Sottoposto per pubblicazione su ASTRONOMIA
rivista sociale dell'Unione Astrofili Italiani

P. Tanga, L. Bardelli
Sezione Pianeti UAI

Marte nel 2003-2005: la regressione della Calotta Polare Sud

Abstract
The regression of the Martian South Polar Cap was observed under very good sky conditions during the 2003 apparition. CCD images have been measured with appropriate tools in order to retrieve the maximum accuracy from the available data. The latitude measurements allowed us to trace the regression of the cap boundary, and to reconstruct the SPC shape at different epochs. Several observations are sufficiently detailed to show intricate albedo structures inside the cap, including the cryptic zone. A comparison of the ground-based data with those obtained by ESA Mars Express is presented, although the difference in spectral response is probably at the origin of some discrepancies. Nevertheless, telescopic measurements show a fairly good quantitative agreement in the cap extension and shape, thus confirming the extraordinary progress made by amateurs in the domain of high-resolution planetary observations.

Introduzione

Le brillanti calotte polari di Marte, composte sia da ghiaccio d'acqua che di CO_2, sono una delle caratteristiche che si notano per prime all'atto dell'osservazione telescopica. La loro estensione costituisce una caratteristica fondamentale del pianeta, legata al ciclo stagionale e ad altri fattori climatici (opacità dell'atmosfera, temperatura della stessa). In tal senso, si può dire che le calotte siano gli indicatori climatici più facilmente osservabili del pianeta rosso.

La misurazione dell'estensione delle calotte e dello spostamento del suo contorno verso latitudini via via più elevate della primavera e dell'estate marziane ("regressione") è una pratica consueta che risale ai primi studi sistematici del pianeta. La variabilità della "curva di regressione" da un'apparizione all'altra costituisce un oggetto di studio rilevante, che richiede misurazioni il più possibile precise. Ricordiamo anche che solo la regressione è direttamente osservabile, mentre la riformazione della calotta, con passaggio diretto dallo stato di vapore a quello solido, avviene sotto una coltre nuvolosa (polar hood, nord o sud: NPH/SPH) ed è un fenomeno dai contorni molto incerti.

Tradizionalmente, le misure venivano effettuate da osservazioni visuali, fotografiche o direttamente tramite micrometri filari. Tutte queste tecniche, sebbene così diverse tra loro, presentano varie limitazioni che danno luogo a incertezze comparabili sulla misura. Solo alcune osservazioni del Telescopio Spaziale hanno raggiunto risoluzioni maggiori, ma in rare opportunità di osservazione. Neppure le osservazioni del Viking orbiter hanno potuto abbassare l'incertezza di misura sotto ~1°.5 a causa dell'irregolarità del contorno nelle immagini ravvicinate (James e Lumme 1982).

Nell'apparizione perielica del 2003, la geometria favorevole del Polo Sud, rivolto verso la Terra, ha permesso di osservare in dettaglio la veloce regressione della calotta durante la primavera e l'estate dello stesso emisfero. Il generoso diametro apparente e l'utilizzo delle "nuove tecnologie" hanno permesso di raggiungere un livello di dettaglio senza precedenti nell'osservazione amatoriale del pianeta. Si è quindi deciso di utilizzare per questo scopo le

PREPRINT

sole osservazioni CCD (così chiameremo, nel seguito anche quelle ottenute tramite webcam o simili) per le misurazioni della calotta.

Dopo le condizioni estive eccezionali, il progressivo deteriorarsi delle condizioni meteo a partire da Ottobre, accompagnato dall'allontanarsi del pianeta, ha ridotto il numero e la qualità delle osservazioni. Ciò spiega anche la difficoltà di misurare la calotta, quasi al massimo restringimento, oltre il mese di Settembre.

Per supplire a questa mancanza – e tenendo conto della ridotta variabilità della regressione da un ciclo all'altro - sono state selezionate alcune osservazioni dell'apparizione 2005, in corrispondenza delle minime dimensioni della calotta. Tuttavia, in quell'apparizione l'orientazione del disco è stata meno favorevole, e la calotta è apparsa sempre molto prossima al lembo del pianeta, rendendo impossibile un'analisi dettagliata delle ultimissime fasi della regressione.

Le misure

Il procedimento di misura richiede come sempre molte cautele, e il discorso non cambia per il CCD. Il metodo utilizzato consiste nell'utilizzare un programma di di misurazione opportuno, accoppiato col calcolo dell'effemeride fisica del pianeta. Quest'ultima consente di tradurre la posizione sull'immagine in un valore di latitudine e longitudine planetaria. Nel caso della Sezione Pianeti, l'autore di questa nota ha preparato un software di analisi delle immagini planetarie, chiamato "Planetary Data Miner", il quale una volta ultimato dovrebbe essere uno strumento a disposizione non solo dei coordinatori ma anche dei singoli osservatori, e includerà capacità di analisi delle immagini che risponderanno il più possibile a quegli scopi che fin'ora erano appannaggio esclusivo dell'osservazione visuale.

Nel caso dell'applicazione che ci interessa in questo contesto, il programma consente di convertire direttamente le coordinate di un punto dell'immagine in coordinate areocentriche. Per poter effettuare tale conversione, esso necessita di alcune informazioni sull'immagine stessa, come l'orientazione e la posizione del bordo del disco del pianeta.

Ovviamente, non tutte le immagini risultano misurabili con profitto, e quelle di qualità insufficiente o non corredate dei dati essenziali al calcolo delle coordinate hanno dovuto essere scartate. Infatti, le principali fonti di incertezza sono le seguenti:

1. Orientazione del disco del pianeta. Nel corso dell'apparizione è stato messo a punto uno standard di ripresa delle immagini che comprende la segnalazione, tramite una freccia orientata, della direzione del Nord celeste, misurata a partire dalla traccia est-ovest che lascia una stella a moto orario spento. In mancanza di questa informazione, essendo la calotta di Marte eccentrica rispetto al polo di rotazione, l'esatta orientazione del disco risulta estremamente difficoltosa. Sono state quindi utilizzate solo immagini correttamente orientate.

2. Identificazione del lembo di Marte. Questa operazione dipende in modo sensibile dall'elaborazione dell'immagine che l'autore effettua, e dalla scelta dei livelli di luminosità nell'immagine finale. In generale, l'applicazione di filtri passa-alto (come la maschera sfocata o unsharp) tende a restringere leggermente il raggio del pianeta, che si può dire determinato con un'incertezza comunque non superiore al pixel.

3. Identificazione del bordo della calotta. Per minimizzare questa fonte di incertezza si è scelto di effettuare le misure entro 40 gradi dal Meridiano Centrale, e di utilizzare le

PREPRINT

immagini riprese nel rosso (R) o nel vicino infrarosso (I) laddove l'atmosfera è più trasparente ed il bordo della calotta più nettamente delineato.

È interessante notare che, nelle immagini più comuni, le tre cause di incertezza si equivalgono; la (2) e la (3), in particolare, possono dominare quando la nitidezza del pianeta non è dissimile da quella che si otteneva – faticosamente! - con la fotografia tradizionale su pellicola. Nelle migliori immagini ad alta risoluzione, invece, sono la corretta identificazione dell'orientazione (1) e del bordo del pianeta (2), che diventano fattori determinanti. I metodi di ripresa e di elaborazione sono dunque critici per ottenere immagini non solo ricche di dettagli, ma anche "misurabili", e ciò dovrebbe essere ricordato da chi desidera contribuire in modo adeguato al Programma Marte. La corretta definizione dell'orientazione, in particolare, richiede molta cura e diviene critica quando la calotta si riduce alle minime dimensioni.

Questo studio è stato reso possibile dal contributo di vari osservatori, che si sono impegnati a convergere verso uno standard capace di restituire tutte le informazioni desiderate e far fronte alle limitazioni suddette, in particolare L. Comolli (2005), C. Fattinnanzi (2003, 2005), P. Lazzarotti (2003, 2005), D. Licchelli (2003), G. Uri (2005), F. Zanotti (2003), C. Zannelli (2005).

In ogni caso, tutte le osservazioni giunte alla Sezione sono state considerate per la ricostruzione dei chiaroscuri e delle strutture visibili nella calotta polare Sud.

Come noto, il periodo di rotazione di Marte, simile a quello terrestre, non permette agli osservatori di sorvegliare, da una stessa regione del nostro pianeta, un intervallo ampio di longitudini marziane in pochi giorni. Ogni notte lo sfasamento indotto dalla differenza dei periodi alla stessa ora locale è relativamente piccolo (circa 9 gradi). Per comporre il "ritratto" del bordo della calotta lungo tutto il suo sviluppo non sono sufficienti osservazioni a ore diverse, ma occorre appellarsi ad immagini riprese in altri continenti. Sono stati allora incluse in questo studio alcune osservazioni di ottima qualità prodotte da D. Parker (USA) e Tai Wei Leong (Singapore).

Ogni immagine è stata quindi misurata indipendentemente, ricavando più punti disposti lungo il bordo della calotta entro 40 gradi dal MC, come già detto. In presenza di strutture interne alla calotta stessa, o di frammenti staccati (è il caso di Novus Mons), sono state eseguite delle misure specifiche per meglio situarli.

L'insieme delle misurazioni relative al solo bordo della calotta è riassunto in Figura 30. Come si nota, la distribuzione dei punti per ogni data è affetta da una notevole dispersione. Vedremo in seguito che ciò è dovuto non tanto all'incertezza nelle misurazioni ma piuttosto al fatto che il bordo della calotta a un'epoca data si presenta, a seconda della longitudine considerata, a latitudini diverse nello stesso istante. In altre parole, essa non è perfettamente centrata sul polo del pianeta, e la misura istantanea dipende quindi dalla longitudine osservabile.

L'effetto è particolarmente importante nella seconda parte dell'apparizione, quando i punti appaiono notevolmente dispersi. Verso la fine la dispersione tende a diminuire, ma si tratta di un effetto di selezione: a certe longitudini il bordo della calotta non è misurabile o è addirittura invisibile, trovandosi troppo prossimo al lembo del disco del pianeta.

Mappe polari della calotta

In base alla quantità di osservazioni disponibili, si è deciso di costruire una proiezione in vista polare del bordo della calotta, utilizzando le misure ottenute nell'arco di 10 giorni. Solo

PREPRINT

le ultime due decadi di settembre sono state unite per carenza di misure, ottenendo così un totale di 8 proiezioni polari tra il 1 luglio ed il 30 settembre.

Le misure esclusivamente relative al bordo della calotta sono riportate, per ogni decade, nel grafico di sinistra a partire dalla Figura 31. L'origine delle longitudini si trova sull'asse orizzontale, a destra, e le longitudini crescono in senso antiorario (i 90° si trovano in alto).

Il corrispondente disegno di destra mostra una ricostruzione del bordo della calotta e delle caratteristiche di albedo rivelate nelle immagini. È da notare che il bordo ottenuto non è una curva matematica che fornisce il "best fit" dei punti a sinistra: questa soluzione sarebbe stata difficile da calcolare tenuto delle irregolarità e delle possibili lacune nel contorno. Piuttosto, la curva tracciata rappresenta la miglior sintesi dell'andamento fornito sia dalle misure che dalle immagini da cui queste sono state derivate.

Allo stesso modo, le immagini medesime hanno costituito la fonte per la ricostruzione dei chiaroscuri all'interno e intorno alla calotta, che erano visibili in modo appariscente nelle immagini CCD. Alcune misurazioni specifiche hanno permesso di meglio posizionare tali dettagli, e analogamente il frammento separato di Novus Mons, ben visibile a fine agosto.

Per la nomenclatura e la posizione dei dettagli osservati, si può utilizzare la mappa polare di De Vaucouleurs (1950) in Fig. 34.

Nel seguito, si riportano alcuni commenti specifici sull'evoluzione della calotta nei vari periodi corrispondenti alle mappe ottenute.

1-20 luglio

Il pianeta è già sopra i 16" e iniziano ad essere disponibili ottime immagini in quantità sufficiente. La calotta è molto estesa e presenta all'interno un intreccio complesso di chiaroscuri. Le immagini mostrano chiaramente le strutture. Quella di Licchelli (17/7, fig.3) e quella di Zanotti (20/7, fig.4), così come il disegno di Frassati del 21 luglio (fig.5), mostrano un segmento scuro (la Rima Australis) che prepara la separazione del Novus Mons dal resto della calotta. Evidenti indentazioni e piccole protuberanze brillanti iniziano ad apparire presso il bordo. In tal senso, è notevole la presenza di Argenteus Mons (Licchelli (17/7, fig.3), Zanotti (20/7, fig.4) e Frassati il 21/7 (fig.5) presso ~20°, vera e propria "punta brillante". A longitudine più elevata l'immagine di Fattinnanzi (8/7, fig.1) e il disegno di Frassati (13/7, fig. 2) mostrano un'evidente settore scuro nella calotta a latitudini elevate (Parva Depressio/Fretum Ulyxis), che segue l'area chiara di Thyles Mons (presso ~150°).

Si noti che l'apparente bordo scuro delle osservazioni visuali appare come un semplice effetto di contrasto. Esso può facilmente generarsi anche nelle immagini quando l'elaborazione è più aggressiva (Licchelli), mentre non appare con elaborazioni più leggere.

21 luglio – 10 agosto

Novus Mons non produce ancora una discontinuità marcata nella calotta, anche se questa scende a latitudini decisamente inferiori nel settore compreso tra le longitudini ~300° e 90° (passando per il meridiano di riferimento). La regressione è ormai rapida, ed il diametro generoso consente di cogliere dettagli assai fini all'interno della calotta. Da notare nell'immagine di Comolli (27/7, fig. 6) la Rima Australis in grande evidenza, osservata anche da G. Adamoli visualmente il 7/8 (fig. 7). Questa osservazione è accompagnata da stime di intensità che permettono di dedurre un bianco meno brillante per Novus Mons rispetto al resto della calotta, e un contrasto assai debole (molto inferiore rispetto alle immagini elaborate) per la Rima Australis.

PREPRINT

11-20 agosto

Mentre il pianeta si avvicina alle massime dimensioni apparenti, la calotta, di dimensioni più ridotte, appare ora fortemente irregolare. Argenteus Mons appare come una parte di area ridottissima ma particolarmente brillante (Comolli-Zanazzo fig. 9, Licchelli fig. 10, Frassati fig. 13, Lazzarotti fig. 14), mentre un settore ampio di calotta (w~120°-210°, tra ~85° e il bordo della calotta) appare decisamente più scuro (Baldoni fig. 8, Comolli-Zanazzo 12/8 fig. 9, Dal Prete 16/8 fig. 11, Mancini 16/8 fig. 12).
Il Novus Mons ha analogamente diminuito la sua albedo (Lazzarotti fig.14, Dal Prete fig.15) e alla fine del periodo si può considerare come un'appendice di calotta completamente indipendente. Si noti, infine, come particolarità aggiuntiva, l'allungarsi di Rima Angusta, che nell'immagine di Lazzarotti del 19 (fig.14) pare "tagliare" la calotta da ~60° a ~330°.

21-31 agosto

Tutto il settore scuro di cui sopra pare ora dissolto, e la calotta ne risulta ancor più fortemente decentrata, con il baricentro presso ~33°, ~79°. Ciò esclude Novus Mons, la cui complessa struttura interna è rivelata da un'unica immagine di Thai Wei Leong, utilizzata per la mappa polare. Sia Tanga (21/8, fig.16) che Adamoli (22/8, fig.17) identificano una brillante proiezione a ~20° (residuo di Argenteus Mons?) visibile anche nelle immagini di Camaiti (23/8, fig.18) e Baldoni (23/8 fig.20). Osservazioni a longitudini appena più elevate rivelano un'altra proiezione a seguire (Frassati 22/8 fig.19, Dal Prete 23/8 fig.21, Zannelli-Puglia 24/8 fig.22, Zanotti 27/8 fig.24). L'ultima immagine citata, ottenuta con un telescopio di diametro ragguardevole (40 cm) merita una menzione particolare non solo per la prospettiva pressochè completa dei dettagli della calotta, ma anche perchè essa rappresenta un risultato ragguardevole, ed è certamente una delle migliori ottenute da Terra durante l'apparizione 2003. Si noti che la piccola dimensione assunta dalla calotta, nonostante la minima distanza del pianeta, inizia a porre alcune difficoltà all'osservazione visuale, che tuttavia coglie le irregolarità più evidenti con grande facilità (Gandini 27/8, fig.23).

Settembre 1-30

Nel corso di questo periodo, con l'allontanarsi del pianeta, le osservazioni e le misure della calotta divengono via via più difficili. Le ridotte dimensioni.della stessa rendono ancora più critiche le osservazioni. Nonostante ciò, due mappe sono state ancora ricavate, riportando gli ultimi dettagli osservabili, visibili nelle immagini e disegni del periodo.
Quando le longitudini del Novus Mons si ripresentano all'osservabilità dal nostro Paese, non pare esservi più traccia della struttura (Lazzarotti, 26/9, fig.28).
Si noti che in questo periodo, come si diceva nella sezione precedente, quando sono visibili le longitudini tra ~150° e ~240° il bordo della calotta è così vicino al polo di rotazione e così prossimo al lembo del pianeta, da diventare praticamente non misurabile.

Interpretazione dei dati

Per un confronto più agevole con le curve di regressione classiche (estensione della calotta in funzione della longitudine areocentrica Ls), le mappe polari sono state usate per ricavare la dimensione "media" della calotta. Essa è considerata essere ben rappresentata dal valore mediano della co-latitudine del contorno osservato (ovvero il valore intermedio tra la minima e la massima latitudine). Questa convenzione è coerente con quella usualmente considerata in

PREPRINT

ambito professionale, e fatta risalire a James e Lumme (1982), i quali definiscono l'estensione come il raggio del cerchio che meglio approssima il contorno della calotta.
A partire dalla seconda decade di agosto la regione di Novus Mons è considerata non appartenere più alla calotta.
La curva ricavata è riportata in sovrapposizione ai dati di Figura 30. Le minime dimensioni della calotta, a partire da Ls~295°, sono state misurate tramite le osservazioni relative al 2005.
E' di immediato interesse paragonare la regressione osservata nel 2003-2005 con quella dell'analoga apparizione del 1988 (Falorni, 1996). In quell'occasione, solo il contorno della calotta fu ricavato dalle osservazioni (in parte visuali, in parte fotografiche). Invece, fu possibile osservare la calotta presso le sue minime dimensioni grazie all'opposizione settembrina del pianeta. Le mappe furono ricavate dalle medie di molte misure della latitudine misurata della calotta, effettuate sia su disegni che su fotografie tramite la sovrapposizione di un reticolo graduato.
Tra le mappe polari ottenute, quelle confrontabili alle mappe del 1988 corrispondono al periodo agosto-settembre 2007 e la sovrapposizione è quasi perfetta, eccezion fatta per un Novus Mons sottostimato in estensione nel 1988. I massimi scarti dei profili non sono superiori a 3-4 gradi, un risultato notevole che non solo fa onore alle tecniche tradizionali, ma anche ai frutti del faticoso lavoro di misura effettuato da Falorni nell'epoca precedente la diffusione del CCD.
La curva media di regressione media è analogamente ben corrispondente all'analoga pubblicata in Fig. 2 di Falorni (1996). In particolare, si nota come nel 1988 le osservazioni visuali fossero più precise di quelle fotografiche le quali, sebbene di ottima qualità, soffrivano della diffusione dell'immagine nell'emulsione, producendo estensioni della calotta sistematicamente in eccesso, anche se di un paio di gradi di latitudine appena. Di conseguenza, le moderne misure CCD risultano meglio confrontabili con i dati visuali del passato.
Per quanto riguarda i chiaroscuri interni alla calotta, si notano alcune discrepanze e analogie tra le diverse mappe. Se è chiaro che l'evoluzione deve giocare un ruolo inducendo dei cambiamenti d'aspetto, è altrettanto probabile che alcune differenze siano da imputare alla difficoltà di osservare dei dettagli a latitudini estreme, con la conseguente distorsione geometrica. Le diverse tecniche di elaborazione sono anche responsabili dell'alterazione dei contrasti. Torneremo poco oltre, comunque, su questo aspetto.
Un altro confronto di notevole importanza, nonostante la disparità nei mezzi, è offerto dalle ricostruzioni di immagini polari pubblicate da Langevin et al. (2007). Si tratta di mappe dell'albedo a 1.08 μm riprese dalla sonda ESA Mars Express, ottenute durante la regressione del 2005, in proiezione polare, non sempre complete e riprese in condizioni di geometria e illuminazione variabili. Il confronto con quanto osservato nel 2003 è comunque possibile poichè la calotta ha un comportamento assai costante nel tempo.
Sono state selezionate per il confronto 5 mappe che coincidono per longitudine areocentrica con altrettante mappe tra quelle presentate (Fig. 32).
La differenza in lunghezza d'onda e le diverse geometrie di osservazione e illumazione non depongono a favore di un confronto troppo dettagliato e una corrispondenza precisa non può probabilmente essere trovata. Infatti, la sensibilità dei sensori amatoriali all'estremo (1 μm) della loro curva di risposta è quasi nulla. Inoltre in Langevin et al. (2007) sono considerate solo le osservazioni effettuate con la sonda intorno allo zenith della calotta Sud, che offrono la migliore visione e il miglior contrasto dei chiaroscuri. Inutile dire che condizioni ottimali come queste non sono possibili da Terra!
Nonostante queste limitazioni, è interessante notare che l'accordo del profilo della calotta tra i due insiemi di osservazione è estremamente simile.

PREPRINT

Per tutte le mappe qui presentate, la massima discrepanza con la latitudine del contorno misurata dalla sonda è in generale in accordo entro 2-3 gradi! Non solo: se si considera tutto il contorno, le osservazioni sono perfettamente coincidenti entro ~1-2 gradi di latitudine, per gran parte dell'estensione, a ogni epoca. Questo dato è particolarmente solido tra luglio e agosto, nelle migliori condizioni osservative.
Solo puntualmente (in particolare in settembre) il confronto mostra scarti fino a 5 gradi. Questi corrispondono, comunque, a: zone difficilmente osservabili a causa delle minime dimensioni e dell'eccentricità della calotta rispetto al polo; porzioni con meno osservazioni; o infine, aree nelle quali il confronto è difficile.
Circa quest'ultimo punto, occorre notare che ampie aree della calotta risultano avere, nelle immagini ESA, una frontiera assai meno netta di quella che si percepisce al telescopio. Parte di questo effetto può essere attribuito alla limitata risoluzione delle riprese da Terra, ma la differenza nelle condizioni di osservazione sopra citata è sicuramente da chiamare in causa.
L'ampio settore scuro di sui si è detto a proposito della seconda decade di Agosto, corrisponde a quella che in ambito professionale è nota come "regione criptica". Si tratta di un'area della calotta più scura, sulla cui natura non vi erano ipotesi precise fino a tempi recenti. Infatti, pur essendo di albedo paragonabile a quella del suolo nudo, essa era pur sempre composta da ghiaccio di CO_2, come confermato da osservazioni nell'infrarosso termico. Come spiegare quindi la sua peculiarità? Si è innanzitutto ipotizzato che nella regione il ghiaccio fosse depositato in lastre molto omogenee e compatte, trasparenti alla radiazione solare. Questa, penetrando nel ghiaccio, ne avrebbe scaldato gli strati più profondi, adiacenti al suolo sottostante, provocando la sublimazione e l'emissione di anidride carbonica attraverso fratture nella crosta gelata (Piqueux et al. 2003). Questi geysers sono stati rivelati dal Mars Global Surveyor (MGS) sotto forma di strutture che sono state dette "ragni" (Figura 33).
I geysers, come mostrano i depositi scuri visti da MGS, sarebbero sufficientemente intensi da trascinare verso la superficie della calotta una quantità di grani di polvere sufficiente a scurirla localmente (Keiffer 2000).
Tuttavia, secondo le analisi più recenti dei dati ottenuti dalla Mars Express le bande spettrali corrispondenti all'anidride carbonica sono assenti, in contraddizione con l'ipotesi dell'attraversamento di uno strato di ghiaccio da parte della radiazione solare (Langevin et al. 2006). Le polveri devono quindi essere dense e superficiali, e devono impedire l'ingresso della radiazione nel ghiaccio.
Ciò non esclude l'azione dei geysers, ma ancora non è chiaro il loro legame con la regione criptica (che popolano solo parzialmente) e neppure in quale momento della rigenerazione del ghiaccio la polvere sia depositata.
Come si osserva nelle immagini dalla sonda, la regione criptica corrisponde solo in parte alle regioni scure riportate sulle carte storiche (Magna Depressio, Parva Depressio).
Analoga complessità si ritrova nelle osservazioni qui presentate, la cui analisi precisa nelle regioni polari, tuttavia, richiederebbe una calibrazione più complessa e accurata, che conservi il dato fotometrico anche presso il lembo: quanto di più difficile da ottenere quando si considera la disparità delle elaborazioni e dei mezzi adottati.
Della differenza circa le condizioni di ripresa dallo spazio si è già detto: non è quindi il caso di cercare di spingere oltre la ricerca di analogie e differenze, che risultano evidenti dal paragone con le figure qui presentate.

PREPRINT

Conclusioni

Con questo lavoro, si è mostrato che la derivazione di un contorno preciso della calotta polare è alla portata delle immagini amatoriali, anche se occorrono specifici accorgimenti, in particolare sulla corretta orientazione delle immagini.
I chiaroscuri presenti sul contorno ripresi dalle sonde, a 1 μm di lunghezza d'onda, difficilmente possono essere confrontati con i dettagli ripresi dalle camere amatoriali, che tendono a vedere tali zone più compatte, e a mostrare contorni definiti. La ragione non risiede probabilmente solo nella risoluzione spaziale limitata, ma anche nella diversa risposta spettrale.
Peraltro, i chiaroscuri visibili sulla calotta nelle osservazioni ricevute dalla Sezione sono molto più complessi di quelli storicamente riportate sulle carte storiche, segno inequivocabile dei progressi delle osservazioni telescopiche con strumenti di diametro modesto.
Il più importante risultato qui presentato riguarda comunque la misura della regressione del bordo della calotta. Essa è compatibile con le osservazioni del passato nei valori medi, ma non solo: la qualità delle misure ha permesso di ricostruire con grande dettaglio il processo di regressione, attraverso la misura del bordo a diverse longitudini.
I contorni ricavati rivelano in modo perfettamente coerente le irregolarità che sono state osservate visualmente e con le camere CCD.
Il contorno e la sua evoluzione risultano anche in ottimo accordo con le osservazioni effettuate dallo spazio. A nostra conoscenza, è la prima volta che un contronto di questo tipo viene spinto a tale livello di dettaglio, e i risultati non possono che fare onore agli osservatori non professionisti che hanno contrubuito alla Sezione nel 2003 e 2005.
Infine, una nota di merito particolare va agli osservatori che hanno seguito le istruzioni specifiche per l'osservazione del pianeta, in particolare circa l'orientazione del disco nelle immagini. Questo aspetto è stato fondamentale per la selezione e l'analisi delle immagini.

Bibliografia

Falorni, M., 1996, La calotta polare Sud di Marte nel 1988, Astronomia UAI **4**, 5-12

James, P.B., Lumme, K., 1982, Martian south polar CAP boundary - 1971 and 1973 data, Icarus **50**, 368-380

Kieffer, H. H.; Titus, T. N., Mullins, K. F., Christensen, P. R., 2000, Mars south polar spring and summer behavior observed by TES: Seasonal cap evolution controlled by frost grain size, J. Geophys. Res. **105**, E4, 9653-9700

Langevin, Y., Douté, S., Vincendon, M., Poulet, F., Bibring, J.-P., Gondet, B., Schmitt, B., Forget, F., 2006, No signature of clear CO_2 ice from the `cryptic' regions in Mars' south seasonal polar cap, Nature, **442**, 7104, 790-792

Langevin, Y., Bibring, J.-P., Montmessin, F., Forget, F., Vincendon, M., Douté, S., Poulet, F., Gondet, B., 2007, Observations of the south seasonal cap of Mars during recession in 2004-2006 by the OMEGA visible/near-infrared imaging spectrometer on board Mars Express, J. Geophys. Res. **112**, E8, E08S12

PREPRINT

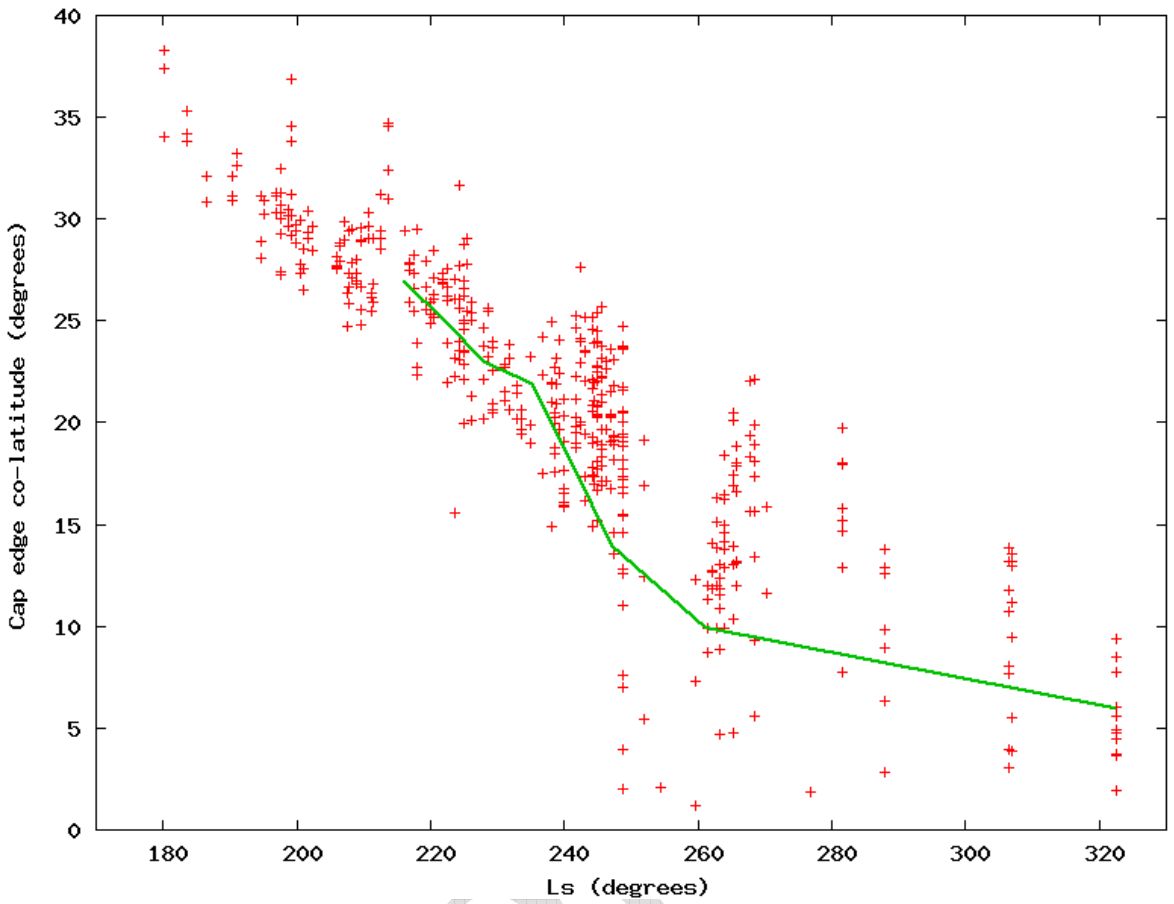
Piqueux, S., Byrne, S., Richardson, M. I., 2003, Sublimation of Mars's southern seasonal CO_2 ice cap and the formation of spiders, J. Geophys. Res. **108**, E8, 5084

De Vaucouleurs, G.H., 1950, The planet Mars, London, Faber and Faber

Figura 1-29 Osservazioni rilevanti per la struttura della calotta in fase di regressione.

Figura 1. C. Fattinnanzi, 08/07/2003, MC: 98°, Newton 25 cm, webcam, IR-cut/IR-pass
Figura 2. M. Frassati, 13/07/2003, MC: 76°, Schmidt-Cassegrain 20 cm, visuale
Figura 3. D. Licchelli, 17/07/2003, MC: 13°, Newton 20 cm, webcam, IR-cut
Figura 4. F. Zanotti, 20/07/2003, MC: 351°, Newton 45 cm, webcam, IR-pass RG695
Figura 5. M. Frassati, 21/07/2003, MC: 340°, Schmidt-Cassegrain 20 cm, visuale
Figura 6. L. Comolli, 27/07/2003, MC: 300°, Schmidt-Cassegrain 20 cm, webcam, IR-cut/W25
Figura 7. G. Adamoli, 07/08/2003, MC: 186°, Rifrattore 11 cm, visuale
Figura 8. P. Baldoni, 11/08/2003, MC: 154°, Maksutov-Newton 18 cm, webcam, IR-cut
Figura 9. L. Comolli - A. Zanazzo, 12/08/2003, MC: 127°, Trisciefspiegler 30 cm, webcam, W25
Figura 10. D. Licchelli, 15/08/2003, MC: 64°, Newton 20 cm, webcam, filtro rosso
Figura 11. I. Dal Prete, 16/08/2003, MC: 104°, Newton 20 cm, visuale, filtro rosso
Figura 12. R. Mancini, 16/08/2003, MC: 76-84°, Newton 20 cm, webcam, IR-cut/W25
Figura 13. M. Frassati, 19/08/2003, MC: 50°, Schmidt-Cassegrain 20 cm, visuale, W23A
Figura 14. P. Lazzarotti, 19/08/2003, MC: 15°, Maksutov-Cassegrain 18 cm, W25
Figura 15. I. Dal Prete, 20/08/2003, MC: 9°, Newton 20 cm, visuale
Figura 16. P. Tanga, 21/08/2003, MC: 358°, Maksutov-Newton 18 cm, visuale, W21, W80, W38A
Figura 17. G. Adamoli, 22/08/2003, MC: 4°, Rifrattore 11 cm, visuale, W15, W25, W44A, W58
Figura 18. P. Camaiti, 22/08/2003, MC: 349°, Schmidt-Cassegrain 28 cm, IR-cut/IR-pass RG695
Figura 19. M. Frassati, 22/08/2003, MC: 8°, Schmidt-Cassegrain 20 cm, visuale, W23A
Figura 20. P. Baldoni, 23/08/2003, MC: 346°, Maksutov-Newton 18 cm, webcam, IR-cut
Figura 21. I. Dal Prete, 23/08/2003, MC: 20°, Newton 20 cm, visuale, filtro rosso
Figura 22. C. Zannelli – G. Puglia, 24/08/2003, MC: 12°, Newton 41 cm, webcam, IR-cut/W25
Figura 23. E. Gandini, 27/08/2003, MC: 298°, Rifrattore 12 cm, visuale, W23A
Figura 24. F. Zanotti, 27/08/2003, MC: 344°, Newton 45 cm, webcam, IR-cut/IR-pass IR80
Figura 25. C. Fattinnanzi, 19/09/2003, MC: 93°, Newton 25 cm, webcam, IR-cut/IR-pass
Figura 26. R. Mancini, 22/09/2003, MC: 70°, Newton 20 cm, webcam, IR-cut/W25
Figura 27. P. Tanga, 25/09/2003, MC: 35°, Maksutov-Newton 18 cm, visuale, W21
Figura 28. P. Lazzarotti, 26/09/2003, MC: 8°, Newton 25 cm, IR-cut
Figura 29. M. Cicognani, 06/10/2003, MC: 271°, Cassegrain 41 cm, visuale, W25A, W80A

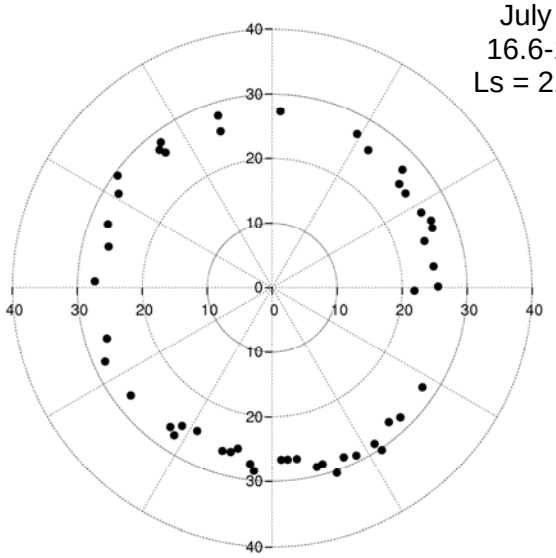
Figura 30 – Andamento complessivo della regressione della calotta di Marte nelle apparizioni 2003 e 2005, in funzione della longitudine areocentrica del Sole (Ls), indice della stagione. La linea sovrapposta rappresenta il raggio medio della calotta rivato dalle mappe di Fig. 2. Il fatto che le osservazioni non siano sempre disposte simmetricamente rispetto al valore medio è dovuto ad una distribuzione talvolta fortemente non omogenea delle misure lungo il contorno della calotta stessa.

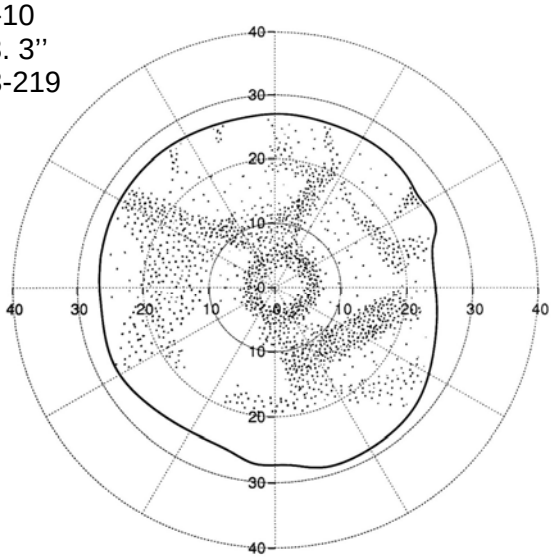


PREPRINT

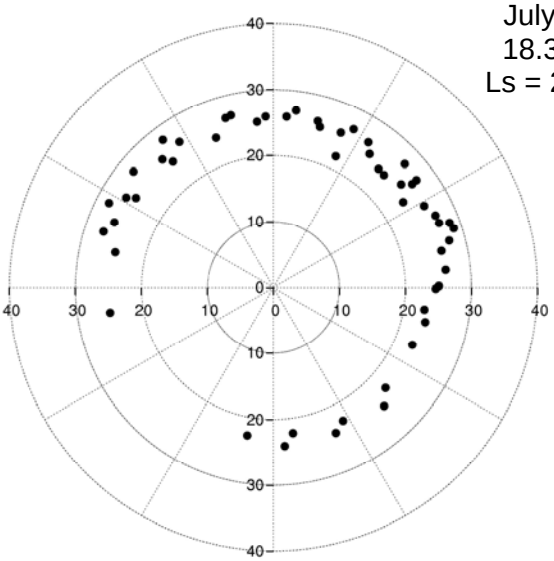
Figura 31 – Proiezione polare della calotta, vista dallo zenith del Polo Sud marziano, tra il 1 luglio ed il 30 settembre. L'origine delle longitudini si trova a destra, e la longitudine cresce in senso orario. Per le spiegazioni dettagliate si veda il testo.

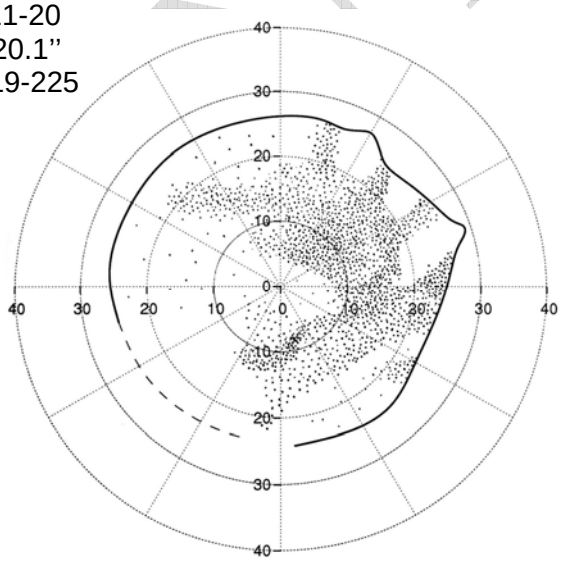
July 1-10
16.6-18. 3''
Ls = 213-219



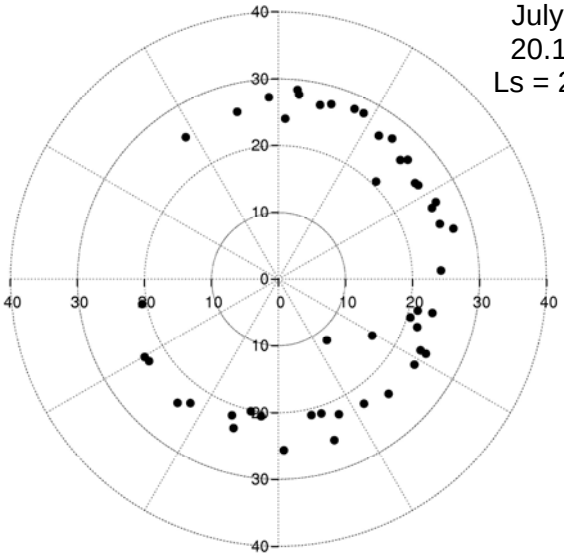


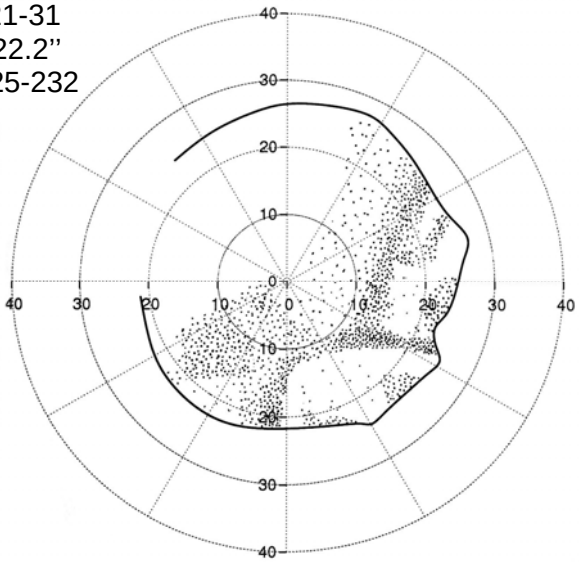
July 11-20
18.3-20.1''
Ls = 219-225



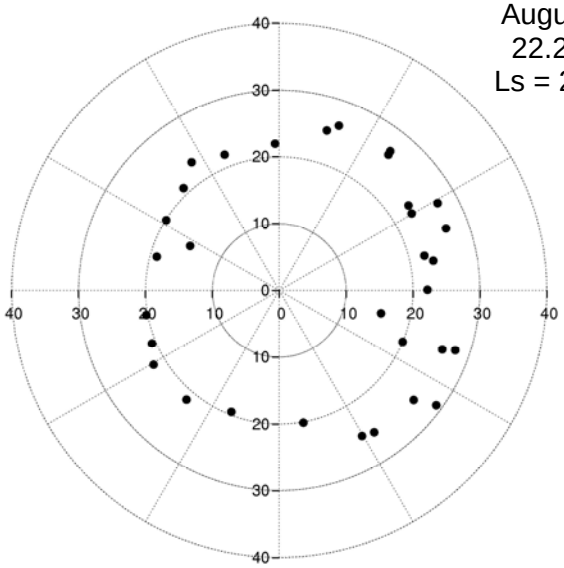


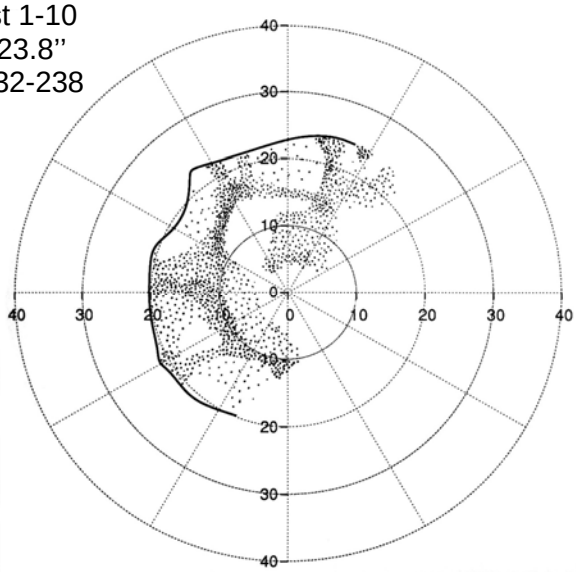
July 21-31
20.1-22.2''
Ls = 225-232



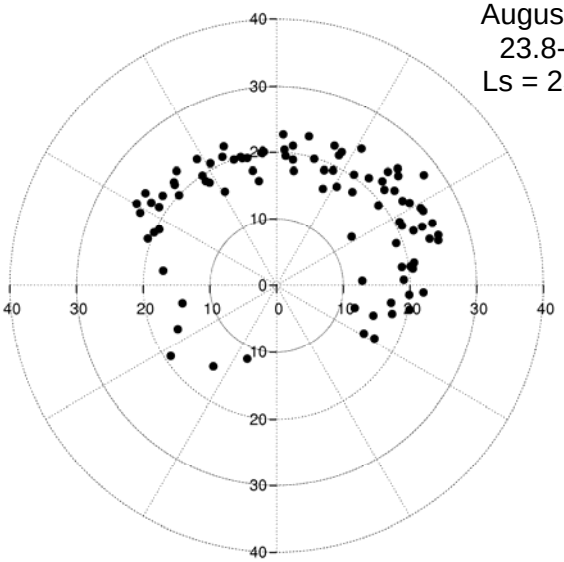


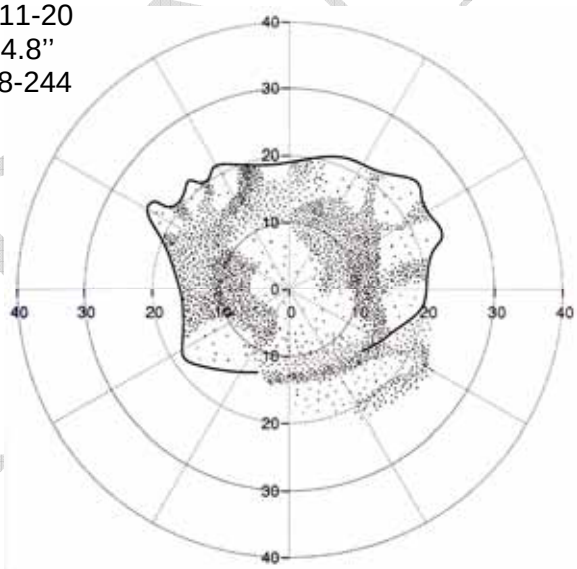
August 1-10
22.2-23.8''
Ls = 232-238



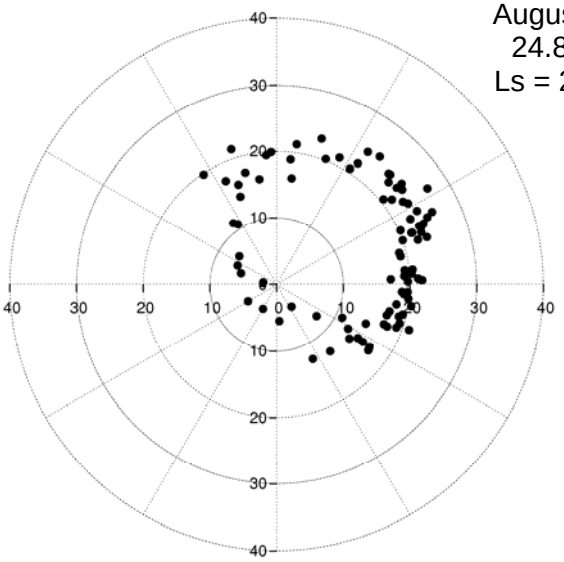


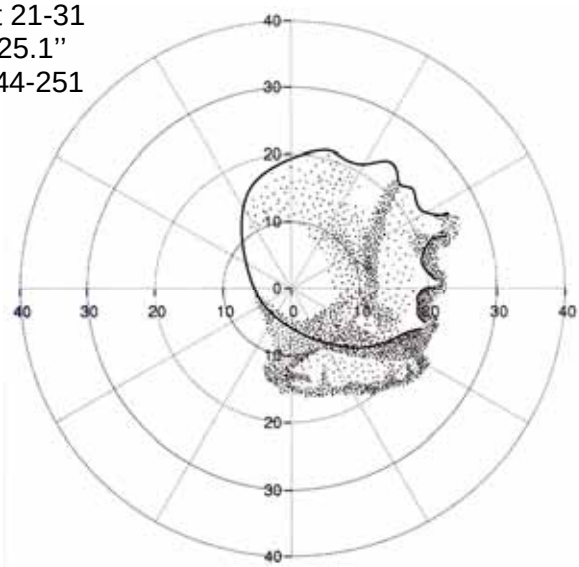
August 11-20
23.8-24.8''
Ls = 238-244



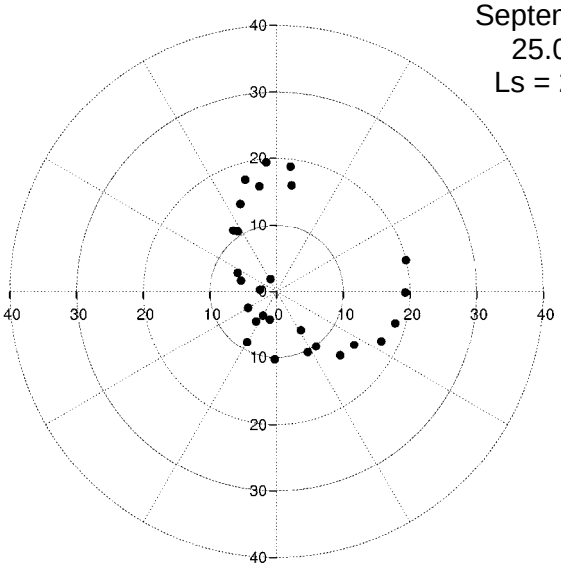


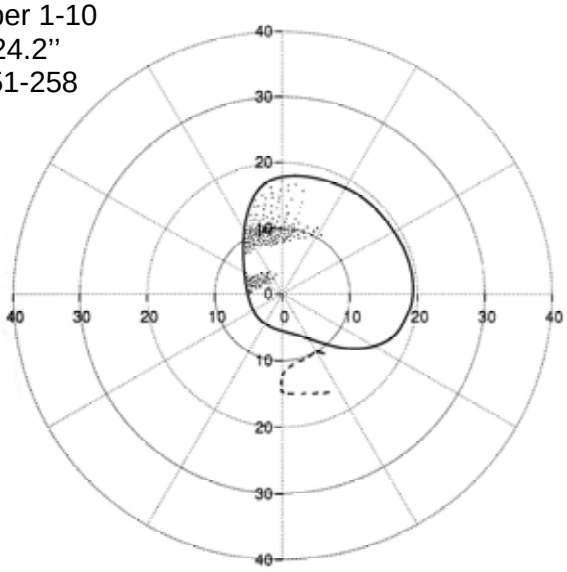
August 21-31
24.8-25.1''
Ls = 244-251



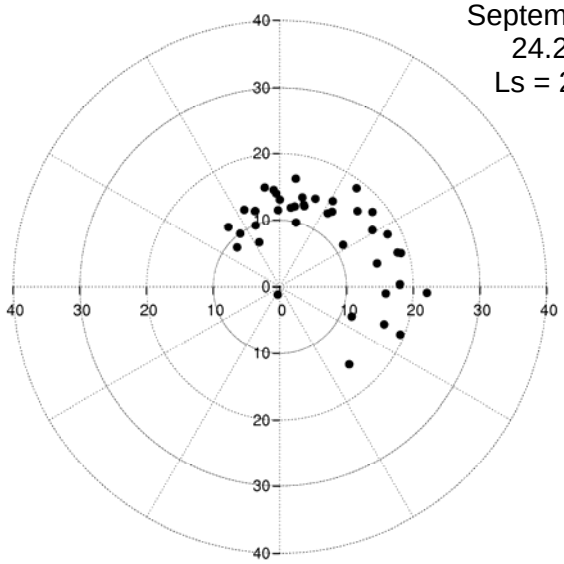


September 1-10
25.0-24.2''
Ls = 251-258





September 11-30
24.2-20.7''
Ls = 258-270



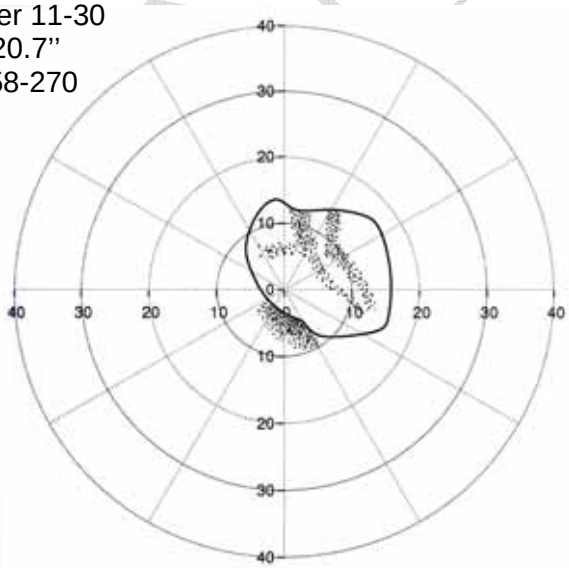


Figura 32 – Mappe polari ottenute dallo strumento OMEGA (Visible and Infrared Mineralogical Mapping Spectrometer) a bordo della sonda europea Mars Express (ESA) da Langevin et al (2007). Sono state selezionate le mappe che più si avvicinano alle epoche delle ricostruzioni di Fig. 31. Le zone bianche costituiscono l'immagine dei ghiacci polari riprese a 1 μm. I settori gialli sono aree mancanti della ricostruzione. La linea nera rappresenta il corrispondente contorno delle osservazioni UAI.

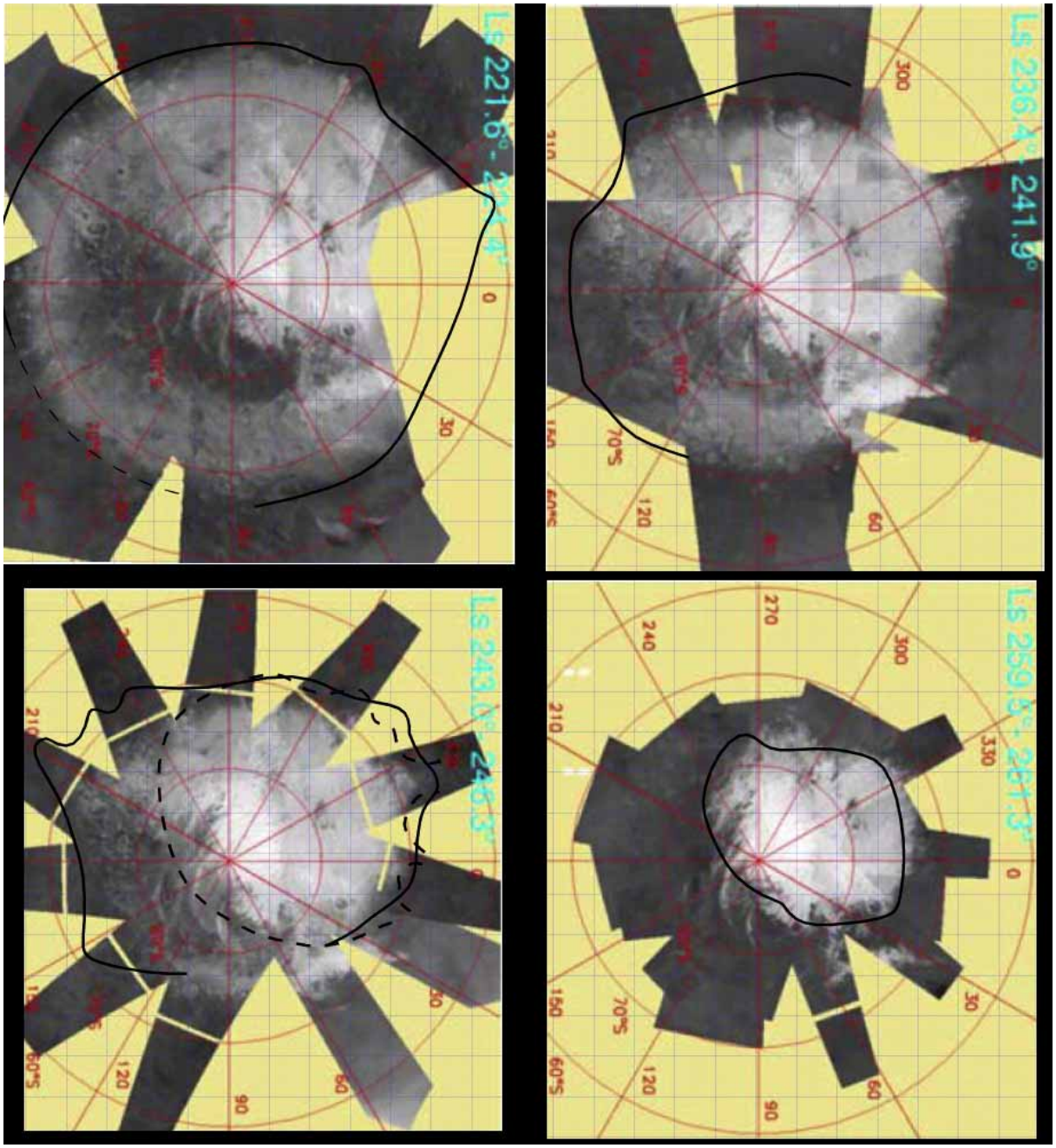


Figura 33 – Immagine dettagliata della regione polare sud di Marte (latitudine -86.3°) ripresa dalla Mars Orbiter Camera del Mars Global Surveyor nel corso dell'estate (Ls~270°) quando il ghiaccio di CO_2 è quasi del tutto sublimato. Sono visibili i "ragni". L'immagine copre un'area di circa 3 x 7 km.

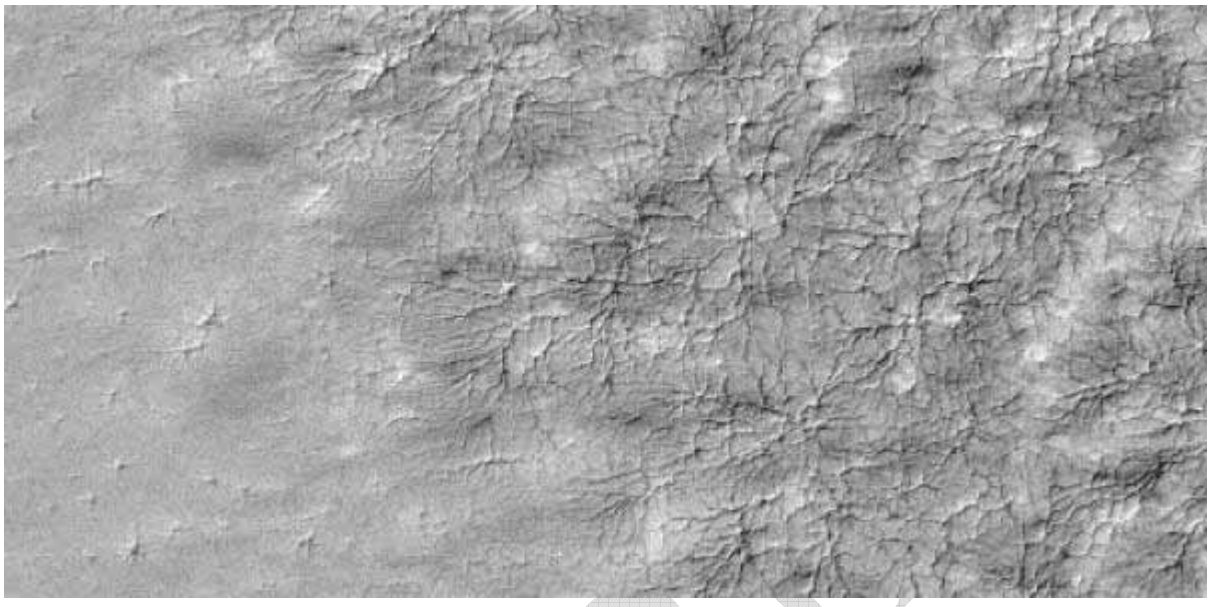
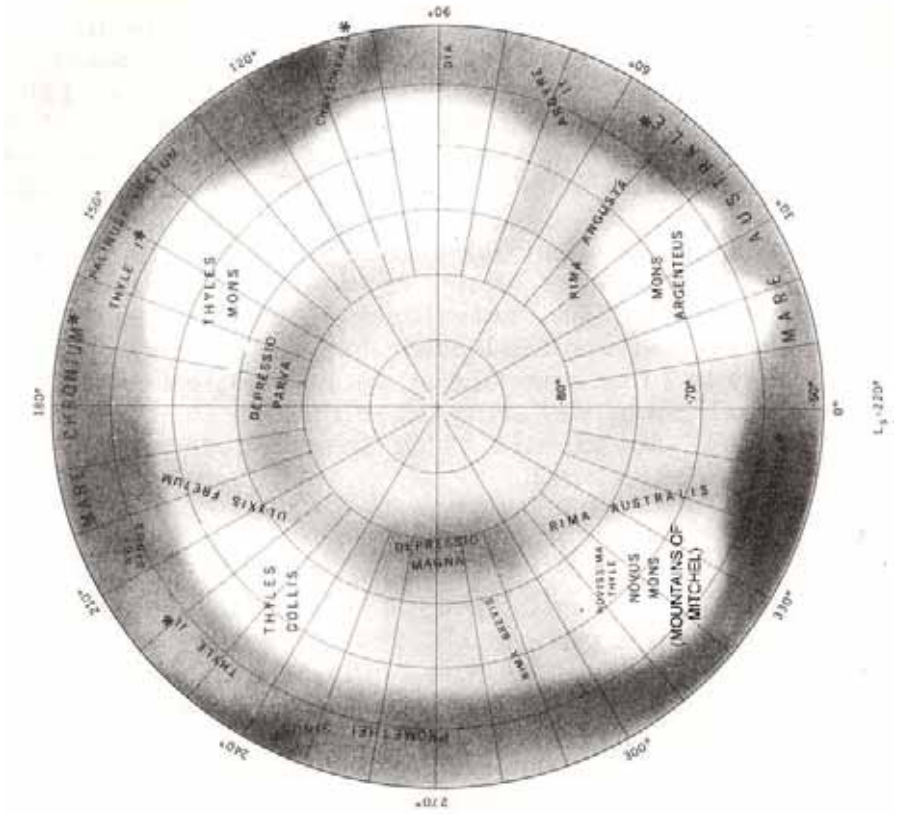



Figura 34 – Mappa della regione polare Sud di Marte, da de Vaucouleurs (1950) con la nomenclatura associata. L'orientazione è equivalente alle mappe polari qui presentate.