

# 以電腦模擬取樣探討比特立希法與方區法 在森林調查上之比較研究

## A Comparison of Bitterlich and Quadrature Sampling Methods for the Forest Inventory Using Computer Simulation

林子超<sup>1</sup> 歐辰雄<sup>2</sup> 呂金誠<sup>2</sup>

Tzy-Chau Lin<sup>1</sup>, Cherng-Hsiung Ou<sup>2</sup> and King-Cherng Lu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>行政院農業委員會特有生物研究保育中心 南投縣集集鎮民生東路1號

<sup>2</sup>國立中興大學森林學系 台中市國光路250號

<sup>1</sup>Endemic Species Research Institute, Nantou, Taiwan

<sup>2</sup>Department of Forestry, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan

### 摘 要

本研究主要以北東眼山天然闊葉樹林型大面積全面調查所得之實測資料，應用電腦模擬取樣技術，針對方區法及比特立希法分別以變異度法、信賴區間法及適合度測驗等三種方法進行比較，以供日後植群調查之參考。

在變異度法及信賴區間法之比較上，顯示相同的取樣面積下，方區法推估優勢度所需設置之理論樣區數明顯多於推估密度之所需，而比特立希法在取樣上之準確性，受角度尺之比例是否適當所影響。在本研究中，當角度尺比例小於1:40，則產生低估，且低估之情形隨著角度尺之比例愈小更加明顯。藉由適合度測驗發現，比特立希法較小比例角度尺對優勢度之低估，主要來自於對較大直徑級林木產生低估所致；而對密度之低估，則主要係來自於對較小直徑級林木產生低估所致。

### Abstract

The quadrature sampling method and the Bitterlich sampling method were compared by computer simulation, using the tree census data obtained from the broad-leaved forest at Mt. North Tungyen. Based on variability and confident interval, for the quadrature method the number of sampling plots required for

estimating dominance was much higher than that for density. For the Bitterlich method the sampling accuracy was affected by appropriateness of angle gauge; underestimation of both dominance and density was resulted when the angles were smaller than 1:40 and the underestimation increased with the decrease in angle. Based on the result of fitness test, the underestimation of dominance was mainly caused by bigger diameter classes of trees, while the underestimation of density was by smaller diameter classes.

**關鍵詞：**比特立希法、方區法、森林調查、電腦模擬取樣

**Key words:** Bitterlich method, quadrat method, forest inventory, computer simulation sampling

收件日期：92年12月25日

接受日期：93年3月2日

Received: December 25, 2003

Accepted: March 2, 2004

## 緒 言

森林為人類最重要再生資源之一，為提供正確之資訊，以供經營決策之依據，必須對森林之組成、蓄積量之變化加以調查。然而由於森林面積廣闊，加上台灣地處亞熱帶，植群類型繁多、結構複雜，同時因受時間、人力、經費之限制，並無法全面調查，而必須藉由取樣調查以獲取所需之資料。然而因所設樣區之數量、面積，以及形狀等均會影響取樣費用、時間與取樣之準確性。因此，如何在有限之經費與時間下，迅速地獲得正確的森林資源資料，實為林業工作人員所迫切需要解決之問題。

早期森林學者在植被調查上多採用樣區法(plot sampling method)，即設置某種形狀、面積及數目之樣區加以調查，此亦被稱為面積法(area method)(Cottam *et al.* 1953)。然樣區法之實行，必須於林分內圍設樣區邊界，並實際量測邊界長度，此一步驟在下層灌木繁多之林下，常費去許多時間。在調查上，圍設樣區所費時間常不亞於實際調查植被之時

間，且面積樣區有邊界效應(marginal effect)，即位於邊界線上樣木之取捨問題(劉及蘇 1989)，故許多學者乃積極去探討不用面積法，而同樣能正確獲得森林資源資料的調查方法之可行性(Grosenbaugh 1952; 陳及蔡 1980)。

比特立希法(Bitterlich variable radius method)係由奧人Walter Bitterlich於1948年根據角度、距離與面積比例之幾何原理所設計，經由美國南方林業試驗場Grosenbaugh(1952)加以修正並推廣應用，初時稱為無樣區調查法(plotless method)。此法具有省時、省工、設備簡便等多重優點，但在台灣實際應用上並不普遍，探究其原因，或因地形、植群型態等限制因子不易克服，或為對於此調查方法之生疏，而主觀認為固定樣區法較為可靠，而加以排斥。

然而，當Grosenbaugh於美國提出無樣區取樣之後，許多林業調查人員開始對樣區法及比特立希法進行比較，在不考慮花費因子時，大多就不同之樣區設置及林分結構，來比較兩種方法在推估密度、斷面積、材積之

準確度(Sukwong *et al.* 1971; Matern 1972), 所得之結果亦大多指出樣區法欲得到與比特立希法相同之準確度, 則樣木必定多於比特立希法, 亦即比特立希法較具有效性, 且認為樣區法對於推估有關株數之介量有較高之準確度, 而比特立希法對於推估斷面積有關之介量有較高之準確度(Wensel and John 1969); 即樣區法對密度的推估較具無偏性, 而比特立希法對優勢度之推估較具無偏性。

以往有關此兩種不同取樣方法之比較研究中, 甚少涉及植群調查中樹種組成及重要值推估之準確性, 而比特立希法在台灣闊葉樹林調查上之實用性、最佳斷面積指數及樣點數等之相關研究更罕被涉獵。

台灣之森林多分布於崇山峻嶺, 面積遼闊, 除小面積或特殊目的採用全部調查外, 一般殆採用取樣調查, 因此何種取樣調查方法能取得較具代表性之植群介量, 實有加以評估之必要; 同時目前在生態調查上所使用之方法殆源自歐美等地區, 其植群構造遠較地處熱帶與亞熱帶之交的台灣為單純, 因此這些調查方法的實用性亦有重新加以檢視之必要。本研究之目的即是藉由大面積全面調查所得之實測資料, 應用電腦模擬取樣技術, 針對樣區法中最常被應用的方區法與比特立希法做多方面之比較, 並以原始植群資料為標準, 評估兩種取樣方法之準確性, 以供日後植群調查之參考。

## 研究區域環境及植物社會概述

本研究區位於霧社正北方6 km之北東眼山區(東經121° 07', 北緯24° 05'), 隸屬南投縣仁愛鄉行政區。北東眼山山頂地勢平坦, 海拔高約2,050m, 為惠蓀林場內東峰溪集水區東側稜線的最高點。本研究之樣區設置於山頂附近之天然闊葉林, 平均坡度為10°。

依桑士偉氏氣候分類, 可將本區歸為AB<sub>2</sub>

區, 為暖溫重濕型氣候(陳 1957)。此區北方有蘇澳到豐原東西走向之雪山山脈的阻擋, 不受東北季風之影響, 而在南部有玉山山脈及阿里山山脈的阻擋, 又免除西南季風之影響, 故環境較穩定, 冬季略為乾旱(林等 1968)。

本研究區內, 喬木層以卡氏櫛(*Castanopsis carlesii*)最占優勢, 其它還有苦扁桃葉石櫟(*Lithocarpus amygdalifolius*)、豬腳楠(*Machilus thunbergii*)等; 灌木層以紫珠葉泡花樹(*Meliosma callicarpaefolia*)、深山野牡丹(*Barthea barthei*)占優勢; 地被層以中華瘤足蕨(*Plagiogyria euphlebia*)及倒葉瘤足蕨(*Plagiogyria dunnii*)占優勢。1.9044 ha樣區內共記錄到49種、4,028株木本植物, 胸高斷面積為79.82 m<sup>2</sup>/ha, 植株密度為2,115 株/ha, 平均胸徑21.9 cm, 最大之胸徑為248 cm(樹種為卡氏櫛)。此研究區之植物社會屬於演替後期之植物社會。

## 研究方法

### 一、野外植群調查

本研究主要目的在評估方區法與比特立希法於植群取樣中, 對密度與優勢度推估之準確性, 並探討此兩種方法應用於台灣闊葉樹林取樣調查時之實用性及比特立希法之最佳斷面積指數, 因此植群取樣工作必須以不同面積之樣區法以及不同斷面積指數之比特立希法, 對同一處植群進行重複取樣。唯若如此進行, 則不但將使得調查工作繁瑣、無效率, 更容易造成調查資料的人為誤差而造成錯誤的結論, Lindsey *et al.* (1958)曾指出藉由林木位置圖進行電腦模擬取樣, 可使取樣得以正確、一致, 避免樹種鑑定的不一致, 更重要的是它可提供符合統計要求之足夠樣本數。因此本研究採用繪製調查區域林木位置圖, 以進行電腦模擬取樣。

在比特立希法的使用上，坡度將使得原本在水平距離應被計入之立木被忽略，因此若要克服此一坡度的限制，則角度尺之比例必須乘上 $\cos \theta$  ( $\theta$  為林地坡度)。台灣之森林多位於坡度變化急劇之地形，若同時考慮坡度校正的問題，將使得研究主題變大，資料的分析更複雜，且人為誤差之機率更大。本研究主要之目的在評估兩種方法對植群取樣之準確度，因此野外調查區域選擇一處坡度較緩、廣大且較符合均質條件的植物社會，以避免坡度效應之產生。

在台灣之闊葉樹原始林欲取得如此研究地點是有些困難，而最終選擇北東眼山山頂地勢平坦處(平均坡度 $10^\circ$ )設置 $138\text{m} \times 138\text{m}$ 之植群調查區，外圍之訂定是利用羅盤儀定出四邊，在此大樣區內植物調查以維管束植物為限，凡直徑超過 $1\text{ cm}$ 之木本植物記錄其樹種、胸徑及相對直角座標值，以便製作林木相對位置圖供電腦模擬取樣使用。野外調查於1997年2月進行。

## 二、電腦模擬取樣

無論在方區法或比特立希法之實際應用時，皆有發生邊界效應之可能，而本研究之電腦模擬取樣，樣區(樣點)位置之選取採逢機選擇，為避免樣區(樣點)設置位置太接近原始調查林分之邊界造成接近邊界區之林木入選機率較預期小，在整個大樣區之植物社會為均質之前提下，此模擬程式將整個 $1.9044\text{ ha}$ 之大樣區，以"球形樣區"之觀念進行取樣。所謂"球形樣區"即是在取樣樣區之邊界超出整個 $1.9044\text{ ha}$ 大樣區之範圍時，將超出右邊界(左邊界)之取樣部分，取樣自左邊界(右邊界)內部之植群，而超出上邊界(下邊界)之取樣部分，取樣自下邊界(上邊界)內部之植群，如此不但能使整個 $1.9044\text{ ha}$ 內之植群資料能充分地取樣利用，且能避免邊界效應影響兩種方法於取樣時之準確性。球形觀念樣區

完成後，即以各種邊長的方形樣區以及各種斷面積指數的比特立希法進行取樣。在本研究中，樣區法共設置19種樣區面積，樣區邊長自 $4\text{m}$ 至 $40\text{m}$ 每級增加 $2\text{m}$ ；而比特立希法之角度尺比例亦選擇19種，比例由 $1:10$ 到 $1:100$ ，分母每次增加5。

### (一)方區法之模擬取樣

於球形觀念樣區中，逢機選擇方形樣區之中心點，依中心點直角座標 $(x_1, y_1)$ ，逐一檢視各林木之直角座標 $(x_2, y_2)$ ，若方區法之邊長訂為 $a\text{m}$ ，則當 $|x_1 - x_2| \leq \frac{a}{2}\text{m}$ 且 $|y_1 - y_2| \leq \frac{a}{2}\text{m}$ 時，則此林木入選為 $a^2\text{m}^2$ 面積方區法之樣木。依各種取樣樣區數分別計算各樹種之密度及優勢度。計算如下：

密度(density) = 某樹種株樹之總和 / 所調查之總樣區數

優勢度(dominance) = 某樹種胸高斷面積之總和 / 所調查之總樣區數

相對密度(relative density) = (某樹種之密度 / 所有樹種密度之總和)  $\times 100\%$

相對優勢度(relative dominance) = (某樹種之優勢度 / 所有樹種優勢度之總和)  $\times 100\%$

### (二)比特立希法之模擬取樣

此方法樣點位置之選取，亦是自球形觀念樣區中逢機選擇一中心點，再依中心點之直角座標 $(x_1, y_1)$ ，逐一檢視各林木之直角座標值 $(x_2, y_2)$ ，若比特立希角度尺之比例為 $1:a$ ，某胸徑為 $A\text{m}$ 之立木距離中心點 $B\text{m}$ ，則當 $\frac{A}{B} \geq \frac{1}{a}$ 時，此立木入選為 $1:a$ 角度尺之樣木，而 $B$ 之計算由公式 $\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$ 而得。依各種取樣樣點個數分別計算各樹種之密度及優勢度。計算公式如下：

優勢度(dominance) = (於所有樣點中該樹種入選之株樹 / 總樣點數)  $\times$  BAF值  
各種比例 $(1:a)$ 角度尺BAF值 =  $(\frac{1}{4 \times a^2}) \times 10000\text{m}^2$  (每公頃之斷面積)

密度(density)= 某樹種之優勢度／於所有樣點中該樹種入選為樣木之平均胸徑斷面積

相對密度(relative density) = (某樹種之密度／所有樹種密度之總和)x100%

相對優勢度(relative dominance) = (某樹種之優勢度／所有樹種優勢度之總和)x100%

### 三、分析方法

#### (一)變異度法

將19種樣區面積之方區法及19種角度尺比例之比特立希法，各取樣50次求取密度與優勢度之平均值及變方，而後利用平均數之標準偏差(standard error of mean,  $\sigma / \sqrt{n}$ )與平均數(mean, M)之比值，即變異度(variability, V)=  $\frac{\sigma / \sqrt{n}}{M}$ ，以此關係式尋求符合某一精確度的理論樣區數(n)。

欲求某一精確度所需之樣區數，則令變異度之值等於某一主觀決定之變異度，在介量平均數及其變方已知下，即可求出各種不同樣區面積及角度尺比例所應設置之理論樣區數。本研究訂定變異度為0.1，也就是欲尋求各樣區面積對調查地區植物之密度及優勢度兩介量達到變異度小於0.1的精確度時，該樣區面積或角度尺比例級應設置之理論樣區數。

#### (二)信賴區間法

$$\text{由於 } P\left(x - \frac{t_{(n-1, 1-\alpha)}S_x}{\sqrt{n}} < \mu < x + \frac{t_{(n-1, 1-\alpha)}S_x}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha$$

$\mu$  為母體平均值

$x$ 為樣本平均值

$n$ 為取樣個數

$S_x$ 為樣本標準偏差

$1 - \alpha$  為顯著水準

$t_{(n-1, 1-\alpha)}$ 為在自由度 $n-1$ 及顯著水準 $1 - \alpha$  下之Student's t值

因此信賴區間一半的寬度為  $w = \frac{t_{(n-1, 1-\alpha)}S_x}{\sqrt{n}}$   
而 $E(w^2) = t_{(n-1, 1-\alpha)}^2 \frac{V(a)}{n}$ 。

此處 $E(w^2)$ 為信賴區間一半寬度平方之期望值。

而 $V(a)$ 為樣區面積為 $a$ 時取樣所得之變方。

有了信賴區間寬度、各樣區面積級取樣之變方及樣區個數之關係後，再以該面積級取樣50次所得之變方，作為變方之理論值，並以1.9044 ha大樣區內每木調查之結果為母體平均值之理論值，在本研究中以母體平均值之20%作為信賴區間一半之寬度，如此就只剩下 $n$ 及 $t_{(n-1, 1-\alpha)}$ 兩個變數，而此兩變數之關係為 $t_{(n-1, 0.95)} = 1.96 + 3.22(n-1)^{-1.07}$  (O'regan and Richard 1973)，因此樣區數(n)之求算可以先以任一數值代入 $t_{(n-1, 0.95)}$ 中，若所求得之 $n$ 不符合其關係式，則再以 $n$ 值代入  $t_{(n-1, 0.95)}$ 中，如此輾轉求算直到此兩變數相符，則可求出不同樣區面積下，對於密度、優勢度進行推估時，欲獲得母體平均值20%之準確度，所需設置之樣區數(n)。

在比特立希法中，角度尺比例值與樣點數之關係，亦是以相同的理論求得，其中 $V(a)$ 以1 : a之角度尺取樣50次所得之變方作為理論值。因此，不同角度尺比例下，對於密度、優勢度進行推估時，在一定的準確度下，其理論樣點數(n)亦可算出。

#### (三)適合度測驗

將1.9044 ha原始調查林分內之植物組成每5 cm劃為一直徑級，除去無林木分布之直徑級，共計37個直徑級，按照直徑級分別統計各直徑級內之密度與優勢度組成，再藉由各種取樣面積級之方區法及不同角度尺比例的比特立希法所獲得之各直徑級之密度、優勢度組成推估值，與原始調查林分中各直徑級之介量進行適合度測驗，用以判斷各種取樣處理對調查林分直徑級分布推估之準確度，並可從中探討此兩種取樣方法對各直徑

級樣木之選取與樣區面積(角度尺比例)間之關係。

## 結果與討論

### 一、變異度法

方區法各種取樣面積及比特立希法各種角度尺比例所獲得之密度、優勢度兩植物介量平均數與其變方，以及此兩種植物介量欲達到變異度小於0.1時之最少理論樣區數如表1、表2。

從表1中可觀察到方區法於相同之樣區面積時，欲使密度及優勢度兩介量推估值之變異度達到小於0.1之標準，則推估優勢度所需設置之樣區數幾乎為推估密度時所需樣區數的6倍，並且由兩介量取樣所得之平均數，亦可以明顯看出，即使樣區面積僅有16 m<sup>2</sup>，其對密度之推估值與原始調查林分之密度值亦僅有5%之誤差。由此數據可以知道方區法用於密度之推估，實為一既準確又有效率的調查方法，但是在斷面積之推估上，必須當樣區面積大於144 m<sup>2</sup>才能有較準確的推估值。在同一精確度之要求下，密度所需設置的樣區數小於優勢度所需者，此結果與許(1995)之研究結果吻合。探究其原因，乃是由於此部分理論樣區數之求算，是基於樣本變異係數之大小來決定應該設置多少個樣區，而方區法由於取樣機率與樣木出現之頻度成正比(probability proportional to frequency, P.P.F.取樣)，並不受樣木胸高斷面積大小所影響，因此所取得之樣木胸高斷面積變異係數較大可想而知；密度由於僅有計算株數，因此變異係數明顯較優勢度為小，而所需設置之樣區數亦較推估優勢度時所需之樣區數為少。

比較表1、表2，我們可以看見比特立希法對密度推估值之變異度雖明顯比方區法小得許多，然而由表2中卻可發現比特立希法所獲得之密度值與原始調查林分之實際值差異

甚大，約造成了95%的低估，這種低估的情形，實乃歸因於比特立希法密度之求算方法，因為比特立希法密度之求算乃由斷面積間接求得(參照比特立希法密度求算公式)，而比特立希法原本就是一種樣木入選機率與樣木胸徑大小成正比之取樣方法(probability proportional to size, P.P.S.取樣)，入選之樣木幾乎都是胸徑較大之林木，且調查林分中直徑分布多集中於16 cm以下之小徑木，由這些胸徑較大樣木之胸高斷面積來反推立木之株數，因此造成低估密度。此法推估密度的變異數會明顯小於方區法的原因有二，除了是因為比特立希法斷面積之求算為平均入選樣木株數乘上角度尺之斷面積指數，因此變異數原本就較方區法來得小，致使由斷面積求算而得之密度值變異數亦較小外，另外一個原因亦如上所述，用來反推密度之入選樣木為變異數不大之大徑木平均值。因此，在此處若僅由變異度之標準來判斷，而忽略了此法對密度推估值的偏誤，恐怕就會錯誤地以為如表2所列之樣點數就足以有效地推估林分之密度，卻忽略了此處理論樣區數之求算為 $(n) = \frac{\sigma^2}{(vM)^2}$  (參照第83頁，樣區數之求算)，而由於比特立希法如前面所述之原因致使平均數之變異數( $\sigma^2$ )較方區法為小，因此即使求算出之平均數(M)明顯低估，得到之理論樣區數也不會與方區法有明顯的差異，然而此處所求得之理論樣區數並不具實質上之意義。

在斷面積的推估方面，於表2中可看見隨著角度尺的比例變小，比特立希法對斷面積推估值的變異數亦隨之降低，然而低估的現象卻也更加顯著。

如前所述，比特立希法因取樣原理的不同，致使求算優勢度平均數之變異數本來就較方區法為小，而此處樣區數之決定乃是基於平均數之可靠性或精確度可視其變異數之大小而評估之，然而由此法所求算出之優勢度平均數呈現隨角度尺比例縮小而遞減，顯

表1. 各面積級方區法求得之密度與斷面積及其理論樣區數

**Table 1.** Densities, basal areas, and plot numbers estimated at different plots of Mt. North Tungyen broad-leaved forest by computer simulation with the quadrature sampling method

Plot area(m <sup>2</sup> )	Density (number / ha)			Basal area (m <sup>2</sup> / ha)		
	Average	Variance	Estimated plot numbers	Average	Variance	Estimated plot numbers
16	2150.0	2904336.7	62.83	102.8	51044.4	483.34
36	2072.2	1036816.6	24.15	55.7	4320.0	139.28
64	2293.8	1221141.6	23.21	62.1	4642.1	120.21
100	1950.0	500918.4	13.17	87.3	10176.4	133.54
144	2169.4	639243.2	13.58	62.9	2024.4	51.23
196	2192.9	574855.1	11.95	70.1	2481.6	50.44
256	2120.3	276591.4	6.15	80.7	2377.9	36.49
324	1980.9	188174.8	4.80	77.5	2099.1	34.95
400	2136.5	340515.6	7.46	81.8	1505.7	22.51
484	2110.7	213517.7	4.79	78.8	1239.3	19.94
576	1991.7	204687.4	5.16	82.9	1432.6	20.87
676	2004.4	219671.7	5.47	79.3	1043.2	16.59
784	1978.3	159427.2	4.07	74.5	650.6	11.73
900	2202.4	186748.8	3.85	80.3	1085.6	16.84
1024	2138.5	162620.9	3.56	82.1	703.5	10.44
1156	2102.9	110247.4	2.49	80.4	558.9	8.64
1296	2090.1	106627.0	2.44	76.0	301.2	5.21
1444	2066.2	108436.6	2.54	79.4	395.1	6.27
1600	2089.3	126251.7	2.89	80.1	564.8	8.80

表2. 比特立希法各種比例角度尺求得之密度與斷面積及其理論樣點數

**Table 2.** Densities, basal areas, and plot numbers estimated at different plots of Mt. North Tungyen broad-leaved forest by computer simulation with the Bitterlich sampling method

Plot area(m <sup>2</sup> )	Density (number / ha)			Basal area (m <sup>2</sup> / ha)		
	Average	Variance	Estimated plot numbers	Average	Variance	Estimated plot numbers
1: 10	114.1	16463.8	126.51	74.5	1543.1	27.80
1: 15	85.4	1907.4	26.13	74.0	627.9	11.47
1: 20	98.7	3438.7	35.32	82.4	398.1	5.87
1: 25	80.0	850.2	13.29	77.8	268.5	4.44
1: 30	86.1	562.4	7.59	81.3	131.0	1.98
1: 35	81.9	394.8	5.89	79.7	116.1	1.83
1: 40	84.1	321.9	4.55	79.1	89.5	1.43
1: 45	84.4	186.8	2.62	75.4	43.8	0.77
1: 50	90.4	348.7	4.27	75.3	71.2	1.26
1: 55	88.7	183.6	2.33	71.5	34.7	0.68
1: 60	95.8	263.8	2.87	71.1	42.3	0.84
1: 65	90.3	192.0	2.35	65.8	30.1	0.70
1: 70	100.9	389.7	3.83	66.5	48.6	1.10
1: 75	95.3	162.7	1.79	61.5	17.3	0.46
1: 80	103.6	237.0	2.21	61.4	25.3	0.67
1: 85	101.9	248.3	2.39	58.1	24.1	0.71
1: 90	105.5	294.4	2.64	56.6	25.1	0.78
1: 95	105.7	149.7	1.34	54.4	11.4	0.38
1:100	105.0	145.3	1.32	51.9	10.3	0.38

然並非每一種比例的角度尺所求得之優勢度平均數皆具代表性，因此由變異度之標準來求算比特立希法之理論樣區數僅能代表這些樣區數已經能使取樣所得之變異度小於0.1，但無法表示所得到之介量平均數是否準確。然而，若是在適當的角度尺比例之前提下，由表2中可以明顯看出比特立希法用於調查單位面積內之胸高斷面積和，實為一有效率之調查方法(1:30至1:40之角度尺於1.9044 ha內所需設置之樣點數不到二個)，但是在實際之野外調查時，究竟何種角度尺方為“適當”？Sukwong等人(1971)認為角度尺比例之選擇，受調查林分之林木空間分布、直徑級分布、密度組成等之綜合影響。由於本研究之研究區域僅分布於北東眼山之闊葉樹林型，因此文中僅針對此研究區域之植群狀況提出討論。

在使用比特立希法時，角度尺比例之選擇如前所述，實際上受到調查林分之林木空間分布、直徑級組成等所影響，此乃由於比特立希法之取樣原理，是將調查林分內林木之胸高斷面積依角度尺之比例等比例擴大，再以這些擴大之虛圓去推估單位面積內與此相同大小之虛圓究竟應有多少個，而獲得單位面積內之胸高斷面積和。因此，使用不同比例之角度尺，產生之擴大虛圓大小不同，而各直徑級林木之擴大虛圓亦不同，再加上林木於空間分布上之歧異性，這些因子之綜合影響，致使並非各種比例之角度尺皆能適用於不同直徑級大小之林木，而唯有當某直徑級林木依特定比例之角度尺所擴大之虛圓方能符合其實際之空間分布，亦始能獲得最準確之推估值。

在此處我們僅能初步認為比特立希法用於北東眼山闊葉樹林型之斷面積推估，角度尺比例不宜超過1:40，否則會有低估的現象。各種比例角度尺欲得到變異度小於0.1之標準所需樣區數列於表2中。

由於僅藉由變異度之標準來判斷理論樣區數會有以上的情況發生，因此以下理論樣區數之求算，將以介量平均數之真值(即原始調查林分每木調查所得之值)做為評估之標準。

## 二、信賴區間法

利用方區法之各種取樣面積以及比特立希法各種角度尺比例，所獲得之密度與優勢度兩植物介量之平均數與其變異數，以及推估此兩種植物介量欲達到以真值(即為原始調查林分每木調查所得之植物介量)的20%為信賴區間一半之精密水準，所需設置之理論樣區數列於表3及表4。

從表3中，可觀察到方區法於相同之樣區面積時，欲使密度及優勢度兩介量推估值達到相同之精密水準，則推估優勢度所需設置之樣區數明顯多於推估密度所需設置之樣區數，這與以變異度0.1為標準求算最適樣區數所得之結果大致上相同(表1)。

而在表4中，我們可以看見比特立希法對密度之推估值欲達到此一精密水準，所需設置的樣區數幾乎都不到一個，然而由t值表中可以發現表4中推估密度所需設置的樣區數(n)與理論t值，並不符合。此乃因為t分布的使用必須樣本之平均數為常態分布，而由於比特立希法密度之求算實際上是由入選樣木平均斷面積推算而得，斷面積之推算又是由平均入選樣木株數乘上角度尺之斷面積指數而得，因此所得到之密度平均數實為一經過多次平均後趨中性甚高之平均值，並不符合常態分布。

因此藉由此法求算比特立希法推估密度所需之理論樣區數，並不符合統計上之立論，所得到之結果亦不具任何意義。

而於表4中亦可發現比特立希法斷面積推估值之變異數明顯小於方區法(表3)，其原因如前所述；然而，若是在適當的角度尺比例

表3. 方區法利用信賴區間20%求取樣區數結果一覽表

**Table 3.** Densities, basal areas, and plot numbers estimated at 20% confident levels at different plots of Mt. North Tungyen broad-leaved forest by computer simulation with the quadrature sampling method

Plot area(m <sup>2</sup> )	Density (number / ha)				Basal area (m <sup>2</sup> / ha)			
	Average	Variance	t-value	Plot numbers	Average	Variance	t-value	Plot numbers
16	2075	3721938.7	1.99	82.31	60	17511.1	1.97	266.17
36	1950	993606.7	2.07	23.85	114	43799.0	1.96	662.27
64	2028	733906.7	2.11	18.29	86	9346.1	1.98	143.20
100	2028	488179.6	2.19	13.01	61	2647.6	2.02	42.36
144	2051	497844.6	2.18	13.21	87	7392.2	1.98	113.78
196	2240	560592.3	2.16	14.56	86	4828.9	1.99	75.21
256	2342	529010.4	2.17	13.88	74	1784.5	2.05	29.40
324	2053	262304.5	2.36	8.11	92	3885.9	2.00	61.03
400	2142	224220.4	2.41	7.27	84	1555.3	2.06	25.95
484	2148	378792.9	2.24	10.64	77	1436.5	2.07	24.17
576	2088	151870.5	2.58	5.65	76	1432.5	2.07	24.11
676	2172	197870.1	2.46	6.68	73	677.6	2.19	12.74
784	2001	154243.5	2.57	5.70	75	830.3	2.15	15.05
900	2282	222670.1	2.41	7.23	87	1317.2	2.08	22.38
1024	2011	118466.8	2.72	4.87	81	556.7	2.24	10.90
1156	2158	158851.2	2.56	5.80	84	681.9	2.19	12.80
1296	2168	113170.7	2.74	4.75	81	531.26	2.25	10.52
1444	1992	132105.9	2.65	5.19	74	323.23	2.41	7.33
1600	2082	111026.2	2.75	4.70	80	315.45	2.42	7.21

表4. 比特立希法利用信賴區間20%求取樣區數結果一覽表

**Table 4.** Densities, basal areas, and plot numbers estimated at 20% confident levels at different plots of Mt. North Tungyen broad-leaved forest by computer simulation with the Bitterlich sampling method

Angle gauge	Density (number / ha)				Basal area (m <sup>2</sup> / ha)			
	Average	Variance	t-value	Plot numbers	Average	Variance	t-value	Plot numbers
1: 10	147	21185.5	4.38	2.313	81	1793.1	2.05	29.53
1: 15	96	3266.2	10.83	1.387	76	613.2	2.21	11.76
1: 20	89	2700.9	1.96	0.062	80	442.9	2.30	9.17
1: 25	81	790.5	1.96	0.023	80	279.8	2.46	6.65
1: 30	84	587.7	1.96	0.013	81	83.1	3.22	3.40
1: 35	80	405.6	1.96	0.012	77	108.5	3.01	3.84
1: 40	87	206.2	1.96	0.001	80	45.7	3.83	2.66
1: 45	86	206.9	1.96	0.001	77	49.4	3.75	2.73
1: 50	86	191.9	1.96	0.001	73	52.7	3.69	2.78
1: 55	88	238.5	1.96	0.011	71	38.9	4.02	2.52
1: 60	91	247.5	1.96	0.012	69	46.5	3.81	2.67
1: 65	98	281.1	1.96	0.011	69	40.8	3.97	2.55
1: 70	96	283.9	1.96	0.011	65	35.1	4.20	2.40
1: 75	99	200.2	1.96	0.002	63	22.5	4.84	2.11
1: 80	103	163.8	1.96	0.002	61	17.2	5.43	1.93
1: 85	105	380.8	1.96	0.012	59	33.7	4.26	2.37
1: 90	101	150.7	1.96	0.001	55	12.3	6.25	1.77
1: 95	110	265.5	1.96	0.011	56	19.1	5.22	1.99
1:100	106	210.7	1.96	0.001	52	14.9	5.93	1.82

之前提下，同樣地亦可以由表4中發現，比特立希法用於調查單位面積內之胸高斷面積和，實為一有效率之調查方法(1:30至1:40之角度尺於1.9044 ha內所需設置之樣點數不到4個)。

### 三、適合度測驗

為更清楚地瞭解方區法與比特立希法之各種不同取樣處理，對原始調查林分直徑級組成的取樣代表性，以及造成比特立希法較小比例角度尺對優勢度產生低估的原因，特將方區法與比特立希法各種不同取樣面積(角度尺比例)各取100個樣區(樣點)之取樣結果與原始調查林分直徑級組成之適合度測驗卡方值摘錄於表5-8中。由於在比特立希法中藉由各入選樣木之平均胸高斷面積來反推林分之平均密度，會造成對密度明顯低估(約95%)，因此在此部分中密度之求算方式乃改採Grosenbaugh(1952)之方式，以各直徑級之平

均胸高斷面積反推各直徑級之密度進而求算全林分之密度。

由於方區法之取樣為P.P.F.取樣，因此林木株數愈多之直徑級入選機率愈大，而原始植群之直徑分布多集中在胸徑40 cm以下(約占95%)，因此可發現當樣區面積小於64 m<sup>2</sup>時，無論在密度或優勢度皆會對胸徑較大之直徑級產生偏估，而這種偏誤將隨著樣區面積加大或樣區數增加，使得這些入選機率較低之直徑級之樣木個數達到一定之取樣標準，才能克服。

在表6中，可發現由比特立希法依各直徑級入選樣木株數所求得之各直徑級優勢度，與原始調查林分之各直徑級優勢度組成有顯著的相似性( $\chi^2 \leq 10$ )，然而亦如同先前不分直徑級求算優勢度所得之結果一樣(表2)，當角度尺比例小於1:40時會對優勢度產生低估的現象。以下謹就表6之結果來探討此一現象產生的原因。

表5. 各面積級方區法於密度及優勢度取樣結果與原始林分組成之適合度測驗卡方值(DBH ≥ 1)

**Table 5.** The chi-square values derived from the fitness test between density and dominance at different plots of Mt. North Tungyen broad-leaved forest obtained by the census and those by computer simulation with the quadrature sampling method (DBH ≥ 1)

plot	16	36	64	100	144	196	256	324	400	484	576	676	784	900	1024	1156	1296	1444	1600
chi-square for density	203.1	93.1	46.9	22.9	30.7	21.3	14.1	13.4	19.8	6.6	4.3	5.5	3.1	3.4	3.9	2.9	2.1	2.0	1.1
chi-square for dominance	85.1	244.3	31.1	20.2	40.5	18.4	13.9	8.1	10.1	3.6	5.0	6.6	1.8	2.9	4.9	2.9	2.1	1.4	1.5

表6. 各種比例尺比特立希法於密度及優勢度取樣結果與原始林分組成之適合度測驗卡方值(DBH ≥ 1)

**Table 6.** The chi-square values derived from the fitness test between density and dominance at different plots of Mt. North Tungyen broad-leaved forest obtained by the census and those by computer simulation with the Bitterlich sampling methods at different angle gauges (DBH ≥ 1)

Angle gauge	1:10	1:15	1:20	1:25	1:30	1:35	1:40	1:45	1:50	1:55	1:60	1:65	1:70	1:75	1:80	1:85	1:90	1:95	1:100
chi-square for density	258.2	255.9	98.6	127.1	71.3	55.4	8.6	16.1	4.1	73.4	56.7	57.2	54.8	106.6	82.0	124.8	76.2	45.6	40.5
chi-square for dominance	9.1	5.2	2.1	2.4	1.0	0.4	0.9	1.5	2.0	2.9	4.2	5.3	6.4	7.3	8.7	10.7	11.5	12.2	14.1

表7. 各面積級方區法於密度及優勢度取樣結果與原始林分組成之適合度測驗卡方值(DBH≥5)

**Table 7.** The chi-square values derived from the fitness test between density and dominance at different plots of Mt. North Tungyen broad-leaved forest obtained by the census and those by computer simulation with the quadrat sampling method (DBH≥5)

plot	16	36	64	100	144	196	256	324	400	484	576	676	784	900	1024	1156	1296	1444	1600
chi-square for density	278.5	69.2	29.7	32.1	36.7	15.9	14.9	9.6	4.9	6.1	5.9	4.5	5.4	5.4	10.3	2.7	3.8	1.8	2.3
chi-square for dominance	272.7	57.4	22.8	26.4	40.1	10.3	14.2	7.7	4.5	6.1	5.1	4.6	3.9	5.7	9.1	2.7	3.1	1.4	2.9

表8. 各種比例尺比特立希法於密度及優勢度取樣結果與原始林分組成之適合度測驗卡方值(DBH ≥5)

**Table 8.** The chi-square values derived from the fitness test between density and dominance at different plots of Mt. North Tungyen broad-leaved forest obtained by the census and those by computer simulation with the Bitterlich sampling methods at different angle gauges (DBH≥5)

Angle gauge	1:10	1:15	1:20	1:25	1:30	1:35	1:40	1:45	1:50	1:55	1:60	1:65	1:70	1:75	1:80	1:85	1:90	1:95	1:100
chi-square for density	65.9	17.3	37.9	6.1	9.7	3.3	5.8	28.3	15.1	4.1	15.7	4.8	5.5	6.6	14.5	8.3	8.0	10.1	14.6
chi-square for dominance	5.3	3.6	2.0	1.2	0.7	0.9	0.8	1.3	2.2	3.0	4.0	5.0	6.6	8.0	9.4	9.8	11.7	12.8	14.3

由於比特立希法取樣為取樣機率與樣木胸徑大小成比例之取樣法(P.P.S.取樣)，因為大徑木之理論樣區面積大於小徑木之理論樣區面積，所以大徑木被抽選為樣木的機率大於小徑木，然而隨著比特立希角度尺之比例縮小，入選之小徑木所占的比例亦隨之增加。綜合以上二項比特立希取樣法之取樣本質，再觀察表5之結果，特將角度尺比例值分為二個階段以方便解釋，當比特立希角度尺之比例大於1：40時，由於比特立希法對樣木之選擇乃根據林木胸徑與林木離觀測點距離之比例關係，因此實際上角度尺比例值之選擇與林分內空間分布及直徑級分布有其使用上之限制，例如：使用1：10之角度尺，則直徑1 cm之林木，必須當觀測者至立木之距離小於10 cm方得入選為樣木，然而實際上林分內之空間分布，1 cm之林木其所需之最小生存空間可能遠大於100 cm<sup>2</sup>，因此當這種限制

發生時，則會產生對小徑木優勢度之低估，而這種低估的情形將會隨著角度尺比例變小而獲得改善，例如：使用1：100之角度尺，則直徑1 cm之林木，必須當觀測者至立木之距離小於1m方得入選為樣木，而或許實際上林分內之空間分布，1 cm之林木所需之最小生存空間小於1 m<sup>2</sup>，因此當使用1：100之角度尺，則低估優勢度之情況將可獲得改善。

當角度尺比例小於1：40後，隨著角度尺比例愈小，小徑木入選為樣木之機率提高，而那些相對密度較小的大直徑級林木，入選為樣木之機率亦隨之提高，但是由於這些大徑木原本在植群組成中就僅占少數，因此當角度尺之比值小於某界限，這些大徑木之入選機率已達到最高而不再提升，而相對上小徑木之入選機率卻仍是逐漸提升，因而造成大徑木之低估。這或許就是Husch(1955)於研究結論中提出使用較大角度尺可減少對大徑

木產生低估之真正原因。

Stage and Rennie(1994)卻認為使用較小比例角度尺對大徑木產生低估之原因，乃是由於大徑木可被量測到之距離遠，而容易造成樣木應否入選之誤判。Husch(1955)亦認為就理論而言，比特立希法各種不同比例角度尺之數學關係，應該是一恆定的關係，因此不同比例角度尺所獲得之結果應該不受角度尺比例所影響，而實際上會產生較小比例角度尺的低估現象，可能是由於較小比例之角度尺所形成之理論樣區面積較大，因此容易造成樣木是否入選之誤判，以及樣木間互相遮蔽之誤差。本研究中樣木之選取乃採電腦模擬取樣，各樣木是否入選均經過電腦計算選擇，沒有誤判之虞，因此於本研究中對樣木誤判應不是造成大徑木優勢度低估之真正原因。

在密度推估方面，由於此部分之密度乃由各直徑級之優勢度除以各直徑級入選樣木平均胸高斷面積所得，因此結果類似推估優勢度之結果，在角度尺比例大於1：40時，僅對較大之直徑級較具準確性，而當角度尺比例小於1：40時，則對較小之直徑級較具有準確的推估性，對較大之直徑級產生低估，只是由於比特立希法對密度值之求算，實際上是由入選樣木胸高斷面積平均值推算而得，因此只要優勢度推估值有偏誤，密度亦產生偏誤，而且愈小的直徑級偏誤愈明顯(因為相同的優勢度，直徑級愈小密度愈大)。就因為如此，當角度尺比例大於1：40時，雖然對大徑木之密度較具推估性，然而因為此時比特立希法對小徑木之優勢度產生偏估，而造成對密度的明顯偏估。

當角度尺比例小於1：40時，雖然如同前面所述，會對大徑木之優勢度產生低估，然而這並不是對密度產生偏估的主要原因，對密度產生偏估的原因絕大部分還是來自對小於5 cm直徑級之密度低估。

為了驗證造成比特立希法於密度上之偏

估是否來自胸徑小於5 cm之林木，於表7及表8中，方區法各種樣區面積取樣與比特立希法各種角度尺比例取樣僅針對胸徑大於5 cm以上之林木，由取樣所得結果與原始調查林分組成之適合度測驗中，可以發現方區法所得之結果無論是在密度或是優勢度上，其與包含5 cm胸徑以下之取樣結果在卡方值上並沒有明顯的差異(表5及表7)，此乃如同前面所述，方區法為P.P.F.取樣，因此不去考慮5 cm以下之林木，並不會去影響到其它直徑級入選為樣木之機率。

在比特立希法中，當取樣僅考慮5 cm以上之林木所得到之結果，在優勢度之卡方值上並沒有與包含胸徑5 cm以下之取樣結果有明顯的差異(表6及表8)，此乃因為胸徑5 cm以下之林木優勢度為2.98，僅占總體優勢度之3%，因此即使有偏估之現象，對卡方值並沒有明顯的影響。然而就密度而言，我們可以發現若僅考慮胸徑大於5 cm以上之林木，那麼由卡方值來看，只要當比特立希角度尺比例小於1：15時對原始調查林分之各直徑級密度組成就具取樣代表性(表8)。因此，由此可知造成比特立希法對密度產生低估之原因，實際上來自於對小徑木密度之低估。

Stage and Rennie(1994)認為使用比特立希法必須限定一最小入選樣木胸徑，小於此等胸徑之樣木必須藉由樣區法取樣，方能獲得準確之推估值，否則由於這些小徑木之理論樣區面積太小而容易造成誤差，而對結果產生高估。然而由本研究之結果發現，若是針對優勢度來看，造成優勢度低估之主要原因還是來自於角度尺之比例選擇不當(角度尺比例小於1：40)，有無考慮小徑木對結果並沒有明顯影響。在密度之推估值有無考慮小徑木就有明顯差異，當不去限定最小入選樣木胸徑(本研究限定為5 cm)時，會對密度造成低估的現象，結果與Stage and Rennie(1994)所述有所差異，而這種低估之現象，當限定最小入選樣木胸徑後即可獲得改善。

綜合以上所言，比特立希法使用上發生之誤差，並非單純由角度尺之比例大小所造成，實際上還牽涉了調查林分內之林木空間分布與直徑級分布，Barrett and Allen(1966)就曾說過不同比例角度尺所產生的誤差乃是因林木分布所致，並沒有理論說那種角度尺誤差最大。因此有部分學者研究中即針對研究地區之林分組成、結構提出選擇角度尺之比例應根據每樣點之平均入選樣木株數。例如 Snedaker and Snedaker(1984)建議在紅樹林生態調查中，以每測點7-10株樣木能得到最佳的準確性，而 Meyers and Beers(1968)及 Kulow(1966)則指出使用比特立希法時對於角度尺比例之選擇，應選擇每測點平均入選樣木株數10-15株之角度尺所得之結果最為準確。若是依本研究之結果來看，欲獲得較準確之推估值，每樣點之平均入選樣木株數必須超過7.4株。然而卻也有部分學者認為選擇角度尺之比例大小時，事先設定入選樣木之株數，將會造成結果的偏誤(Schreuder *et al.* 1981)。唯實際上於野外調查中，使用比特立希法所造成對優勢度之偏估，多半來自使用者缺乏經驗，而且通常每14株樣木就有1株屬於判斷不易之邊際木(以目視無法判定其是否入選之林木)(Deitschman 1956)，因此比特立希法於實際上之應用，角度尺比例之選擇仍不宜過小。

## 結 論

一、無論是變異度法或信賴區間法在決定兩種取樣方法之最適樣區數上，於相同樣區面積之前提下，方區法在推估優勢度所需設置之理論樣區數明顯多於推估密度之所需；而比特立希法對於優勢度之推估所需設置之樣點數，明顯少於方區法，以效率來考量，實不失為一好方法，然而究竟何種比例之角度尺方為“適當”？這又受到調查林分之林木空間分布、直徑級分布、密度組成等

綜合影響，並無一定之準則，然而若是角度尺之比例選擇不當，那麼將會對優勢度產生嚴重的低估。以本研究之研究區域而言，當角度尺比例小於1：40，則產生低估之情形，且低估之情形隨著角度尺之比例愈小，更加明顯。比特立希法對於密度求算，係以所量取到全部樣木之平均胸高斷面積加以推估，故不具調查林分平均胸高斷面積之代表性，因此產生明顯之低估，且由於取樣機率之不同，使得由此法求得之密度變異數明顯小於方區法，然因與原始林分有明顯之差異，因此無法藉由此法求得有意義之理論樣點數。

二、藉由方區法與比特立希法取樣結果與原始調查林分各直徑級組成之適合度測驗，可發現當樣區面積小於64 m<sup>2</sup>時，方區法對於密度及優勢度皆會對胸徑較大之直徑級產生偏估，而這種偏誤將隨著樣區面積加大，或樣區數增加使得這些入選機率較低之直徑級之樣木個數達到一定之取樣標準，才能克服。比特立希法於角度尺比例小於1：40所產生對優勢度之低估，實乃來自於對較大直徑級產生之低估，而產生低估之原因乃是由於隨著角度尺比例縮小，致使大徑木入選為樣木之機率相對上變小。另由結果亦可發現若不考慮胸徑小於5 cm之直徑級，比特立希法亦可對調查林分之直徑級組成有良好之推估性，而造成對小於5 cm之直徑級密度之低估，亦可能是由於林木之空間分布及直徑級分布對比特立希法使用上產生之限制。

三、比特立希法在密度之求算上，若以各直徑級之平均胸高斷面積求算各直徑級之密度，進而求算全林分之密度，較以各樹種之平均胸高斷面積求算各樹種之密度，進而求算全林分之密度，其結果較接近真值，此乃由於比特立希法之密度求算乃以間接之方式求得，而在天然闊葉樹林中各樹種內之林木個體間之胸徑大小差異甚大，因此用以推算各樹種密度之樣木胸高斷面積無法有效代表調查林分中各樹種之實際平均胸高斷面

積，因而發生偏誤之情形。由此觀之，若欲由比特立希法求算調查林分內之各樹種密度組成，則調查林分內各樹種種內個體之胸徑大小差異不得過大，然而這在天然林中並不可能出現；而另一種情形，則是必須於調查時將入選之各樹種再分為若干直徑級，再依各直徑級之胸高斷面積反推各直徑級之密度，進而求算各樹種之密度，然而這勢必造成額外的野外調查工作及室內的資料分析，而與比特立希法省工、省時之立意相違背。

四、由本研究證實，由於比特立希法之取樣原理符合斷面積之取樣機率，因此在適當角度尺比例之前提下，獲得之優勢度推估性較方區法為佳，而方區法之取樣原理則較符合密度之取樣機率，因此獲得之密度推估性較比特立希法為佳。

五、於實際應用時，比特立希法仍有其使用上之問題，例如構造複雜林分內視覺之遮蔽、邊界木之判定、坡度校正等，這些問題將耗費許多人力與時間，並造成調查結果之偏誤。本研究係以電腦模擬取樣，在沒有人為誤差之前提下，對此兩種取樣方法進行比較評估。於實際應用時，這些問題仍須加以考量。

## 引用文獻

林渭訪、章樂民、柳楨。1968。台灣之森林植物。中華林學季刊1(2)：1-78。

許俊凱。1995。台灣闊葉樹林取樣最小面積之探討。國立中興大學森林學研究所碩士論文。

陳明義、蔡進來。1980。無樣區取樣法調查喬木層植被之比較。中華林學季刊13(2)：29-38。

陳正祥。1957。氣候之分類與分區。台大實驗林叢刊7號。

劉棠瑞、蘇鴻傑。1989。森林植物生態學。台灣商務印書館。

Barrett, J. P. and P. H. Allen. 1966. Angle-gauge sampling a small hardwood tract. *Forest Science* 12(1): 83-89.

Cottam, G., J. T. Curtis and B. W. Hale. 1953. Some sampling characteristics of a population of randomly dispersed individuals. *Ecology* 34: 741-757.

Deitschman, G. H. 1956. Plotless timber cruising tested in upland hardwoods. *Journal of Forestry* 54(12): 844-845.

Grosenbaugh, L. R. 1952. Plotless timber estimates-new fast easy. *Journal of Forestry* 50(1): 32-37.

Husch, B. 1955. Result of an investigation of the variable plot method of cruising. *Journal of Forestry* 53(9): 570-574.

Kulow, D. L. 1966. Comparison of forest sampling designs. *Journal of Forestry* 64(7): 469-474.

Lindsey, A. A., J. D. Barton and S. R. Miles. 1958. Field efficiencies of forest sampling methods. *Ecology* 39(3): 428-444.

Matern, B. 1972. The precision of basal area estimates. *Forest Science* 18(2): 123-125.

Meyers, C. C. and T. W. Beers. 1968. Point sampling for forest growth estimation. *Journal of Forestry* 66(12): 927-929.

O'regan, W. G. and L. H. Richard. 1973. Computer simulation and vegetation sampling. *Journal of Wildlife Management* 37(2): 217-222.

Schreuder, H. T., D. S. Schreiner and T. A. Max. 1981. Ensuring an adequate sample at each location in point sampling. *Forest Science* 27(3): 567-573.

Snedaker, S. C. and J. G. Snedaker. 1984. The mangrove ecosystem: Research methods. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. p. 91-113.

- Stage, A. R. and J. C. Rennie. 1994. Fixed-radius plots or variable-radius plots. *Journal of Forestry* 92(1): 20-24.
- Sukwong, S., W. E. Frayer and E. W. Mogren. 1971. Generalized comparisons of the precision of fixed-radius and variable-radius plots for basal-area estimates. *Forest Science* 17(2): 263-271.
- Wensel, L. C. and H. H. John. 1969. A statistical procedure for combining different types of sampling units in a forest inventory. *Forest Science* 15(3): 307-317.