



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΥ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟΥ
ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗΣ**

Αλέξανδρος Κ. Καρανάσιος
Επιβλέπων: Δ. Κουτσογιάννης
Καθηγητής Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2016

ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ

- ✘ 1. Ιστορική εξέλιξη μοντέλων εκτίμησης εξατμοδιαπνοής
- ✘ 2. Διατύπωση νέου παραμετρικού μοντέλου δυνητικής εξατμοδιαπνοής – Φυσική θεμελίωση παραμέτρων
- ✘ 3. Βάση Δεδομένων
- ✘ 4. Επεξεργασίες μοντέλου (Βαθμονόμηση, Χωρική Παρεμβολή παραμέτρων, Αξιολόγηση, Επαλήθευση)
- ✘ 5. Αποτελέσματα επεξεργασιών
- ✘ 6. Παραγωγή παγκόσμιων χαρτών μηνιαίας δυνητικής εξατμοδιαπνοής- Εφαρμογή Τηλεπισκόπησης
- ✘ 7. Συμπεράσματα

1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗΣ

A. Εποχή προ Dalton (Εποχή πριν τον 19^ο αιώνα)

- × Απαρχή μελέτης υδρολογίας σε επιστημονικό επίπεδο το **1674**, με την έκδοση του βιβλίου του **Perrault «On the Origin of Springs»**
- × Στον **Perrault** πιστώνεται επίσης η πρώτη **πειραματική μέτρηση της εξάτμισης**
- × Πρώτη **απευθείας μέτρηση εξάτμισης** από τον **Edmund Halley** το **1686**
- × Τον 18^ο αιώνα αναπτύσσονται ιδέες – βάσεις για μελλοντική κατανόηση φαινομένου εξάτμισης
- × Με τα πειράματα του **De Luc** το **1792** τερματίζεται η αντίληψη ότι η εξάτμιση είναι διαδικασία διάλυσης του νερού στον αέρα.
Πρόδρομος θεωρίας μερικών πιέσεων – Βάση θεωρίας Dalton

1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗΣ

B. Εποχή από Dalton μέχρι Penman (1800 - 1948)

- × Αργή εξέλιξη στην κατανόηση του φαινομένου της εξάτμισης.
- × Ορόσημα:
 - Εισαγωγή του **λόγου Bowen το 1926**
 - Προσέγγιση εξάτμισης από λίμνη με χρήση **ενεργειακού ισοζυγίου και λόγο Bowen από Cummings και Richardson το 1927**

1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗΣ

Γ. Εποχή από Penman (1948) έως σήμερα

- ✘ Ο Penman (1948) συνδύασε την εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου και την εξίσωση μεταφοράς και κατέληξε στην παρακάτω εξίσωση για την εκτίμηση της εξάτμισης από υδάτινη επιφάνεια:

$$E' = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} F(u) D$$

- ✘ Αργότερα ο Monteith επέκτεινε την εξίσωση για την εκτίμηση της εξατμοδιαπνοής. Απαραίτητες μεταβλητές η θερμοκρασία, η ηλιοφάνεια, η σχετική υγρασία και η ταχύτητα ανέμου.

1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗΣ

Απλοποιήσεις των μεθόδων συνδυασμού

- × Η υπολογιστική πολυπλοκότητα των μεθόδων συνδυασμού οδήγησε πολλούς ερευνητές στη διατύπωση εξισώσεων με λιγότερα απαιτούμενα πρωτογενή δεδομένα
- × Η εξίσωση **Priestley – Taylor (1972)** χρησιμοποιεί τον ενεργειακό όρο της εξίσωσης Penman, τον οποίο επαυξάνει κατά 30% παραλείποντας τον όρο της μεταφοράς, ενώ δεν απαιτείται η γνώση της ταχύτητας του ανέμου

$$E = a_e \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{Rn}{\lambda}$$

- × Η σχέση του **Linacre (1977)** απαιτεί μόνο τη θερμοκρασία

$$E = \frac{700(T + 0.006z)/(100 - \phi) + 15(T - T_d)}{80 - T} \text{ (mm / d)}$$

1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗΣ

Απλοποιήσεις των μεθόδων συνδυασμού

- × Μια κατηγορία των απλοποιήσεων των μεθόδων συνδυασμού είναι οι μέθοδοι που περιλαμβάνουν ως αναγκαίες εισερχόμενες μεταβλητές τη **μέση θερμοκρασία** και την **εξωγήινη ακτινοβολία**

Σχέση
Jensen - Haise
(1963)

$$PE = \frac{Re}{\lambda \rho} \frac{T_{\alpha}}{40}$$

Σχέση
McGuinness-
Bordne
(1972)

$$PE = \frac{Re}{\lambda \rho} \frac{T_{\alpha} + 5}{68}$$

Σχέση
Oudin et. al
(2003)

$$PE = \frac{Re}{\lambda \rho} \frac{T_{\alpha} + 5}{100}$$

1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗΣ

Εμπειρικά μοντέλα

- × Βασίζονται σε εμπειρικές εκφράσεις, απαιτούν θερμοκρασιακά δεδομένα εισόδου και έχουν τύχει ευρείας εφαρμογής κυρίως για την εκτίμηση των υδατικών αναγκών

Μέθοδος
Thornthwaite

$$E_p = 16 \left(\frac{10 T_a}{J} \right)^a \frac{\mu N}{360}$$

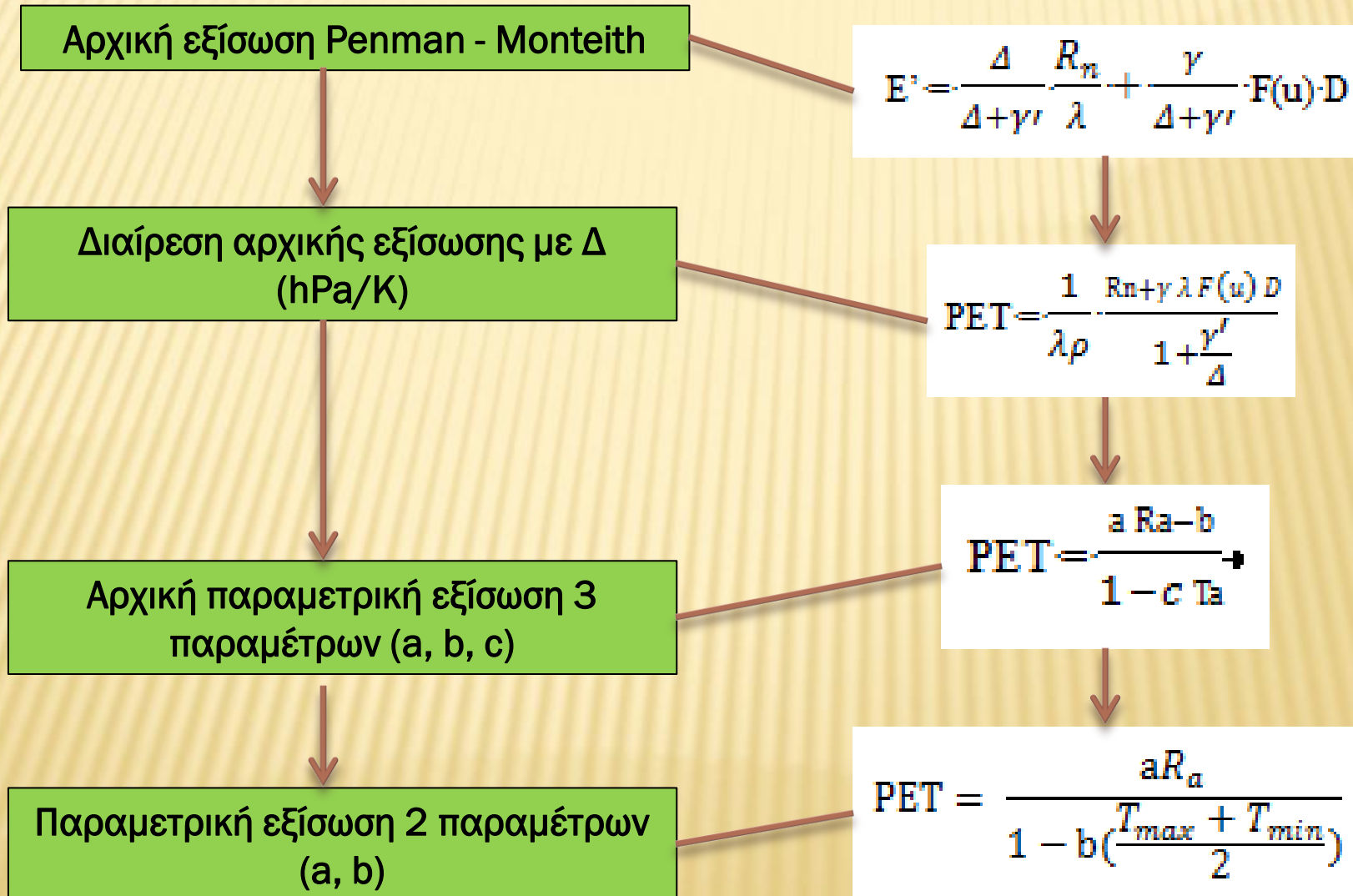
Μέθοδος
Blaney - Criddle

$$E_p = 0.254 K_c p (32 + 1.8 T_a)$$

Μέθοδος
Hargreaves

$$E_{rc} = \frac{0.0023 S_0}{\lambda} (T_a + 17.8) (T_{\max} - T_{\min})^{0.5}$$

2. ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ - ΦΥΣΙΚΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ



2. ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ - ΦΥΣΙΚΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

$$PET = \frac{1}{\lambda \rho} \frac{R_n + \gamma F(u) D}{1 + \frac{\gamma'}{\Delta}}$$

$$PET = \frac{a R_a}{1 - b \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right)}$$

Μονάδες παραμέτρων

a σε kg kJ^{-1}

b σε $^{\circ}\text{C}^{-1}$

- × Ο όρος $\mathbf{a^*} = \mathbf{a} / \lambda \rho$ αντιπροσωπεύει το μέσο ποσοστό ενέργειας που παρέχεται από τον ήλιο (σε όρους R_a) και που αφού φτάσει στην επιφάνεια της γης μετατρέπεται σε λανθάνουσα θερμότητα, κινητοποιώντας έτσι τη διαδικασία της εξατμοδιαπνοής.
- × Ο όρος $\mathbf{1 - b (T_{max} + T_{min})/2}$ προσεγγίζει τον όρο $\mathbf{1 + \gamma' / \Delta}$ και είναι συνάρτηση της μέσης θερμοκρασίας του αέρα.

3. ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

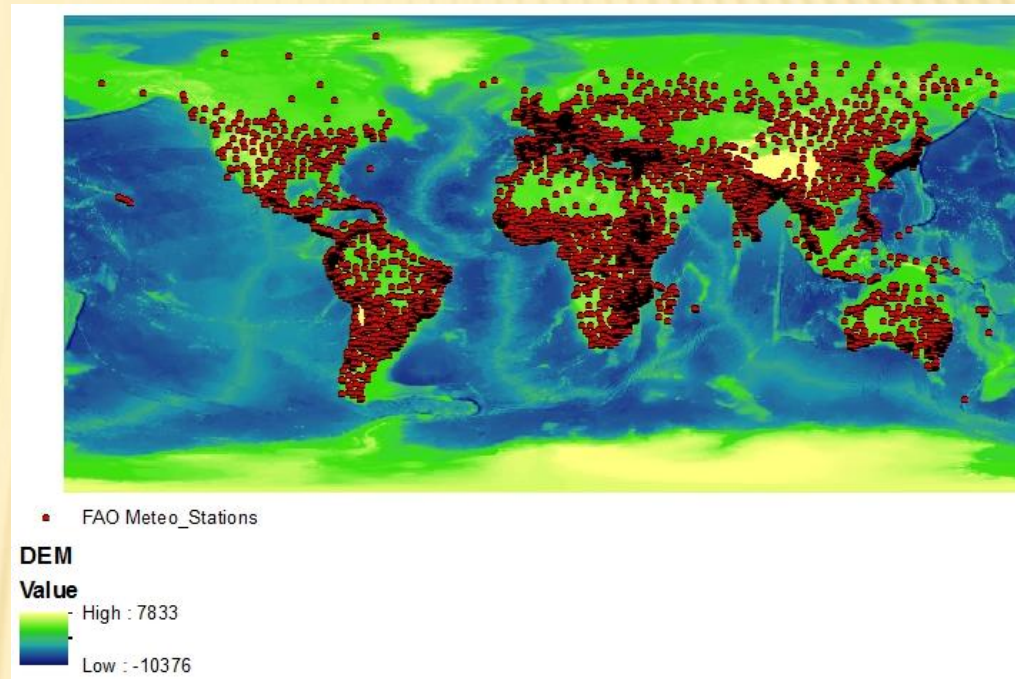
☐ **4069 υδρομετεωρολογικοί σταθμοί**
της κλιματικής βάσης δεδομένων
CLIMWAT 2.0

✓ Κατανομή σε **5 γεωγραφικές ενότητες**:

- ✓ **910 στην Αφρική**
- ✓ **341 στην ευρύτερη περιοχή της Αυστραλίας**
- ✓ **1849 στην Ευρασία**
- ✓ **364 στη Βόρεια Αμερική**
- ✓ **605 στη Νότια Αμερική**

✓ Οι πληροφορίες για τους σταθμούς αντλούνται από τη βάση δεδομένων του Agromet Group της FAO.

✓ Η βάση δεδομένων CLIMWAT 2.0 παρέχει μακροπρόθεσμες μέσες μηνιαίες τιμές **επτά κλιματικών παραμέτρων** (μέση ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία, μέση ημερήσια ελάχιστη θερμοκρασία, μέση σχετική υγρασία, μέση ταχύτητα ανέμου, μέση διάρκεια ηλιοφάνειας ανά ημέρα, μέση ηλιακή ακτινοβολία, μηνιαία βροχόπτωση, μηνιαία ενεργός βροχόπτωση, δυνητική εξατμοδιαπνοή που έχει υπολογιστεί με τη μέθοδο Penman Monteith). Τα δεδομένα καλύπτουν συνήθως την **περίοδο 1971 – 2000**.



4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

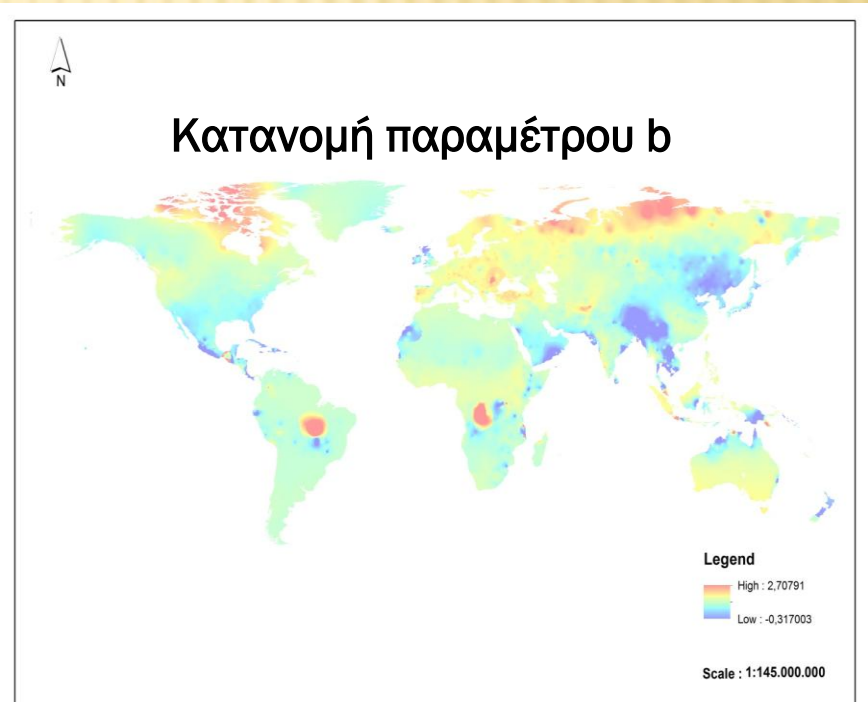
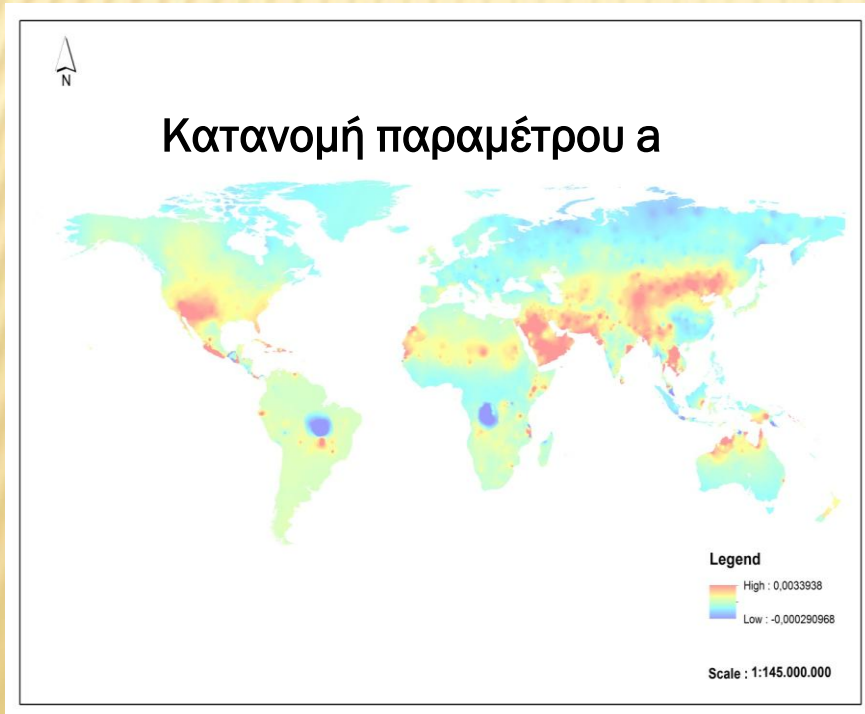
□ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΣΕ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΚΛΙΜΑΚΑ

- **Μηνιαία δυνητική εξατμοδιαπνοή κατά Penman – Monteith**, όπως υπολογίζεται στη βάση CLIMWAT 2.0
- Αυτόματη **προσαρμογή παραμετρικής εξίσωσης** με τη μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων και **εξαγωγή** παραμέτρων **a** και **b**
- Υπολογισμός **στατιστικών δεικτών** (NSE, MAE, BIAS, R^2 , RMSE) αξιολόγησης της βαθμονόμησης

4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

□ ΧΩΡΙΚΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ a ΚΑΙ b

- Εφαρμογή μεθόδου Σταθμισμένων Αντιστρόφων Αποστάσεων (IDW)
- Παραγωγή παγκόσμιων χαρτών κατανομής παραμέτρων **a** και **b**



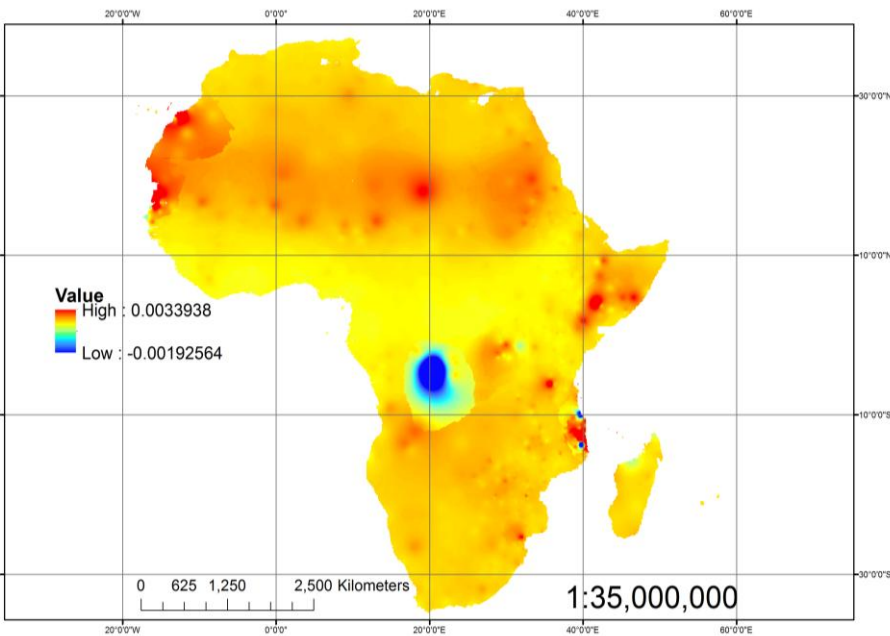
4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

□ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ 55 ΣΤΑΘΜΟΥΣ (Η.Π.Α., ΙΣΠΑΝΙΑ, ΓΕΡΜΑΝΙΑ, ΕΛΛΑΔΑ)

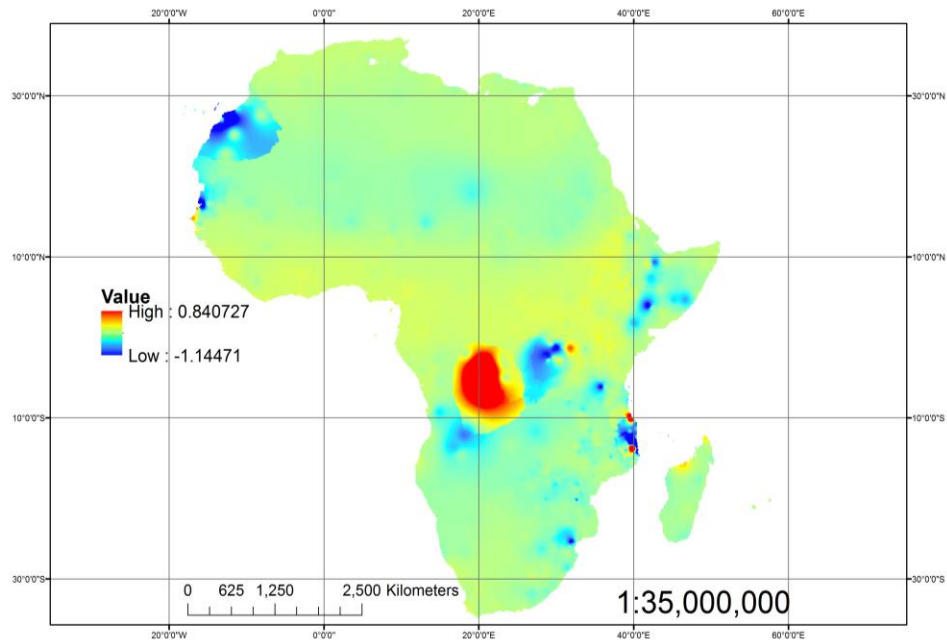
- Υπολογισμός **μηνιαίας δυνητικής εξατμοδιαπνοής** σε μεγαλύτερη χρονοσειρά από το κλιματικό δείγμα της βαθμονόμησης.
- Υπολογισμός **μηνιαίας δυνητικής εξατμοδιαπνοής με χρήση της παραμετρικής εξίσωσης** και των παραμέτρων που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση και τη χωρική παρεμβολή των παραμέτρων και δεδομένα εισόδου την εξωγήινη ακτινοβολία (υπολογίστηκε μέσω αναλυτικών σχέσεων) κάθε σταθμού και τη μέση μηνιαία θερμοκρασία.
- Υπολογισμός **στατιστικών δεικτών** (NSE, MAE, BIAS, R^2 , RMSE) αξιολόγησης της απόδοσης του μοντέλου στους 55 σταθμούς της επαλήθευσης.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΩΝ

Χωρική παρεμβολή παραμέτρου α Αφρική

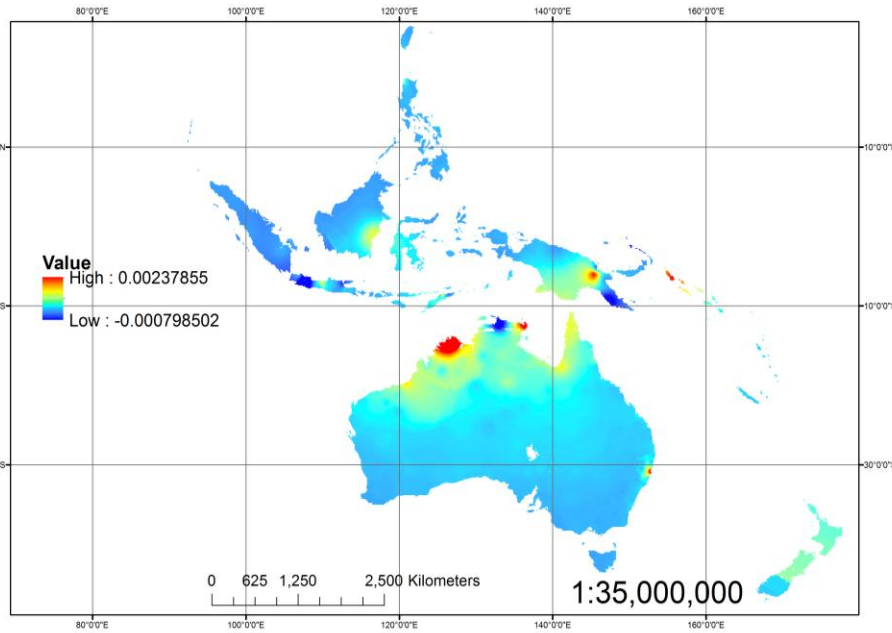


Χωρική παρεμβολή παραμέτρου b Αφρική

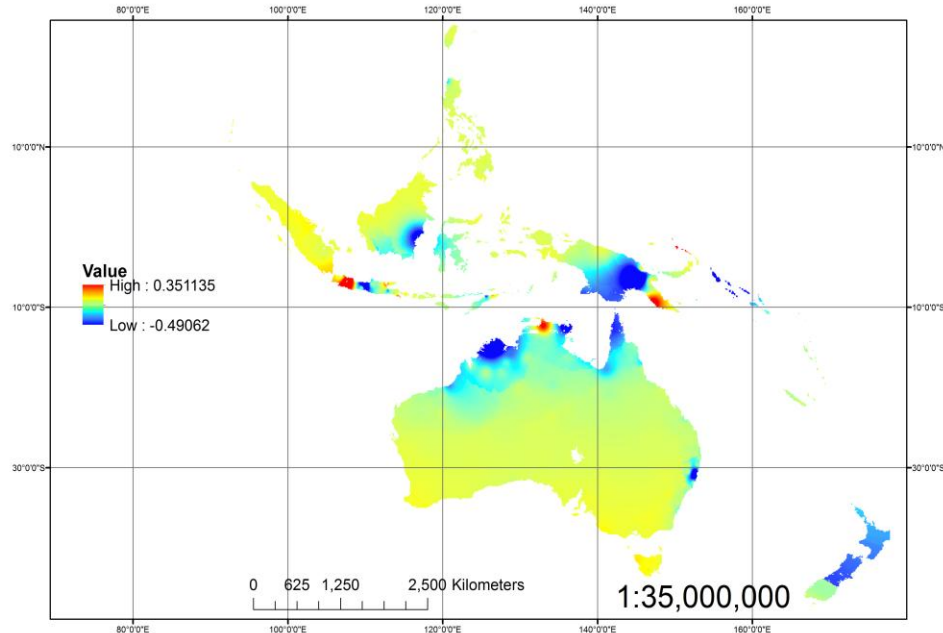


5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΩΝ

Χωρική παρεμβολή παραμέτρου a Περιοχή Αυστραλίας

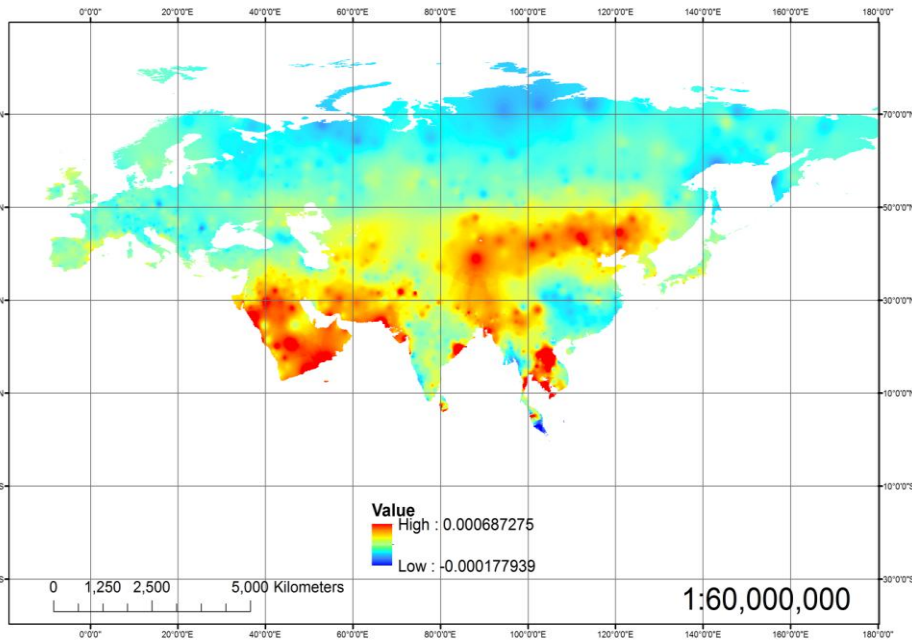


Χωρική παρεμβολή παραμέτρου b Περιοχή Αυστραλίας

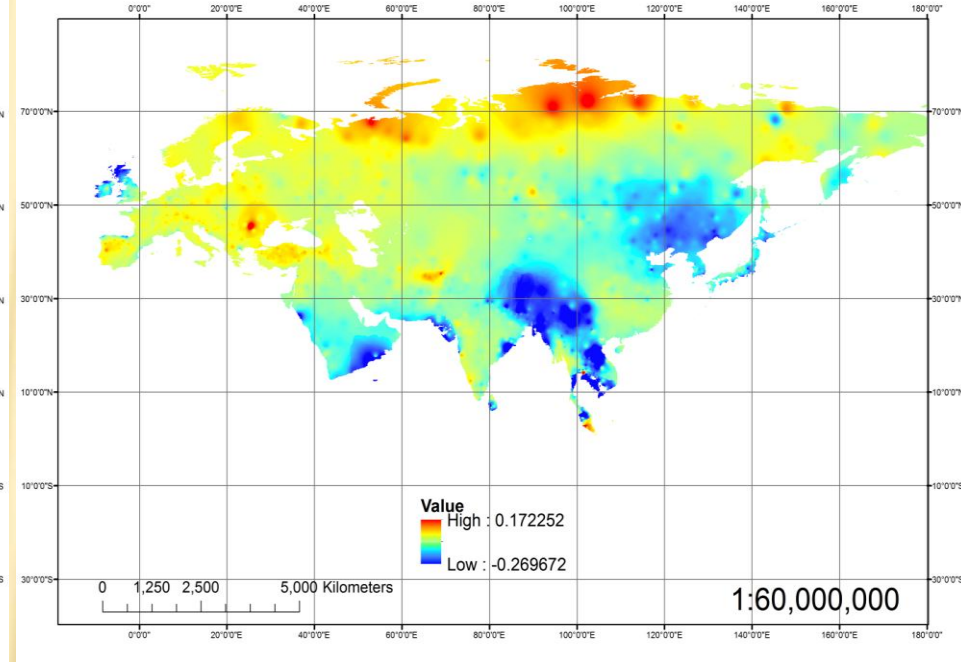


5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΩΝ

Χωρική παρεμβολή παραμέτρου α Ευρασία

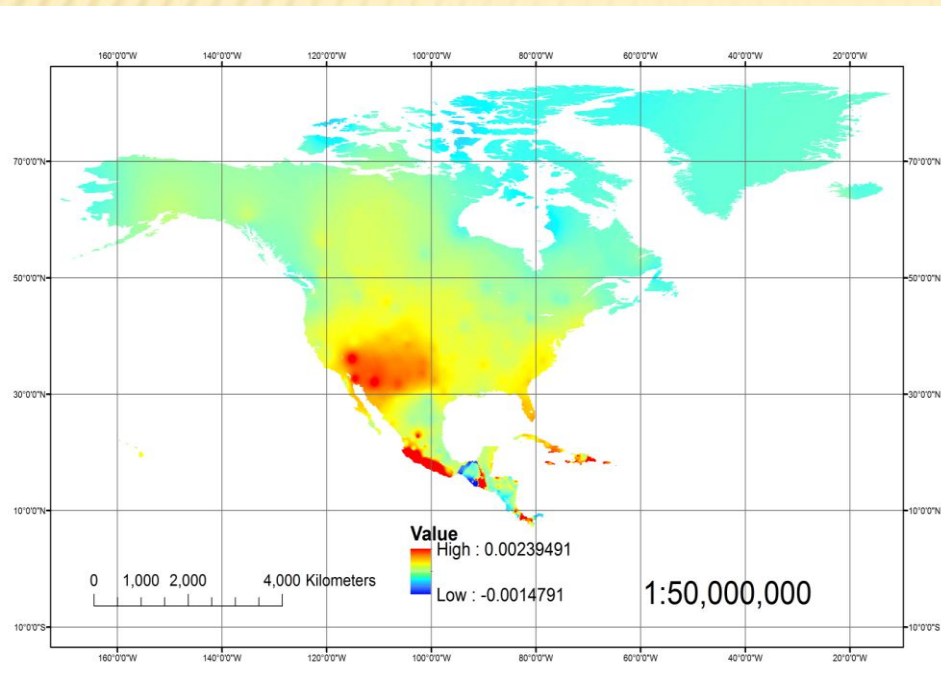


Χωρική παρεμβολή παραμέτρου b Ευρασία

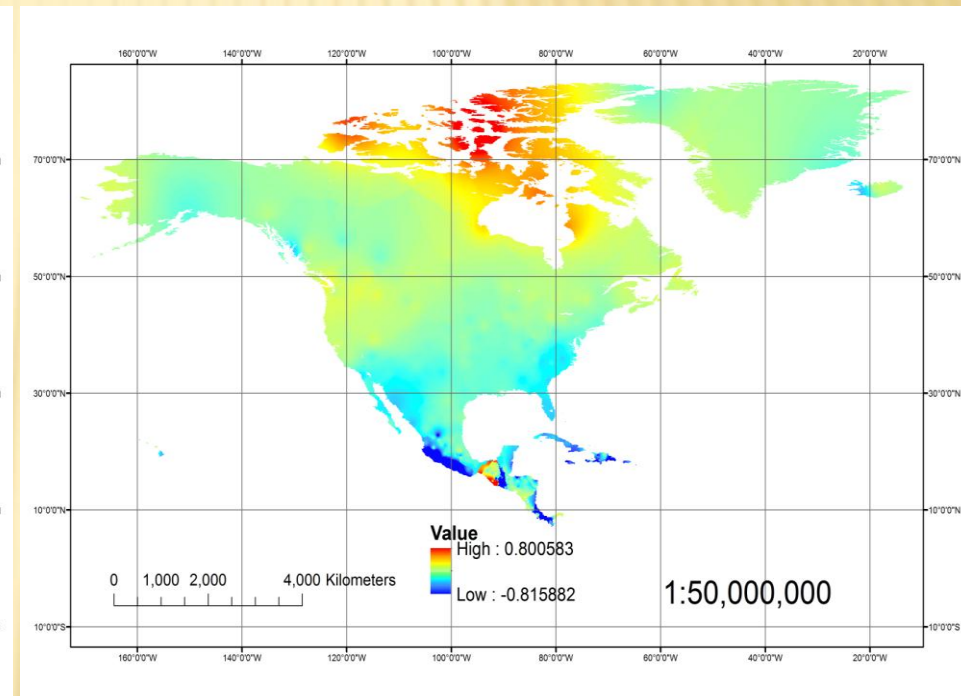


5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΩΝ

Χωρική παρεμβολή παραμέτρου α Βόρεια Αμερική

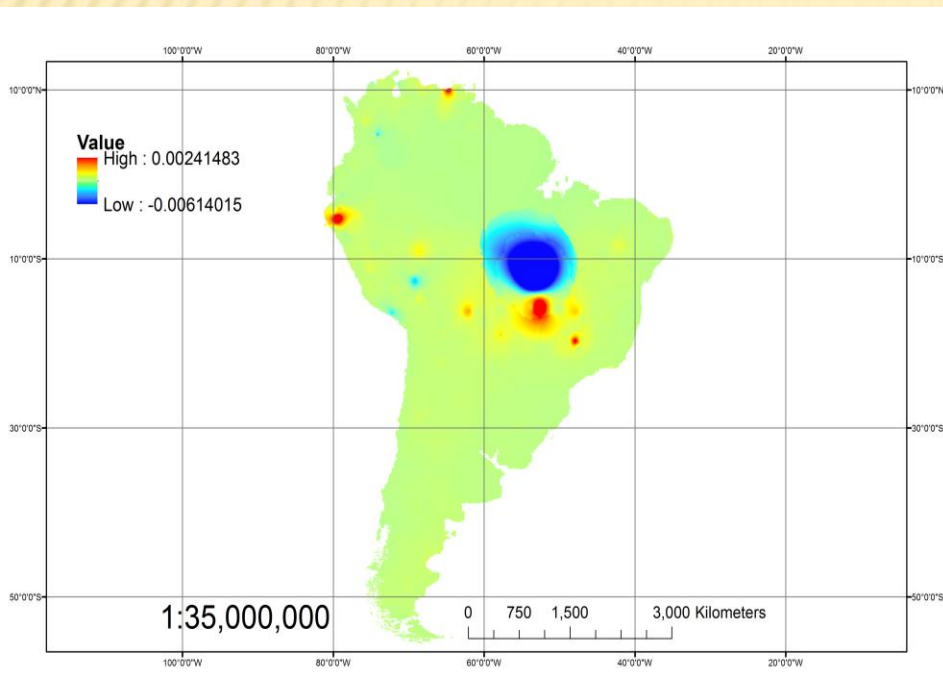


Χωρική παρεμβολή παραμέτρου β Βόρεια Αμερική

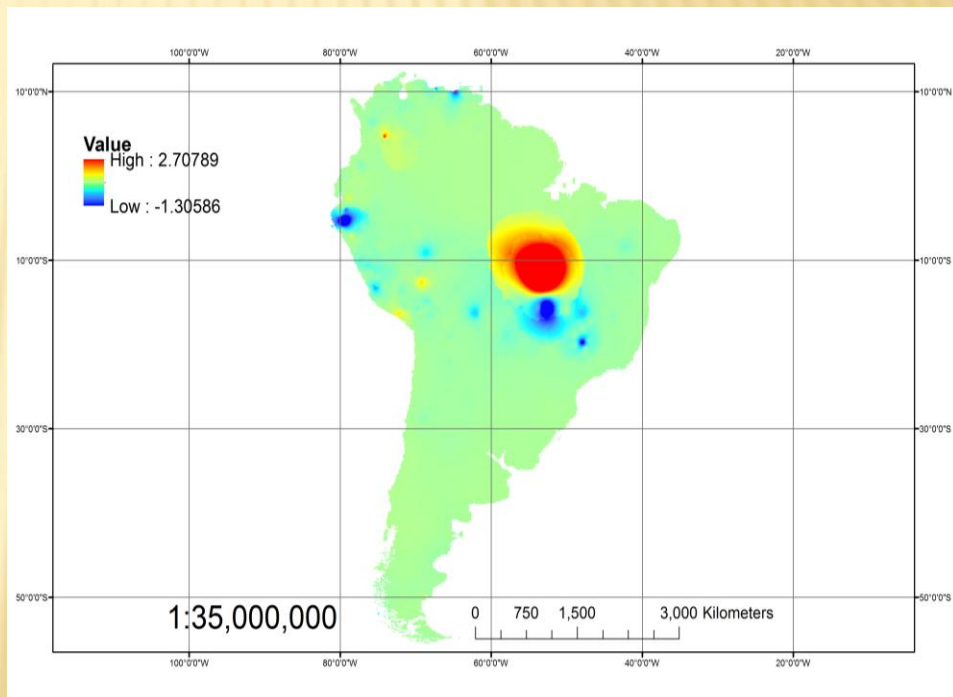


5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΩΝ

Χωρική παρεμβολή παραμέτρου α
Νότια Αμερική



Χωρική παρεμβολή παραμέτρου b
Νότια Αμερική

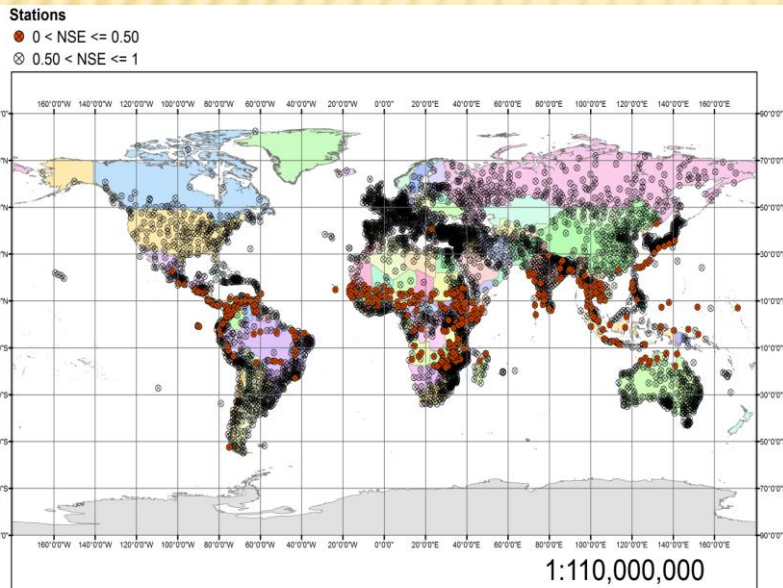


5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΩΝ

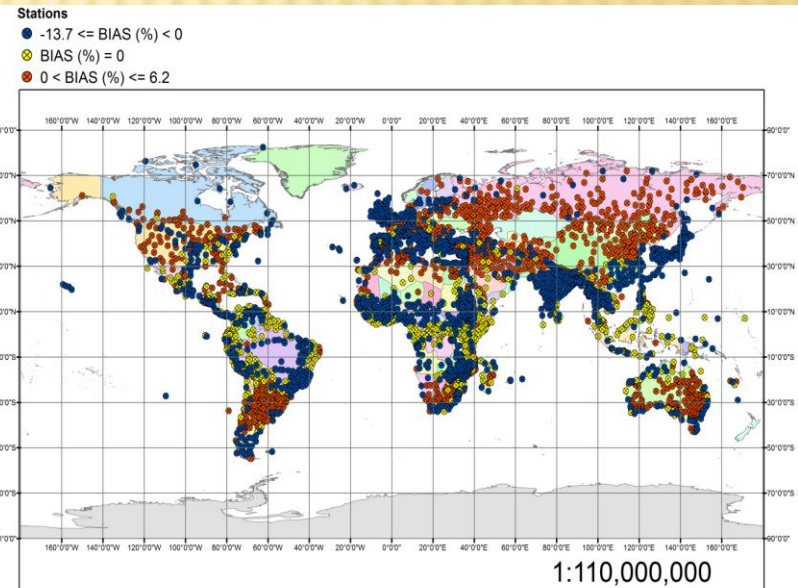
□ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

- Πολύ καλή απόδοση παραμετρικού μοντέλου
- Ιδιαίτερα καλές αποδόσεις σε **Ευρασία, Βόρεια Αμερική και Αυστραλία**
- Ελαφρώς χαμηλότερη απόδοση σε **Νότια Αμερική και Αφρική**

Αποτελέσματα δείκτη **NSE** ανά σταθμό



Αποτελέσματα δείκτη **BIAS** ανά σταθμό



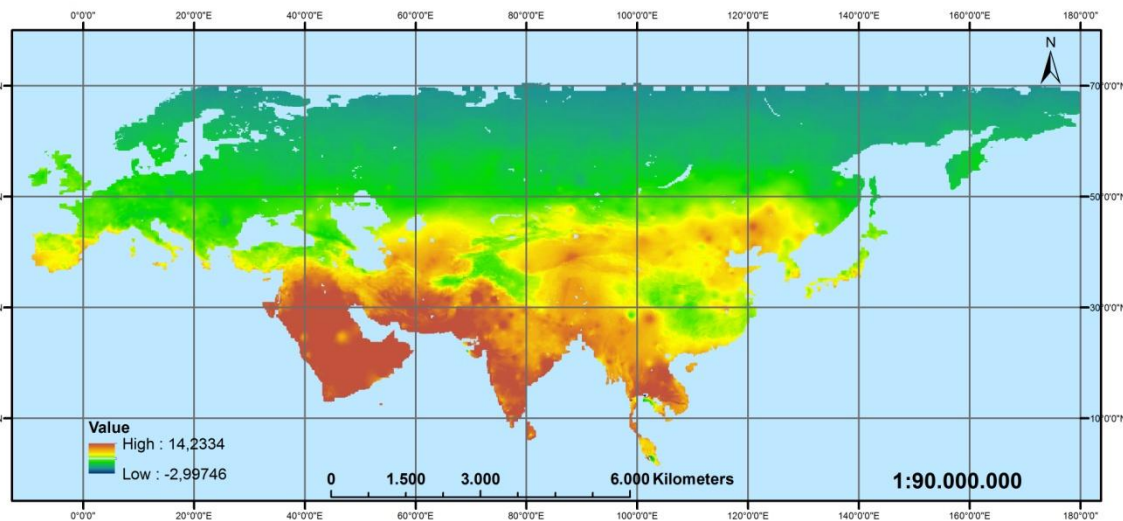
6. ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΙ ΧΑΡΤΕΣ ΜΗΝΙΑΙΑΣ ΔΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗΣ

- Σύνθεση παγκόσμιων χαρτών μηνιαίας δυνητικής εξατμοδιαπνοής με χρήση της παραμετρικής εξίσωσης.

Εισερχόμενα δεδομένα:

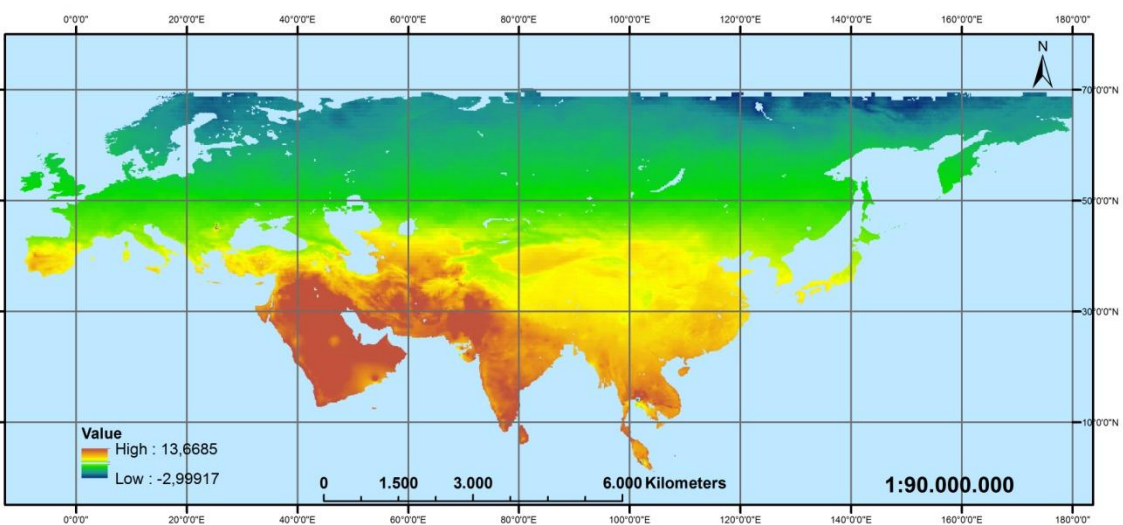
- Υπολογισμένες τιμές παραμέτρων **a** και **b** με παραγωγικά **DEM IDW**
- **Μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα** από τη βάση δεδομένων GLDAS (Global Land Data Assimilation System) του GSFC (Goddard Space Flight Center) της NASA (Δεδομένα τηλεπισκόπησης).
- **Εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία** βάσει υπολογισμών (συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους)

6. ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΙ ΧΑΡΤΕΣ ΜΗΝΙΑΙΑΣ ΔΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗΣ



➤ Ιανουάριος

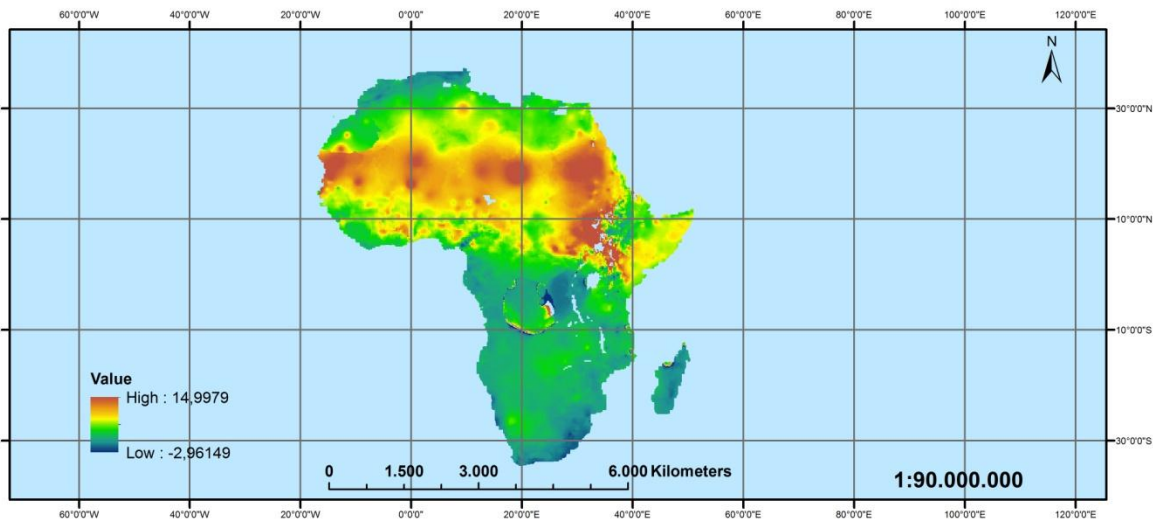
- ✓ **30mm/μήνα** Ελλάδα, Ισπανία, Πορτογαλία
- ✓ **0 - 3 mm/μήνα** Κεντρική Ευρώπη
- ✓ **>0 - 1mm/μήνα** Βόρεια Σκανδιναβία
- ✓ **100 - 150 mm/μήνα** Σαουδική Αραβία, Ιράν, Ιράκ, Πακιστάν, Ινδία, Μπαγκλαντές, Ταϊλάνδη, Καμπότζη, Βιετνάμ



➤ Ιούλιος

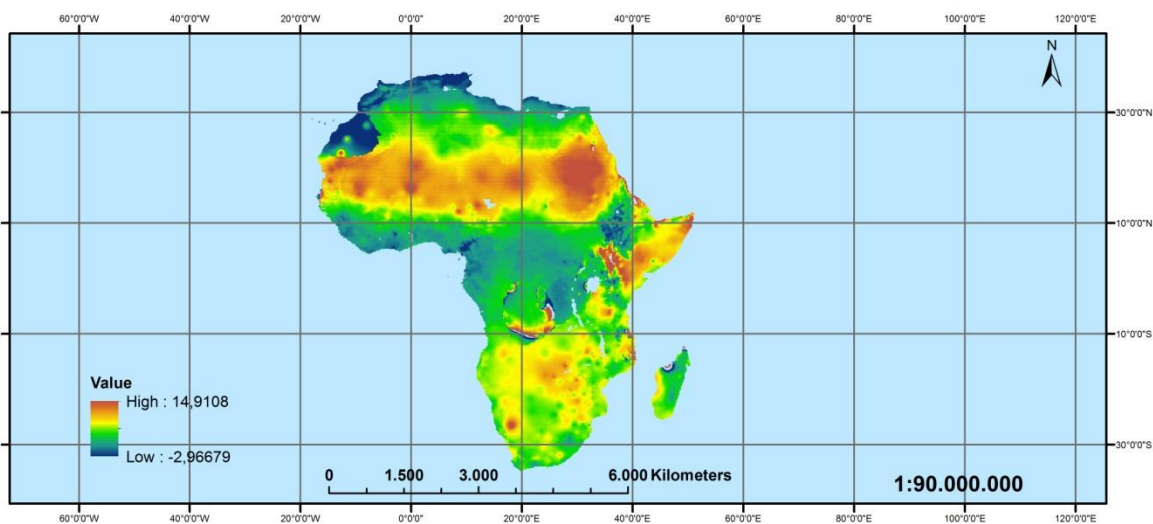
- ✓ **60 - 90 mm/μήνα** Ελλάδα, Ισπανία, Πορτογαλία
- ✓ **30 - 50 mm/μήνα** Κεντρική Ευρώπη
- ✓ **3 - 9 mm/μήνα** Βόρεια Σκανδιναβία
- ✓ **120 - 210 mm/μήνα** Σαουδική Αραβία, Ιράν, Ιράκ, Πακιστάν, Ινδία, Μπαγκλαντές, Ταϊλάνδη, Καμπότζη, Βιετνάμ

6. ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΙ ΧΑΡΤΕΣ ΜΗΝΙΑΙΑΣ ΔΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗΣ



➤ Φεβρουάριος

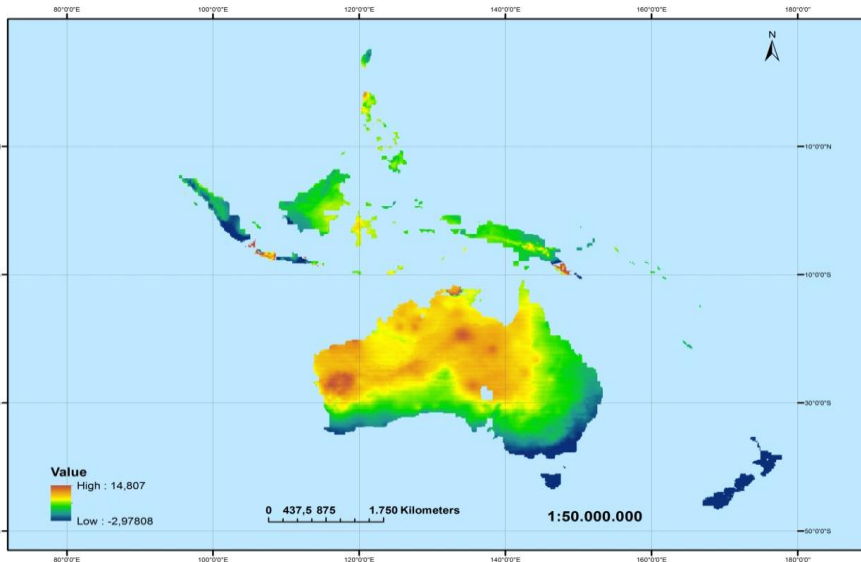
- ✓ **200 mm/μήνα** Έρημος Σαχάρα
- ✓ **30 – 60 mm/μήνα** Μαρόκο, μεσογειακές ακτές Αλγερίας
- ✓ **Τοπικά ακραίες τιμές**



➤ Ιούλιος

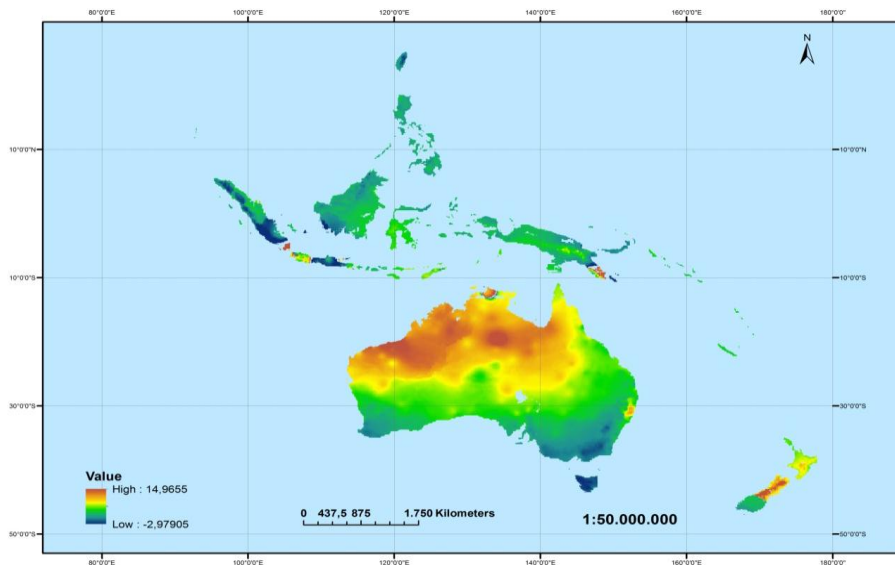
- ✓ **240 – 270 mm/μήνα** Έρημος Σαχάρα
- ✓ **70 – 100 mm/μήνα** Μαρόκο, μεσογειακές ακτές Αλγερίας
- ✓ **Τοπικά ακραίες τιμές**

6. ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΙ ΧΑΡΤΕΣ ΜΗΝΙΑΙΑΣ ΔΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗΣ



➤ Ιανουάριος

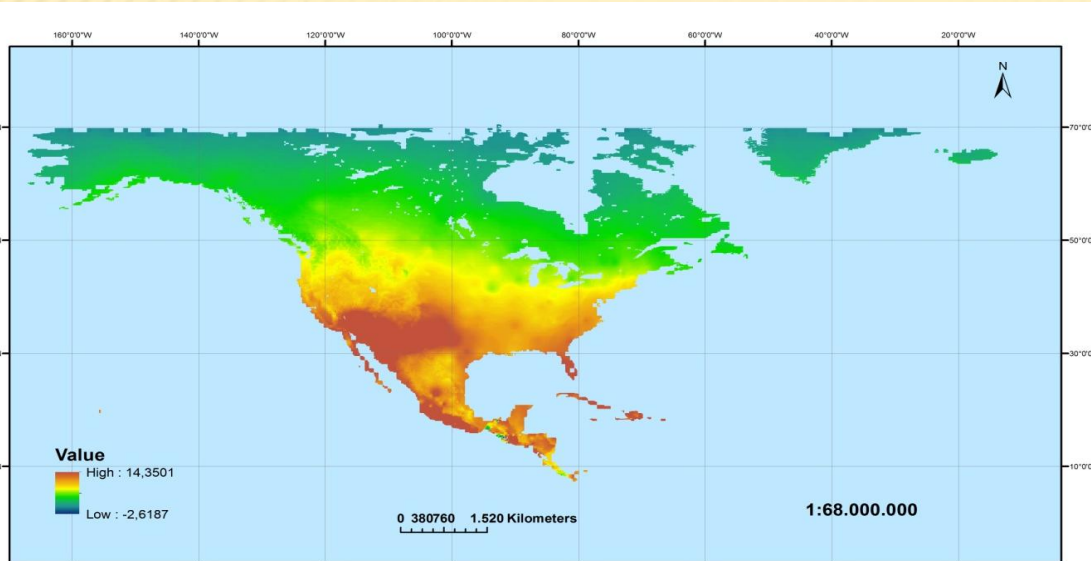
- ✓ **180-210 mm/μήνα** Κεντρικά, Δυτικά και Βόρεια τμήματα Αυστραλίας
- ✓ **90-120 mm/μήνα** Νότια και Ανατολικά τμήματα
- ✓ **Τοπικά ακραίες τιμές**



➤ Ιούλιος

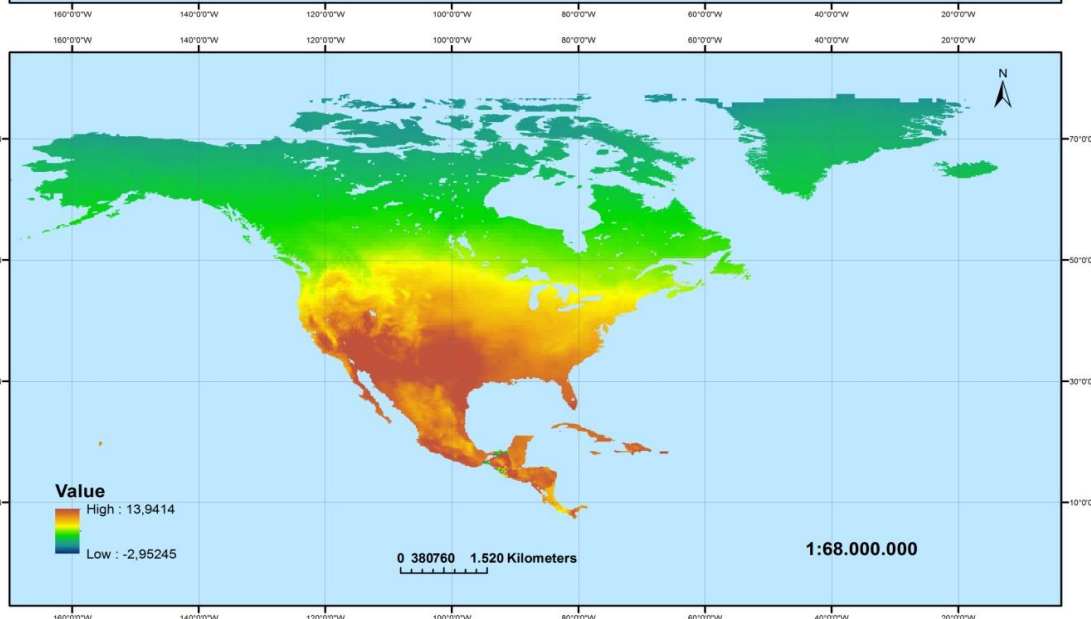
- ✓ **150 mm/μήνα** Κεντρικά, Δυτικά και Βόρεια τμήματα Αυστραλίας
- ✓ **60-80 mm/μήνα** Νότια και Ανατολικά τμήματα
- ✓ **Τοπικά ακραίες τιμές**

6. ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΙ ΧΑΡΤΕΣ ΜΗΝΙΑΙΑΣ ΔΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗΣ



➤ Ιανουάριος

- ✓ **70 mm/μήνα** Καλιφόρνια, Νεβάδα, Γιούτα, Αριζόνα
- ✓ **60 – 90 mm/μήνα** Κεντροανατολικές πολιτείες
- ✓ **120 – 150 mm/μήνα** Μεξικό
- ✓ **>0 - 6 mm/μήνα** από βορρά προς νότο



➤ Αύγουστος

- ✓ **90 mm/μήνα** Δυτικές Πολιτείες (Καλιφόρνια, Νεβάδα, Γιούτα, Αριζόνα)
- ✓ **100mm/μήνα** Κεντροανατολικές πολιτείες
- ✓ **150 – 210 mm/μήνα** Μεξικό
- ✓ **0 - 30 mm/μήνα** Καναδάς από βορρά προς νότο

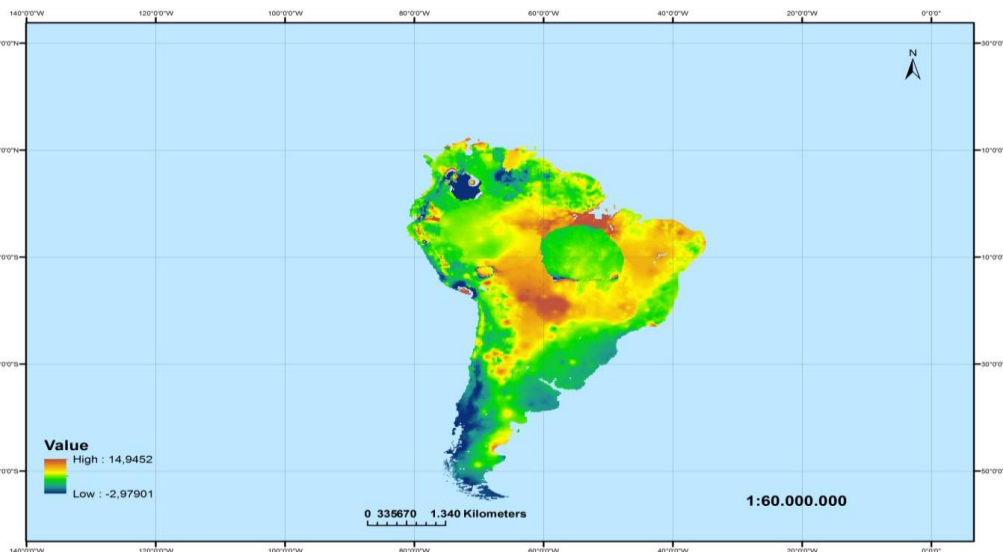
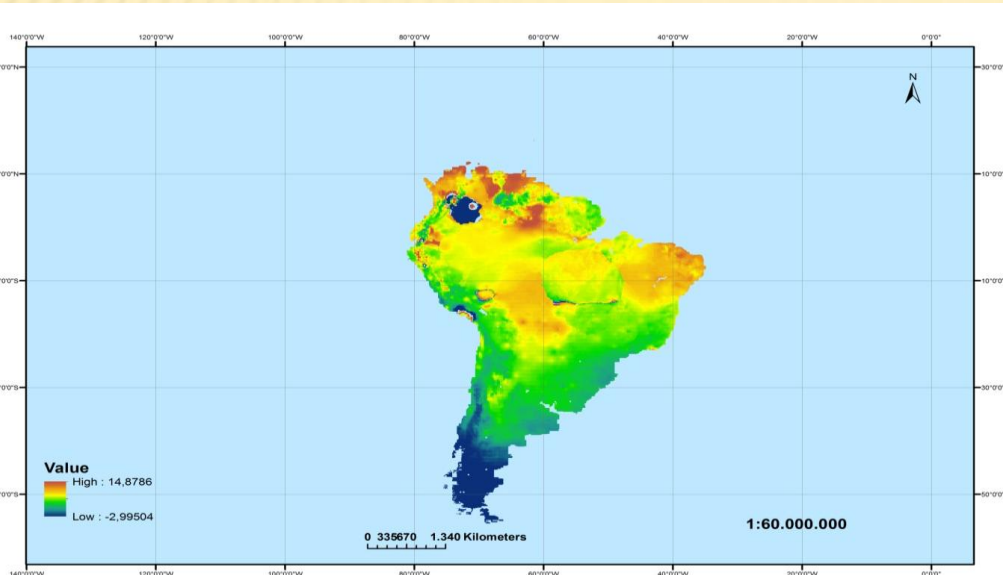
6. ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΙ ΧΑΡΤΕΣ ΜΗΝΙΑΙΑΣ ΔΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗΣ

➤ Ιανουάριος

- ✓ **120 mm/μήνα** Βόρειο τμήμα (π.χ. Βενεζουέλα) και Κεντρικό (π.χ. Βραζιλία, Βολιβία, Περού)
- ✓ **60 mm/μήνα** Ουρουγουάη, Αργεντινή,
- ✓ **0 mm/μήνα** νότια Αργεντινή, νότια Χιλή

➤ Αύγουστος

- ✓ **100 mm/μήνα** Βόρειο τμήμα (π.χ. Βενεζουέλα) και Κεντρικό (π.χ. Βραζιλία, Βολιβία, Περού)
- ✓ **80 mm/μήνα** Νοτιοανατολικά (Ουρουγουάη, Αργεντινή)
- ✓ **60 mm/μήνα** νότια Αργεντινή, νότια Χιλή



7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Τα αποτελέσματα του νέου παραμετρικού μοντέλου παρουσιάζονται πολύ ικανοποιητικά, τόσο κατά τη βαθμονόμηση, όσο και κατά την επαλήθευση του μοντέλου.
- Στην Αφρική και τη Νότια Αμερική, το παραμετρικό μοντέλο παρουσιάζει ελαφρώς χαμηλότερη απόδοση.
- Οι παγκόσμιοι χάρτες μηνιαίας δυνητικής εξατμοδιαπνοής δίνουν επίσης αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα.
- Μετά τη χωρική ολοκλήρωση των παραμέτρων σε παγκόσμια κλίμακα, τίθενται οι βάσεις για εκτίμηση της δυνητικής εξατμοδιαπνοής σε παγκόσμια κλίμακα μόνο με χρήση της θερμοκρασίας και της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας.



ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ