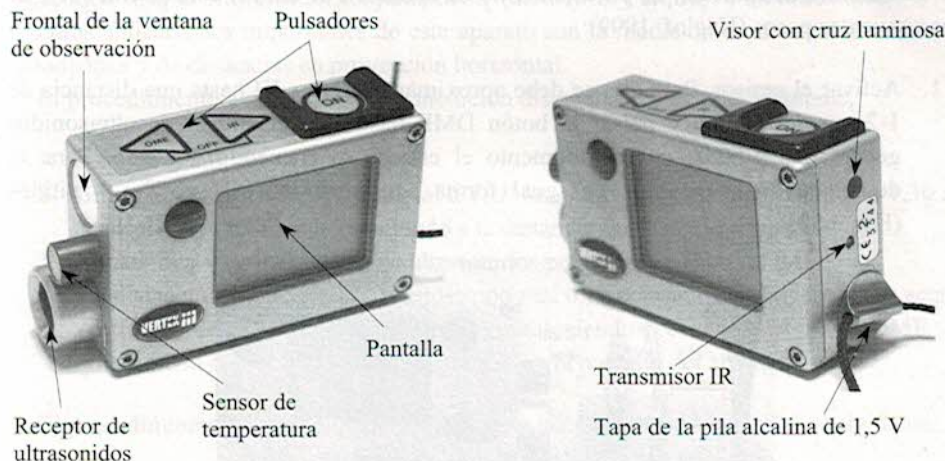


Figura 3.50. Partes funcionales más importantes del hipsómetro Vertex III.

El emisor o Transponder III es sólido, pequeño, con forma de cilindro de 7 cm de diámetro y 5,5 cm de alto (ver Fig. 3.51), resistente al agua y compatible con todas las versiones anteriores del hipsómetro Vertex. Puede utilizarse de modo que sólo emita señales en un ángulo de 60°, clavándolo sobre el árbol por medio de una garra que lleva en la parte posterior o sosteniéndolo manualmente, o bien para emitir señales en cualquier dirección, al montarlo sobre un jalón soporte y un adaptador que se pueden adquirir con el aparato (ver Figs. 3.49 y 3.51). El emisor produce un aviso sonoro cuando se activa, desactiva o cuando se recibe un pulso ultrasónico.

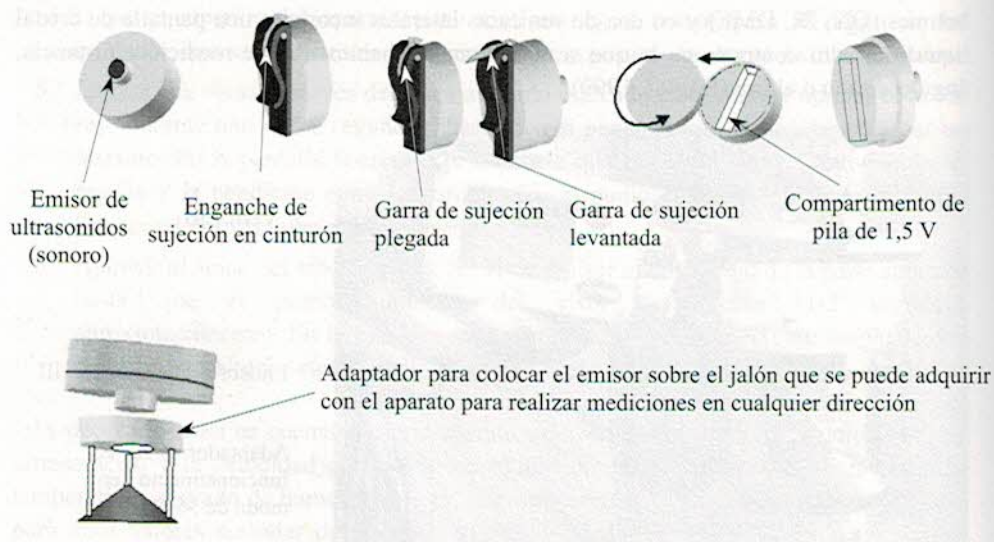


Figura 3.51. Esquema del emisor multifuncional (Transponder III) que incorpora el Vertex III.

Aunque se pueden hacer mediciones de alturas sin usar el emisor (midiendo la distancia manualmente e introduciéndosela al aparato), lo habitual es usar el emisor para calcular la distancia electrónicamente. El procedimiento de medición de alturas consta, entonces, de los siguientes pasos (Häglof, 1999):

1. Activar el emisor. Para ello se debe aproximar el Vertex III hasta una distancia de 1-2 cm del mismo y pulsar el botón DME hasta que el emisor de ultrasonidos genere dos pitidos; en ese momento el emisor se encuentra activado. Para su desactivación se procede de igual forma, emitiendo el Transponder 4 pitidos (Fig. 3.52).

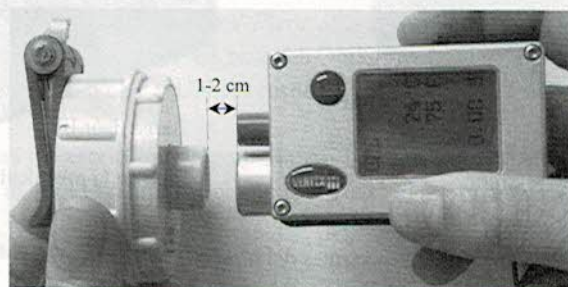


Figura 3.52. Procedimiento de activación del emisor del Vertex III.

2. Colocar el emisor sobre el árbol a medir (a una altura que habitualmente es 1,3 m y que debe corresponderse con la altura *TRP height* del Vertex III), clavándolo sobre el árbol por medio de la garra que posee, o bien situándolo sobre el jalón soporte, justo delante del árbol.

3. Desplazarse hasta una distancia próxima a la altura estimada del árbol desde donde se vea el emisor y el ápice del árbol. Una vez allí encender el Vertex III apretando el botón ON, con lo que aparece HEIGHT en la pantalla.
4. Visar a través de la ventana del aparato, y esperar hasta que en el interior se vea una cruz luminosa de color rojo. Apuntar al emisor apretando el botón ON hasta que la cruz luminosa desaparezca por un instante (3-4 segundos aproximadamente). En ese momento el aparato ha medido el ángulo de la visual con respecto a la horizontal, la distancia sobre el terreno y la distancia horizontal hasta el receptor (se asume que *TRP height* es la distancia entre el emisor y el suelo).
5. Lanzar una visual al ápice del árbol y pulsar el botón ON hasta que desaparezca la cruz luminosa (1-2 segundos aproximadamente). En la pantalla se mostrará una primera medición *height 1*, que representa la altura desde el suelo al punto visado. El Vertex III permite registrar hasta seis alturas consecutivas medidas sobre el mismo árbol sin cambiar de posición.

El aparato se desactiva pulsando simultáneamente los botones DME e IR o bien automáticamente después de que hayan pasado 10-15 segundos aproximadamente sin que se haya usado el aparato.

Los datos procedentes de este aparato pueden ser transferidos directamente mediante infrarrojos (pulsando IR y ON) a forcípulas electrónicas de tipo Haglöf Mantax o Haglöf Digitech, suponiendo una ventaja operacional importante, ya que posteriormente se puede descargar toda la información conjuntamente (diámetros y alturas) a un ordenador.

Otras aplicaciones importantes de este aparato son la medición de distancias reales, de pendientes y de distancias en proyección horizontal.

El procedimiento a emplear para la medición distancias reales es el siguiente:

1. Activar el emisor.
2. Situar el emisor a una altura igual a *TRP height* del aparato (habitualmente 1,30 m) y desplazarse hasta el lugar situado a la distancia que se quiere medir.
3. Lanzar una visual al emisor de ultrasonidos presionado el botón DME.
4. La distancia puede ser medida en tiempo real o en continuo, si el operador se acerca o se aleja del emisor de ultrasonidos, manteniendo presionado el botón DME. Al soltar dicho botón se muestra la distancia en la pantalla del aparato.

El procedimiento de medición de pendientes y distancias horizontales es el siguiente:

1. Encender el aparato pulsando el botón ON, seleccionar con los pulsadores el menú ANGLE (ángulo) y pulsar nuevamente el botón ON.
2. Apuntar hacia el lugar donde está colocado el emisor y pulsar el botón ON hasta que la cruz luminosa de puntería desaparezca. En pantalla aparecerá el ángulo que forma la visual con la horizontal.
3. Si se quiere calcular la distancia horizontal, se presiona el pulsador izquierdo DME. El aparato mide la distancia horizontal y el resultado se muestra en la pantalla rotado 90° para facilitar su lectura (Fig. 3.53).

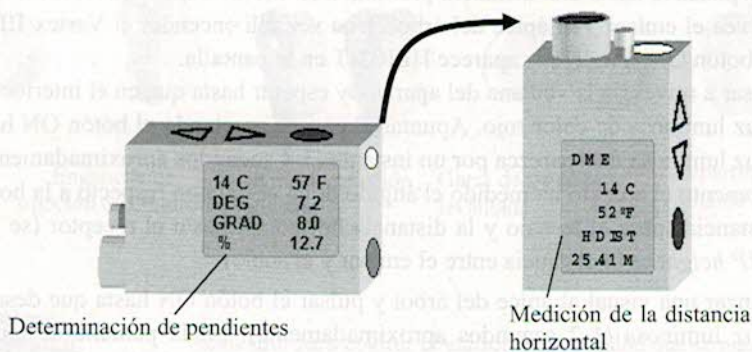


Figura 3.53. Esquema de la medición de pendientes y distancias horizontales con el Vertex III. En el segundo caso el texto en la pantalla aparece rotado para facilitar su lectura.

Al igual que el Vertex Forestor, este aparato está calibrado para una atmósfera estándar, por lo que se deben tener en cuenta las mismas recomendaciones efectuadas para el modelo anterior.

De todos los modos se recomienda calibrar el aparato con frecuencia; para ello, una vez que el aparato haya alcanzado la temperatura ambiente (tras 10-15 minutos), se activa el emisor y se mide con una cinta métrica una distancia de 10 m entre el receptor y la unidad de medición. Se enciende el aparato pulsando el botón ON, se selecciona el menú CALIBRATE con los pulsadores de desplazamiento (DME e IR) y se apunta desde la distancia de 10 m al emisor pulsando nuevamente el botón ON. El aparato se calibra automáticamente mostrando en pantalla los 10 m y cerrándose inmediatamente esa pantalla cuando está listo.

La altura a la que se sitúa el receptor sobre el árbol debe coincidir con la *TRP height* que figura en la unidad de medición. En caso contrario se produce un error de medición, que aumenta al incrementarse la diferencia entre los dos valores. Así, si se sitúa a una altura de 1,2 m ó 1,1 m en vez de a 1,3 m, los errores medios serían, respectivamente, de 14 y 27 cm (Häglof, 1999).

Si es necesario actualizar los valores *Pivot offset* y *TRP height*, cambiar el sistema métrico o incluir una distancia manual, se enciende el aparato pulsando el botón ON y se selecciona el menú SETUP. Pulsando a continuación el botón ON van apareciendo los distintos parámetros, cuyos valores se pueden variar con los botones de flecha (IR y DME).

Los hipsómetros Vertex Forestor y Vertex III presentan las siguientes ventajas (Rondeux y Pauwels, 1998; Pauwels, 2001):

- Son ligeros, compactos y resistentes.
- El operador se puede situar a una distancia cualquiera (no hay distancia predefinida), lo que permite colocarse en el punto en el que se tenga la mejor visibilidad del árbol.
- Es posible hacer mediciones “a través” de la vegetación (matorrales, follaje, etc.) que dificulta la visualización del receptor, de modo que no siempre es necesario ver el emisor para que el Vertex capte los ultrasonidos.

- No es necesario lanzar una visual a la base del árbol, como ocurre con los hipsómetros basados en procedimientos geométricos y trigonométricos, por lo que se evita el inconveniente que supone no ver ese punto, muchas veces oculto por la vegetación.
- La forma de visualizar es clara y precisa, comparada con la apreciación visual de la medición de los péndulos en otros hipsómetros (Suunto, Blume-Leiss, etc.).
- La medición es precisa (error medio de 5 cm) y directa, ya que no hay que hacer sumas o restas de las lecturas lanzadas a la base y a la cima del árbol, como ocurre en otros hipsómetros (Suunto, Blume-Leiss, etc.).
- Los resultados de la medición son almacenados, con lo que es posible realizar varias medidas de altura para un mismo árbol (tres en el Vertex Forestor y seis en el Vertex III).
- La medición es fácil y rápida, realizando el propio aparato una corrección automática en función de la pendiente entre la horizontal y la línea de la visual lanzada al receptor.
- Poseen gran autonomía y permiten transferir por medio de infrarrojos los datos de las mediciones realizadas a un ordenador.

Como inconvenientes del Vertex Forestor se pueden citar los siguientes (Pawels, 2001):

- La baja visibilidad del punto rojo luminoso en el caso de alta insolación, aún cuando se puede regular, en cierto grado, su intensidad luminosa.
- La perturbación de la recepción de los ultrasonidos en caso de que se produzca lluvia sobre un suelo seco, granizada, se trabaje en la proximidad a un arroyo o en una zona cercana a operarios trabajando con motodesbrozadoras o motosierras.
- La limitación de la distancia medida (40 m en buenas condiciones).
- La ausencia de un modelo para personas zurdas.
- Su elevado precio, entre 10 y 15 veces más que el precio del modelo básico del hipsómetro Suunto.

El Vertex III presenta algunas mejoras respecto al anterior modelo Vertex Forestor, entre las que destacan las siguientes (Pauwels, 2001):

- Presenta un puntero luminoso en forma de cruz, más visible que el de forma de punto del modelo anterior y, además permite verificar la verticalidad del aparato.
- Se ha solucionado el problema de falso contacto de la pila del receptor.
- Permite mediciones más rápidas.
- Mayor economía de las pilas alcalinas.
- Mayor facilidad de lectura de las medidas mostradas gracias a la rotación del texto.
- Menor sensibilidad que el modelo anterior a ruidos ambientales.

A pesar de todas las mejoras conseguidas, la lluvia sigue afectando a la fiabilidad y a la precisión de las mediciones de la distancia horizontal entre el receptor y el emisor, y debería investigarse cómo afectan las distintas intensidades de lluvia al Vertex III (Barron, 2001). También se han encontrado problemas en mediciones de alturas de árboles realizadas debajo o en las proximidades de líneas eléctricas de alta tensión,

aunque no en la medición en la cercanías de arroyos, como ocurría con el Vertex Forestor (Barrio et al., 2002). Igualmente se desaconseja trabajar con varios hipsómetros Vertex en el mismo perímetro de trabajo porque se producen interferencias en la recepción de los ultrasonidos.

En un ensayo sobre la precisión de las medidas realizadas con el Vertex Forestor, sobre 17 árboles con alturas comprendidas entre 3 y 35 m y con el observador situado a una distancia entre 0,5 y 1,5 veces la altura del árbol (con una distancia máxima de 35 m), se concluyó (Rondeux y Pawels, 1998) que la diferencia media observada entre la medición realizada con el Vertex y la altura real fue de 5 cm, siendo el intervalo de confianza de 27 cm. El error, en el 95 % de los casos estuvo, comprendido entre -22 y + 32 cm. Este error medio no fue significativamente diferente de cero y la medición no estuvo afectada por sesgos sistemáticos.

En otra comparación, realizada entre los hipsómetros Vertex III, Suunto y Blume-Leiss, en la que se midieron 10 árboles de menos de 15 m y 10 de más de esa altura por dos grupos de tres observadores cada uno (uno de baja experiencia y otro de gran experiencia en medición), se obtuvieron los siguientes resultados (Barron, 2001):

- Las medidas fueron significativamente distintas entre los dos grupos de personas que efectuaban la medición, lo cual pone de manifiesto que la precisión alcanzada con un instrumento es también función de la distinta habilidad y grado de experiencia que tienen los operadores.
- Cuando se utilizaban los hipsómetros Suunto y Blume Leiss se tendía significativamente a subestimar la altura real del árbol. En cambio, el uso del Vertex III no mostró diferencias significativas entre las alturas medidas y las reales.
- El Vertex III proporcionó las medidas con menor variabilidad, seguido del Blume-Leiss. El Suunto, en cambio, fue el instrumento que proporcionó una mayor variabilidad de las mediciones.

Hipsómetro Vertex Laser

Este instrumento es el último modelo de hipsómetro presentado por la casa sueca Haglöf y se caracteriza por combinar la tecnología de ultrasonidos del hipsómetro Vertex III, con la tecnología láser. El aparato presenta forma compacta, está protegido contra el agua y tiene un peso de 260 gramos (Fig. 3.54). Funciona con una pila alcalina CR-2 y permite la transmisión de los parámetros de medición a un ordenador a través de un puerto de infrarrojos (IR).

Dependiendo de las condiciones de trabajo, se puede elegir entre la medición con láser o con ultrasonidos. Así, si existe vegetación densa entre el árbol y el punto de estacionamiento, para la medición de la altura se emplea la medición con ultrasonidos. En cambio, si no existen obstáculos entre el punto de estacionamiento y el árbol a medir se puede emplear el láser (aunque en este caso debe ser posible ver la base y el ápice del árbol). En este caso también se pueden medir distancias menores de 30 m empleando el emisor de ultrasonidos.

Para la medición de las alturas empleando el sistema de ultrasonidos, el aparato trae un emisor de ultrasonidos (Transponder III) igual al del Vertex III, siendo la metodología de medición de alturas igual al de aquel instrumento.

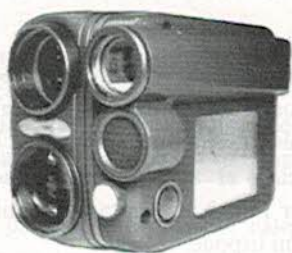


Figura 3.54. Aspecto del hipsómetro multifuncional Vertex Laser. Foto: Haglöf (2003a).

Hipsómetro LHP 1

Es un hipsómetro láser fabricado por la casa sueca Laseroptronix, pequeño, robusto y cubierto por una carcasa de plástico reforzado (Fig. 3.55). Permite la medición de distancias horizontales de hasta 400 m apuntando hacia cualquier objeto, o de hasta 750 m con la ayuda de un reflector. Permite medir la altura de árboles de hasta 99,9 m corrigiendo el efecto de la pendiente, siendo en este caso el error medio del 1 %. Dispone de una pila de 9 voltios que permite varias horas de mediciones. El punto a medir se señala con una marca en forma de punto rojo en el visor, lo que facilita mucho su uso (Laseroptronix, 2000).

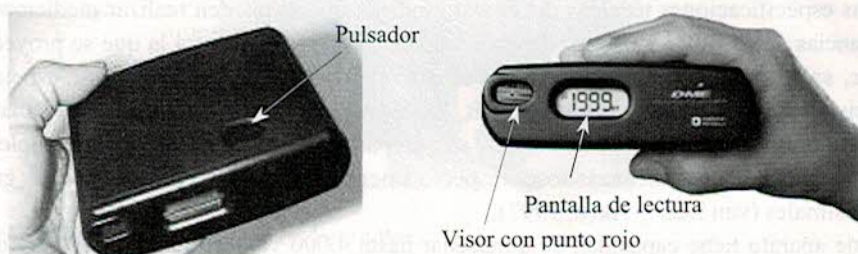


Figura 3.55. Aspecto del hipsómetro láser LHP 1. Foto: Laseroptronix (2000).

El procedimiento de medición de alturas es el siguiente:

1. Lanzar una visual al tronco del árbol para que el aparato pueda calcular la distancia horizontal. Para ello se mantiene presionado el botón situado en la parte superior del aparato hasta que se oiga una señal sonora.
2. Lanzar una visual al ápice del árbol y presionar el botón hasta que se oiga un pitido sonoro.
3. Repetir el proceso lanzando una visual a la base del árbol.
4. El aparato, en función de la distancia horizontal y de las lecturas anteriores, muestra en la pantalla de cristal líquido el valor de la altura con una precisión de $\pm 0,5$ m.

Dendrómetro Lem 300-Geo

Es un dendrómetro láser que ha sido desarrollado por la casa alemana Jenoptik específicamente para aplicaciones en el campo forestal. Debido a sus dimensiones ($240 \times 200 \times 92$ mm) y a su peso (aproximadamente 2,2 kg), permite su utilización por un sólo operario, que empleará el aparato como unos binoculares, sosteniéndolo únicamente con las manos (ver Fig. 3.56). Para conseguir una mayor exactitud deberá montarse el instrumento sobre un trípode.

Permite la realización de múltiples mediciones forestales (que se pueden personalizar mediante un sistema de menús definibles por el usuario) como: distancia sobre el terreno, distancia en proyección horizontal, distancia en tiempo real, diferencia de distancia horizontal entre dos puntos, acimut, ángulo horizontal entre dos puntos, ángulo de inclinación vertical, altura de un árbol a partir de tres puntos relevantes (tronco, base y ápice) o mediante dos visuales (incluyendo una altura de referencia, habitualmente la altura normal), diferencia de altura entre dos puntos, diámetro del tronco (permite almacenar hasta cinco diámetros diferentes a sus correspondientes alturas), e incluso la introducción manual en dos campos de códigos identificativos. La posibilidad de medir diámetros a distintas alturas, que se determinan ópticamente con ayuda de una escala graduada y basándose en los mismos principios con los que se ideó el relascopio de Bitterlich (ver Apartado 8.1.2), permite cubicar árboles en pie siempre y cuando sea visible el fuste en la longitud que interese.

Las especificaciones técnicas del aparato indican que se pueden realizar mediciones de distancias entre 100 y 3.000 m, dependiendo de la superficie contra la que se proyecte el láser, siendo máxima esa distancia en el caso de emplear prismas de triple espejo. La precisión de esta medición es de 10 cm. En cuanto a los ángulos verticales, el máximo admitido es de 60 grados centesimales, siendo para el acimut de una vuelta completa de horizonte (400^g), y alcanzándose respectivamente precisiones de 0,1 y 0,5 grados centesimales (van Laar y Akça, 1997).

Este aparato tiene capacidad de almacenar hasta 4.000 valores de medida, que pueden ser visualizados en pantalla o volcados a una impresora o a un ordenador. Permite, además, escoger entre distintas unidades de medida, tanto angulares como de longitud.

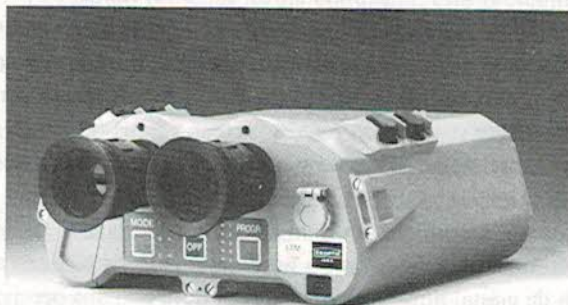


Figura 3.56. Aspecto de un dendrómetro láser Lem 300-Geo. Foto: Aymroad (2001).

Hipsómetro Forest Pro

Es un aparato fabricado por la casa Laser Technology Inc., de mediano tamaño ($15,2 \times 6,4 \times 12,7$ cm), manejable con una mano y de un peso aproximado de 1 kg (Fig. 3.57). Su fabricación en una carcasa de aluminio de una sola pieza le confiere gran robustez y resistencia al agua, lo que permite su empleo en condiciones de trabajo adversas.

Está provisto de una serie de funciones para el cálculo de distancias horizontales, verticales y pendientes del terreno, tanto en porcentaje como en grados. Permite, además, almacenar distancias y calcular posteriormente perímetros y otras distancias remotas.

La precisión varía dependiendo del objeto sobre el que se proyecte el haz láser, siendo de 3 cm si se emplea un prisma situado a 25 m de distancia. El alcance máximo es de 575 m de distancia.

Para facilitar la lectura de datos en situaciones con poca luz dispone de seis líneas de lectura en una pantalla de cristal líquido iluminada. Además, permite la exportación de datos a distintos dispositivos (ordenador, impresora, etc.) mediante un puerto serie.



Figura 3.57. Aspecto del hipsómetro Forest Pro.

Dendrómetro Criterion 400

El Criterion 400 es otro dendrómetro láser (Fig. 3.58) desarrollado específicamente para el Servicio Forestal de los Estados Unidos de América por la casa Laser Technology Inc., con el fin de integrarlo en todas las operaciones de medida de masas forestales (Prodan et al., 1997).

Posee sensores para medir distancias, ángulos verticales, acimut y diámetros a distintas alturas, además de software para realizar cálculos con los datos recogidos, como el área basimétrica o distintas operaciones topográficas.

Para la medición de diámetros se emplea una retícula existente en el visor del aparato, mediante la cual se abarca el diámetro del tronco a la altura que se desee medir. El número de divisiones de la retícula cubiertas por la sección debe introducirse manualmente en el aparato, que automáticamente calcula el diámetro. Es un aparato que proporciona una alta precisión en la medición de alturas, sin embargo es poco preciso en la medición de diámetros, ya que resulta bastante difícil ver la retícula bajo condiciones de poca luminosidad. Así, en un estudio realizado en masas de *Pinus* sp. y *Eucalyptus* sp. en Brasil, se han constatado resultados significativamente diferentes en la determinación

de diámetros normales con el Criterion 400 en comparación con los obtenidos con la utilización de instrumentos tradicionales (Giacini y Passos, 1998).

Por otro lado, el elevado peso del aparato (aproximadamente 3 kg sin trípode) es un factor que dificulta su manejo en campo. Además, la presencia de sotobosque denso compromete la precisión del aparato en la medición de distancias cuando se proyecta el haz láser contra un objeto sólido, siendo necesario el empleo de un filtro y una placa reflectora para evitar que las ondas sean reflejadas por otras superficies (perdiéndose así una gran ventaja en su utilización).

Tanto el Lem 300-Geo como el Criterion 400 son aparatos que han dejado de fabricarse, en parte debido a las consideraciones apuntadas anteriormente, en parte por su elevado precio (el Criterion 400 costaba 130 veces más que un hipsómetro Suunto básico) y por último también por su peso, si bien continúan empleándose en la actualidad.



Figura 3.58. Aspecto del dendrómetro Criterion 400.

3.3. ELECCIÓN DEL APARATO MÁS ADECUADO PARA LA MEDICIÓN DE ALTURAS

En este apartado se expone una comparación entre nueve de los aparatos más utilizados en la actualidad para medir las alturas de los árboles (Suunto, Blume-Leiss, Haga, relascopio, Vertex III, LHP 1, Forest Pro, Lem 400 Geo y Criterion 400) basándose en los seis factores siguientes: precio, precisión, compacidad, forma de apuntar, velocidad de uso y robustez (Brack, 1999; Barrio et al., 2002).

Precio: empleando como referencia el hipsómetro Suunto, por ser el instrumento más barato (unos 150 euros el modelo básico); el aparato más caro es el Criterion 400 (aproximadamente 130 veces más que el Suunto), seguido del Lem 300-Geo (aprox. 40 veces más). El Forest Pro, el Vertex III, el LHP 1 y el relascopio de Bitterlich tienen un precio similar (entre 12 y 14 veces más), pero bastante superior al de otros hipsómetros como Haga y Blume Leiss (entre 2 y 5 veces más, dependiendo de las prestaciones).

- Precisión: cuando están correctamente calibrados y se utilizan adecuadamente, el Haga, el Blume Leiss, el relascopio y el Suunto tienen una precisión similar, de alrededor del 2,5 %. El Vertex III, el LHP 1, el Criterion 400 y el Forest Pro tienen una precisión mayor, en torno al 1 %.
- Compacidad: en este factor se han considerado tanto el peso como el volumen de los aparatos, características que determinan su facilidad de transporte y manejo en campo. Los hipsómetros Vertex III, Suunto, LHP 1 y el relascopio son los instrumentos más compactos, seguidos de cerca por el Blume Leiss y el Haga; ya que por sus dimensiones y peso no requieren gran esfuerzo en su empleo. Por contra, el Forest Pro (1 kg) y el Lem 300-Geo (2,2 kg) son relativamente pesados, lo que puede dificultar su sujeción en períodos largos de tiempo, situación que se agrava al trabajar con el Criterion 400 (3 kg).
- Forma de apuntar: la forma de lanzar visuales con el Suunto, el Blume Leiss y el relascopio restringe el campo de visión, sobre todo en condiciones de poca luminosidad. Además, el Suunto causa en algunas personas cansancio ocular debido a la forma de hacer puntería. El Haga tiene elementos de puntería externos, al igual que los modelos antiguos del Blume Leiss. El Lem 300-Geo se emplea igual que unos binoculares. El Criterion 400 y el Forest Pro tienen una mira telescópica similar a la de un rifle para lanzar las visuales. El Vertex III y el LHP 1 se apoyan en un puntero de luz roja para facilitar la localización del punto de árbol a medir.
- Velocidad de uso: el empleo de aparatos electrónicos para realizar las mediciones es siempre más rápido que utilizando hipsómetros tradicionales, en los que generalmente hay que esperar a la estabilización de un péndulo o tambor para poder leer el valor de la medición realizada. Además, en éstos suele ser necesario calcular alturas mediante operaciones aritméticas sencillas, proceso que ralentiza aún más la obtención de las variables que se precisan.
- Robustez: en esta característica influye la protección de la carcasa que recubre los dispositivos interiores frente a golpes y condiciones atmosféricas. En este sentido, son fundamentales los materiales con que han sido construidos los distintos aparatos, y su acabado. Así, el hipsómetro Vertex, el Suunto y el relascopio son instrumentos robustos, en cambio el Criterion 400 es el instrumento menos robusto por su gran tamaño.

Valorando numéricamente los factores anteriores en una escala de 1 a 9 (de peor a mejor) y sumando las puntuaciones, se ha intentado determinar cual podría ser el hipsómetro "óptimo". Previamente se han ponderado los factores entre 0,1 y 0,6, en función de su importancia, obteniéndose los resultados que se exponen en la Tabla 3.4. Considerando como factores de mayor importancia la precisión, el precio y la facilidad o velocidad de uso, el aparato óptimo sería el Vertex III, seguido de cerca por el LHP-1 y el Forest Pro. Por contra, según esta valoración, el Criterion 400 y el Lem 300-Geo resultan ser los aparatos menos recomendables, si bien hay que tener en cuenta que en este último orden ha influido de manera determinante el precio y la compacidad (estos aparatos no se consideran muy apropiados para la realización de trabajos forestales en terrenos accidentados o de tránsito difícil debido a la vegetación). Sin embargo, si se obvian estos dos factores, los aparatos menos valorados pasarían a ser el relascopio y el Suunto.

Tabla 3.4. Clasificación de los hipsómetros forestales de uso más frecuente.

Aparato	Precio	Precisión	Compacidad	Forma de apuntar	Velocidad de uso	Robustez	Puntuación ponderada
Blume-Leiss	9	4	6	6	5	4	12,4
Criterion 400	1	8	1	8	8	2	9,9
Forest Pro	5	8	4	8	8	4	13,3
Haga	9	4	6	6	5	4	12,4
Lem 300-Geo	3	6	2	8	8	5	10,4
LHP 1	6	8	7	8	8	6	15,2
Relascopio	6	4	7	3	4	7	10,7
Suunto	9	4	8	3	3	7	12,3
Vertex III	6	8	8	8	7	9	15,6
Ponderación	0,5	0,6	0,4	0,2	0,3	0,1	-

En todo caso, la elección de un determinado aparato de medición no sólo está condicionada por las características intrínsecas del mismo, sino que depende de los requerimientos del proyecto a acometer en cuanto a precisión, rapidez y costes asumibles (Clark et al., 2000). Respecto a los costes, se debe tener en cuenta, además, el tiempo invertido en la realización de las mediciones y en la adquisición de destreza en su utilización, ya que revierte en el coste total del proyecto en forma de salarios del operario.

También es importante tener en cuenta que no siempre la última tecnología existente en el mercado es la más adecuada para cada usuario, por lo que antes de adquirir un aparato se recomienda analizar sus prestaciones, compararlas con los requerimientos deseados y, si es posible, probarlo antes de adquirirlo.

3.4. ERRORES EN LA MEDICIÓN DE ALTURAS

En la medición de la altura se pueden cometer tres tipos de errores: errores instrumentales o debidos al aparato, errores debidos al operario y errores debidos a la forma y situación del árbol.

3.4.1. Errores debidos al aparato

Los errores de este tipo dependen del principio de medición que empleen los aparatos. Los aparatos basados en principios geométricos son muy precisos si se construyen adecuadamente. Sin embargo, la principal limitación de las reglas hipsométricas es la relación que existe entre su precisión, su longitud y la longitud del jalón utilizado. Por ejemplo, el uso de una regla de Christen de 30 cm de longitud y un jalón de 5 m provoca una tendencia a la subestimación de alrededor de un 1,5 % en la medición de las alturas de los árboles inferiores a 18 m (Rondeux, 1993). Este error se reduce considerablemente al emplear jalones de longitud superior a los 5 m (Pita, 1984; Rondeux, 1993).

En el caso de los aparatos basados en principios trigonométricos, a los errores debidos a defectos de fabricación pueden unirse los provocados por un mal mantenimiento. Por ejemplo, en los hipsómetros de péndulo o tambor es necesario comprobar regularmente que estos dispositivos se muevan libremente, sin ningún impedimento que los frene. Los errores provocados por esta causa son difíciles de acotar, puesto que dependen de la escala elegida para la medición y del ángulo que forme la visual con la horizontal. Además, también se pueden producir desajustes en el visor dióptrico de doble refracción (por humedad u otras condiciones extremas), por lo que es preciso su comprobación y mantenimiento regularmente.

3.4.2. Errores debidos al operario

Los errores más frecuentes de este tipo son los siguientes:

- Medir mal la distancia horizontal.
- Hacer mala puntería al lanzar las visuales con el aparato. Por ejemplo, en masas densas es fácil confundir el ápice del árbol que se quiere medir con el de otro cercano, mientras que en zonas con mucho matorral no suele observarse la base con facilidad. En este último caso, es conveniente apoyar un jalón de longitud conocida en posición vertical en el árbol y medir la altura desde la parte superior del jalón hasta el ápice del árbol; la altura total será la altura medida más la longitud del jalón.
- Hacer las lecturas antes de que el péndulo se haya estabilizado en el caso de los hipsómetros o dendrómetros con sistemas pendulares.
- Equivocarse al hacer las lecturas, bien sea por leer en una escala distinta a la de la distancia horizontal o bien por leer mal el valor que marca la escala.
- Error de redondeo al apreciar un valor entre dos divisiones de la escala de un aparato.
- En el caso del hipsómetro Vertex son fuentes de error: no tener bien calibrado el aparato, utilizarlo antes de producirse la estabilización de la temperatura, y situar el receptor a una altura distinta del valor *TRP height* que indica el aparato. En árboles inclinados también se produce un error al no estimar correctamente la distancia.
- Empleo de una técnica de medición incorrecta. Por ejemplo, subir o bajar la cabeza al mirar a la base y al ápice del árbol.
- Errores debidos a una mala elección de la escala de medición en los aparatos basados en principios trigonométricos. Cuando se emplean estos aparatos es conveniente situarse a una distancia del árbol similar a su altura real, ya que así se minimizan los errores en las visuales lanzadas al árbol. En terreno llano, la diferencia de cota h entre un objeto y la vista del observador se estima en función de la distancia horizontal D de estacionamiento y del ángulo α de inclinación de la visual (Fig. 3.59).

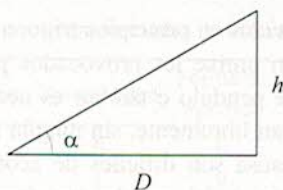


Figura 3.59. Diferencia de cota h entre un objeto y la visual lanzada por un operario.

De la figura anterior se deduce que $h = D \cdot \operatorname{tg} \alpha$. Mediante un cálculo diferencial en ambos términos de la igualdad se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{dh}{h} = \frac{dD}{D} + \frac{d\alpha}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \cos^2 \alpha}$$

Por lo que el error relativo en altura e_h será, entonces:

$$e_h = \frac{dh}{h} \cdot 100 = \frac{dD}{D} \cdot 100 + \frac{d\alpha}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \cos^2 \alpha} \cdot 100 = e_D + \frac{2 \cdot d\alpha}{\operatorname{sen} 2 \cdot \alpha} \cdot 100$$

Para que este error relativo sea mínimo, el denominador de la fracción del segundo término de la igualdad habrá de ser máximo, por tanto $\operatorname{sen}(2 \cdot \alpha) = 1$, con lo cual el ángulo de las visuales debe ser $\alpha = 45^\circ$, lo que significa que la distancia de estacionamiento recomendable es aquella que sea igual a la altura del árbol. Esto es válido cuando el observador se encuentra en terreno horizontal, pero cuando no hay más remedio que estacionar en terreno en pendiente, lo más recomendable es situarse aproximadamente a un nivel que corresponda a la mitad del árbol y a una distancia del mismo también igual a la mitad de su altura, para que las visuales que se lancen formen un ángulo de 45° con la horizontal y se minimicen los errores (Fig. 3.60).

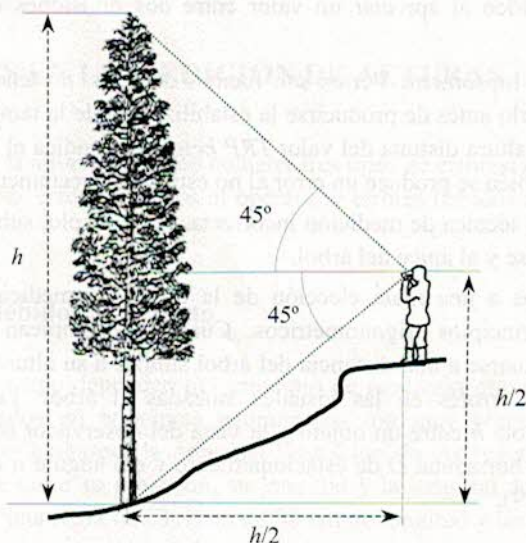


Figura 3.60. Forma de medición de la altura total de un árbol en un terreno en pendiente para minimizar el error.

3.4.3. Errores debidos al árbol

Estos errores se pueden deber a:

- La forma de la copa.
- La inclinación del árbol.
- La conicidad acentuada del tronco.

Error debido a la forma de la copa

La propia configuración del árbol a medir puede inducir a errores si no se aprecia con claridad su base o su ápice. Esto suele pasar, por ejemplo, en el caso de pinares claros con copas aparasoladas, como los de *Pinus pinea*, o en frondosas de copa amplia, en las que, en general, no es sencillo apreciar el ápice sin ambigüedad.

En estos casos se produce una sobreestimación de la altura real del árbol (ver Fig. 3.61), con errores relativos que pueden llegar a ser del 10 % (Rondeux, 1993).

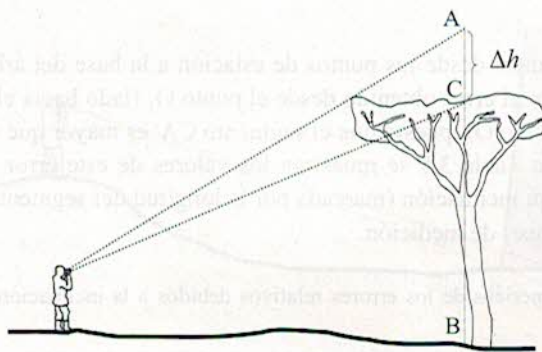


Figura 3.61. Estimación errónea de la altura por mala apreciación del ápice del árbol.

Como se aprecia en la figura anterior, el error absoluto cometido al realizar una visual v tangente a la copa sería Δh . Para realizar la medición correctamente sería necesario dirigir una visual al punto C a través de la copa, hacia el punto en el que se estime que está el ápice del árbol.

Error debido a la inclinación del árbol

Una situación muy frecuente y que provoca errores de medición es la inclinación de los árboles con respecto a la vertical. Los mayores errores en la medición de la altura de un árbol inclinado se obtienen cuando se mide en el plano definido por el tronco inclinado y su proyección sobre el terreno.

Supóngase que se pretende medir un árbol inclinado de altura AB , inclinado un ángulo γ respecto a la vertical, desde dos puntos O_1 y O_2 situados en el plano de máxima inclinación (ver Fig. 3.62). La altura verdadera del árbol es $AB = A'B/\cos\gamma$ (ver Apartado 3.1.1), pero desde los puntos O_1 y O_2 se medirán unas alturas de CB y DB respectivamente.

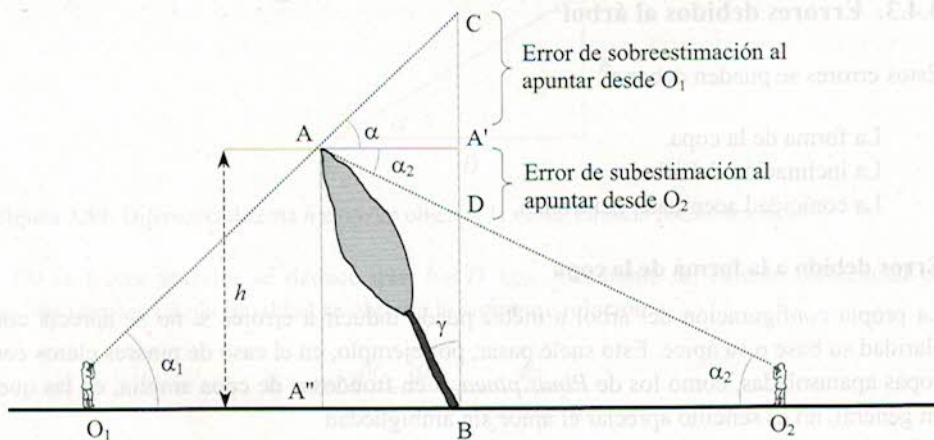


Figura 3.62. Determinación gráfica del error cometido en la medición de la altura debido a la inclinación del árbol.

A igualdad de distancia desde los puntos de estación a la base del árbol ($O_1B = O_2B$), siempre es algo mayor el error obtenido desde el punto O_1 (lado hacia el que se inclina el árbol) que desde el punto O_2 , puesto que el segmento CA' es mayor que el segmento $A'D$, ya que $\alpha_1 > \alpha_2$. En la Tabla 3.5 se muestran los valores de este error en función de la altura del árbol y de su inclinación (marcada por la longitud del segmento $A''B$) para cada una de las dos posiciones de medición.

Tabla 3.5. Valores numéricos de los errores relativos debidos a la inclinación del árbol. Fuente: Rondeux (1993).

Altura del árbol que coincide con la distancia horizontal a la que se sitúa el operario	Errores relativos en altura en función de la longitud $A''B$			
	Longitud $A''B = 1$ m		Longitud $A''B = 2$ m	
	Desde O_1	Desde O_2	Desde O_1	Desde O_2
15 m	+ 6,9 %	- 6,5 %	+ 14,4 %	- 12,5 %
20 m	+ 5,1 %	- 4,9 %	+ 10,6 %	- 9,5 %
30 m	+ 3,4 %	- 3,3 %	+ 6,9 %	- 6,5 %

O_1 : Árbol inclinado hacia el operario

O_2 : Árbol inclinado hacia el lado contrario al operario

Para evitar estos errores, la forma correcta de medir es colocarse en un plano perpendicular al plano ABA'' en el que se sitúa el árbol (ver Fig. 3.62). Además, si se utilizan aparatos que miden alturas en vertical (Suunto, Blume-Leiss, Haga, relascopio, Vertex, etc.) es necesario hacer una corrección, ya que la altura medida será $A'B$ y no AB . La relación entre los dos valores es la siguiente:

$$AB = \sqrt{(A''B)^2 + (A'B)^2} = \frac{A'B}{\cos \gamma}$$

En general esta corrección es muy pequeña. El error relativo cometido en la estimación de la altura es:

$$e_h = \frac{AB - A'B}{AB} \cdot 100 = (1 - \cos \gamma) \cdot 100$$

y toma valores, por ejemplo, del 1,5 % para $\gamma = 10^\circ$ y del 3,4 % para $\gamma = 15^\circ$.

Cuando se pretenda medir un árbol inclinado empleando una regla hipsométrica, por ejemplo la de Christen (o cualquier otro instrumento que no mida necesariamente alturas sobre la vertical), se deberían colocar la pértiga de referencia y la regla paralelas al tronco del árbol, con lo cual no será necesario realizar ningún tipo de corrección, aunque la utilización de los aparatos sería en ese caso más complicada.

Error debido a la conicidad acentuada del tronco

La excesiva conicidad del tronco de un árbol puede provocar errores por exceso si la distancia horizontal y la lectura a la base no se hacen en el mismo punto (ver Fig. 3.63).

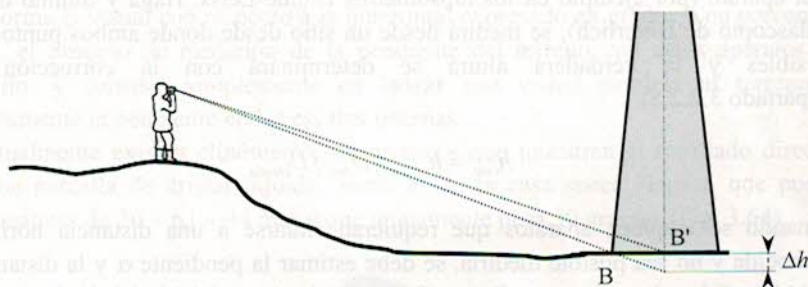


Figura 3.63. Error en la medición de alturas debido a la excesiva conicidad del tronco en la base.

En el caso de la figura, la distancia horizontal se habrá medido hasta el punto B', mientras que la visual a la base se lanza al punto B, lo que supone un error Δh en la estimación de la altura.

3.5. RECOMENDACIONES PARA LA MEDICIÓN DE ALTURAS

La medición de la altura de los árboles debe efectuarse con sumo cuidado, con el fin de evitar posibles fuentes de error. Para ello el medidor deberá tener en cuenta las siguientes recomendaciones (adaptado de RWG2, 1999):

1. Emplear, preferentemente, aparatos basados en principios trigonométricos (por ejemplo los hipsómetros Blume-Leiss, Haga, Suunto, Vertex, etc.).
2. Para reducir los cálculos y aumentar la rapidez del proceso de medición, utilizar aparatos con escalas directas de altura (por ejemplo Blume-Leiss, Suunto, etc.) en lugar de los que miden únicamente pendientes.

3. Reconocer el árbol visualmente antes de medir, lo que resulta esencial para minimizar serios errores en la estimación de las alturas (por ejemplo por inclinación del árbol, por error en la apreciación del ápice o la base, etc.).
4. En árboles inclinados, si no se puede medir desde un punto situado en un plano perpendicular al formado por el tronco y su proyección sobre el suelo, se debe medir siempre desde el lado contrario a la inclinación del árbol para minimizar el error.
5. Cuando se emplee un aparato que requiera colocarse a una distancia horizontal conocida es conveniente medir la distancia con cinta métrica siguiendo una curva de nivel.
6. Si se utiliza el visor dióptrico en terrenos inclinados se debe medir la pendiente y hacer las correcciones adecuadas para obtener la altura real (ver Apartado 3.2.2.5).
7. La distancia horizontal al árbol deberá ser lo más parecida posible a su verdadera altura, para de esta forma reducir errores.
8. Si el ápice y la base no son visibles desde la distancia fija apropiada para las escalas del aparato (por ejemplo en los hipsómetros Blume-Leiss, Haga y Suunto o en el relascopio de Bitterlich), se medirá desde un sitio desde donde ambos puntos sean visibles y la verdadera altura se determinará con la corrección (ver Apartado 3.2.2.5):

$$h_{real} = h_{escala} \cdot D_{real} / D_{escala}$$

9. Cuando se empleen aparatos que requieran situarse a una distancia horizontal conocida y no sea posible medirla, se debe estimar la pendiente α y la distancia al árbol medida sobre el terreno $D_{terreno}$. Se medirá la altura del árbol h desde ese punto con la escala adecuada y se calculará la altura real h_{real} mediante la siguiente expresión:

$$h_{real} = \frac{h \cdot D_{escala}}{D_{terreno} \cdot \cos \alpha}$$

10. Cuando se empleen aparatos que estiman la distancia al árbol (hipsómetros Vertex Forestor, Vertex III o dendrómetros láser) es importante situarse en un lugar desde el que se divise bien el ápice del árbol (y también la base del árbol en el caso de los dendrómetros láser).
11. Desde el punto de medición se deben hacer dos o tres lecturas y luego obtener el promedio de las mismas. La desviación de esas lecturas no deberá ser mayor de $\pm 2,5\%$ del valor promedio; si no es así se deberán repetir las mediciones.
12. En masas muy densas (por ejemplo masas no aclaradas, no podadas o jóvenes) donde habitualmente existen dificultades para apreciar el ápice del árbol a medir, se puede tratar de mover ligeramente el tronco apoyándose en él, para que la persona que realiza la medición pueda distinguir su ápice.
13. En lugares de medición en los que exista mucho matorral u otra vegetación y no se vea la base del árbol, se puede colocar un jalón de altura conocida (o una persona) y apuntar a su punto más alto, sumando luego a la altura obtenida su longitud.

3.6. MEDICIÓN DE LA PENDIENTE DEL TERRENO

El conocimiento de la pendiente del terreno es fundamental para poder estacionar a una distancia en proyección horizontal conocida, y por ello se aborda en este apartado su medición.

La pendiente del terreno se puede medir con aparatos específicos (clinómetros) o con aparatos diseñados para medir la altura de los árboles (hipsómetros). Los clinómetros son aparatos diseñados para medir la pendiente entre dos puntos, ya sea en grados o en porcentaje. Los aparatos que miden la pendiente en grados se denominan eclímetros, mientras que los que miden el valor en porcentaje se denominan clisímetros.

Existen numerosos modelos, aunque todos ellos consisten en pequeñas cajas prismáticas provistas de un péndulo y una ventana para ver las escalas. Por ejemplo, el clinómetro de la marca Suunto es externamente igual que el hipsómetro de la misma marca. Todos estos aparatos poseen un tambor interno en el que se sitúan las escalas y que se mueve por su peso sobre un eje horizontal.

Cuando se lanza una visual a un punto, en las escalas del aparato se puede ver el ángulo que forma la visual con respecto a la horizontal expresado en grados o en porcentaje. Por tanto, el proceso de medición de la pendiente del terreno con estos aparatos es muy sencillo, y consiste simplemente en lanzar una visual paralela al terreno y leer directamente la pendiente en las escalas internas.

Actualmente existen clinómetros electrónicos que muestran el resultado directamente en una pantalla de cristal líquido, como el de la casa sueca Haglöf, que posee unas dimensiones de $20 \times 63 \times 44$ mm y que únicamente pesa 50 gramos (Fig. 3.64).



Figura 3.64. Clinómetro electrónico de la marca Haglöf. Foto: Haglöf (2003b).

Los hipsómetros y dendrómetros basados en principios trigonométricos pueden también utilizarse para medir la pendiente del terreno. La mayoría de ellos hacen esta medición directamente (Vertex Forestor, Vertex III, Blume-Leiss, algunos modelos de relascopio, etc.), pero en otros casos es necesario emplear las escalas de medir alturas porque el aparato no cuenta con escalas de medición directa de la pendiente.

El procedimiento a seguir para medir la pendiente con estos aparatos es lanzar una visual OO' paralela al terreno y leer el valor que marca en cualquier escala de medir alturas (ver Fig. 3.65). Dicho valor será la diferencia de cota entre dos puntos separados por una distancia horizontal igual a la de la escala empleada. Entonces, la pendiente en porcentaje $pte(\%)$ se calcula multiplicando dicho valor por 100 y dividiéndolo por la distancia horizontal que corresponde a la escala empleada:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h_{\text{escala}}}{D_{\text{escala}}} = \frac{\text{pte}(\%)}{100} \Rightarrow \text{pte}(\%) = \frac{h_{\text{escala}}}{D_{\text{escala}}} \cdot 100$$

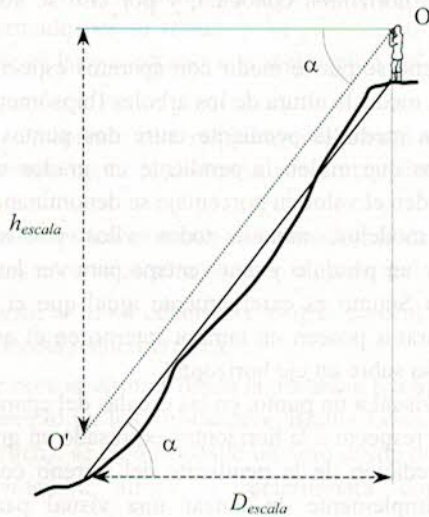


Figura 3.65. Determinación de la pendiente del terreno mediante hipsómetros basados en principios trigonométricos.

Si se emplea la escala que corresponde a una distancia horizontal de 20 m, el cálculo de la pendiente se reduce a multiplicar por cinco el valor leído en la escala cuando se lanza una visual paralela al terreno:

$$\text{pte}(\%) = \frac{h_{\text{escala}}}{20} \cdot 100 = 5 \cdot h_{\text{escala}}$$

Los clinómetros también pueden emplearse para medir la altura de un árbol. Para ello el operador debe situarse a una distancia horizontal conocida del árbol D y lanzar una visual al ápice y otra a la base. El aparato medirá los ángulos que forman las visuales con la horizontal (α y β) y en función del valor de la distancia horizontal D se obtiene la altura del árbol (ver Apartado 3.2.2.4).

Cuando se emplea un clisímetro, que estima los valores de la pendiente en porcentaje $\text{pte}(\%)$, se puede obtener el valor del ángulo de la pendiente del terreno mediante la relación siguiente (Fig. 3.59):

$$\left. \begin{array}{l} \operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{D} \\ \text{pte}(\%) = \frac{h}{D} \cdot 100 \end{array} \right\} \Rightarrow \operatorname{tg} \alpha = \frac{\text{pte}(\%)}{100}$$