

הפחתת גזי חממה באזורים צחיחים באמצעות חיידקים אוכלי מתאן

Angela Lafuente^{1,2*} | Concha Cano-Díaz¹

¹המחלקה לביולוגיה וגיאולוגיה, פיזיקה וכימיה אי-אורגנית, בית הספר העליון למדעים ניסויים ולטכנולוגיה, אוניברסיטת ריי חואן קרלוס, מוסטולס, ספרד

²הקולג' למשאבי יער ומדעי הסביבה, האוניברסיטה הטכנולוגית של משיגן, האוטון, משיגן, ארצות הברית

סוקר צעיר

SEBASTIAN

גיל: 10



כאשר מדברים על אזור צחיח, הדבר הראשון שעשוי לעלות בראשכם הוא מקום דמוי-מדבר שבו שום דבר אינו יכול לחיות או לגדול. למרות המחסור במים, מערכות אקולוגיות של אזורים אלו הן מגוונות, וצפויות להתרחב כתוצאה משינויי אקלים גלובליים. הגורם העיקרי להתחממות הגלובלית הוא עלייה בגזי חממה באטמוספירה שלנו. כדי לפתור זאת, עלינו להפחית פליטות של גזי חממה. בד בבד חקר מיקרואורגניזמים בטבע מספק לנו רמזים מרגשים לגבי האופן שבו ניתן להתמודד עם בעיית ההתחממות הגלובלית. מיקרואורגניזמים חיים בכל הסביבות האפשריות בכדור הארץ, ולמרבה המזל חלקם אפילו יכולים לצרוך גזי חממה מהאוויר בתור מזון! במאמר זה, נתאר את חיפושנו באדמות ברחבי הגלובוס אחר חיידקים שיכולים לצרוך את אחד מגזי החממה החזקים ביותר – מתאן (CH₄). בניגוד לציפיות, מצאנו שהחיידקים האלה חיים באזורים צחיחים בכל רחבי העולם!

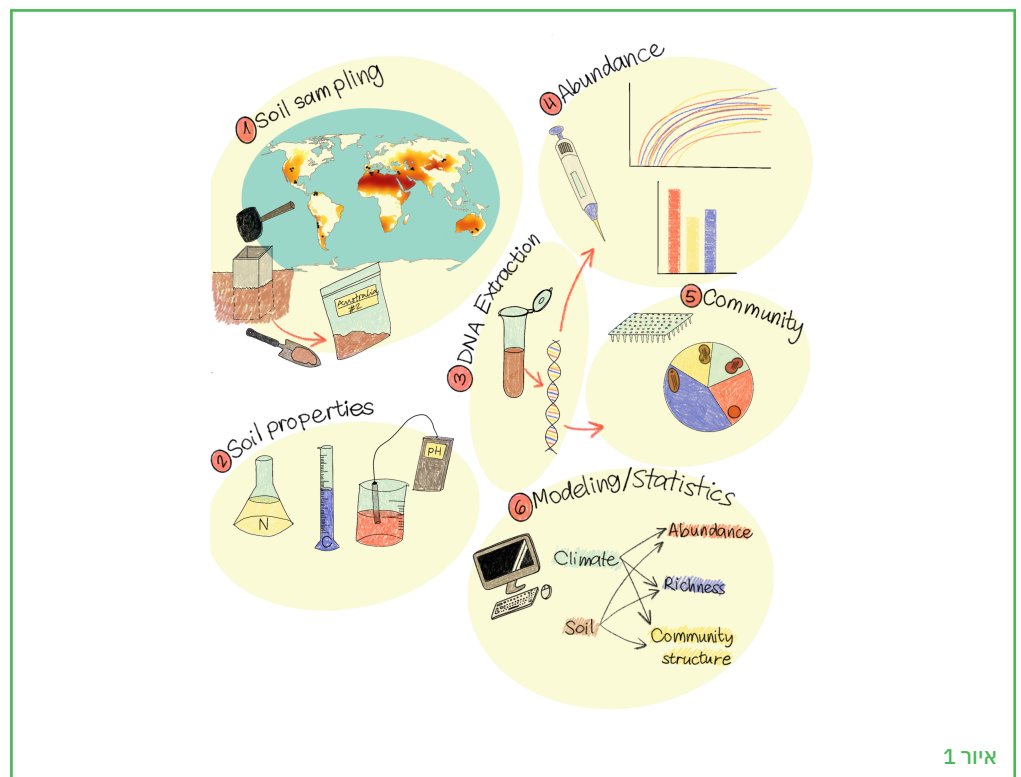
אדמות צחיחות – המערכת האקולוגית הגדולה ביותר בכדור הארץ

אדמות צחיחות מאופיינות במעט גשמים, ולכן אינן מצמיחות צמחייה עשירה, אך הן מכסות טווח נרחב של מערכות אקולוגיות שונות, מהמקום היבש ביותר בכדור הארץ – מדבר אֶטְקָמָה החם בצ'ילה, ועד ליערות העלים של איקליפטוסים באוסטרליה, היכן שחיות הקוֹאֵלוֹת (איור 1.1). מערכות אקולוגיות של אזורים צחיחים מכילות מספרים עצומים של אורגניזמים, שרבים מהם הם צמחים וחיות שחיים באזורים צחיחים בלבד, והתרגלו לתנאים הקשים המאפיינים אזורים אלה.

אזורים צחיחים הם המערכת האקולוגית היבשתית הגדולה ביותר, מהווים כמעט מחצית (45%) מפני השטח של אדמת כדור הארץ, ומשמשים כביתם של יותר מ-40% מאוכלוסיית בני האדם. אם כן, תוכלו להבין מדוע אזורים אלה חשובים להפליא בחקר כדור הארץ.

איור 1

שיטות שאנו משתמשים בהן במטרה למצוא מתאנוטרופים של האדמה ולחקור אותם. בחרנו אזורים צחיחים בכל רחבי העולם ואספנו מהם דגימות אדמה (1). ניתחנו את התכונות של האדמות האלה, כמו תכולת חומר אורגני וחומציות (pH) (2). ביצענו תהליך מיצוי של המידע הגנטי (דנ"א) מהחיידקים שנמצאים באדמה (3). דרך חקירת הדנ"א, קיבלנו מידע לגבי השפע, העושר ומבנה החברה של המתאנוטרופים מכל דגימת אדמה (4, 5). לאחר מכן, השתמשנו בכלים מתמטיים במטרה להבין מיהם סוגי האדמות או תנאי האקלים הרלוונטיים ביותר עבור מתאנוטרופים (6).



איור 1

אביוטי (Abiotic)

גורמים חסרי חיים בסביבה, למשל, טמפרטורה, מים ואור.

צחיחות (Aridity)

קשר מתמטי בין כמות המשקעים (גשם, ערפל, או שלג) והאידיוי של מים, אשר מתאר את מידת המחסור במים במערכת אקולוגית.

יצורים חיים וחומרים נטולי-חיים בסביבה, כמו צמחים ומים, קשורים קשר הדוק על ידי מחזוריות בטבע. החומרים הבלתי-חיים האלה נקראים גורמים אֶבְיוֹטִים. מים חיוניים לכל התהליכים שקשורים לחיים, מגדילת צמחים ועד להתפתחות תְּבָרוֹת של מיקרואורגניזמים של אדמה. לכן, מים הם הגורם האביוטי החשוב ביותר למערכת אקולוגית. את זמינותם של מים במערכת אקולוגית אנו מודדים באמצעות מדד שנקרא צחיחות – קשר מתמטי בין כמות המשקעים (גשם, ערפל, או שלג) ואידיוי של מים. ככל שישנם פחות מים זמינים, כך המקום צחיח יותר (איור 1.1).

באזורים הצחיחים, שבהם מים לא תמיד זמינים, המחזוריות הטבעית בין יצורים חיים לחומרים שאינם חיים מושפעים מאוד. כאשר אין מים מגשם והלחות פוחתת, הדבר משפיע

**שכיחות
(Abundance)**

מספר הפרטים מסוג מסוים שנמצאים בסביבה.

**מתאנוגנים
(Methanogens)**

קבוצה של מיקרואורגניזמים שלא זקוקים לחמצן כדי לשרוד, ולכן יכולים לחיות בסביבות נטולות חמצן. הם מייצרים מתאן בזמן פירוק חומר אורגני, כמו למשל עלים וחיכות עץ.

איור 2

מתאן (CH₄) – מקורות וצרכנים עיקריים.

**מתאנוטרופים
(Methanotrophs)**

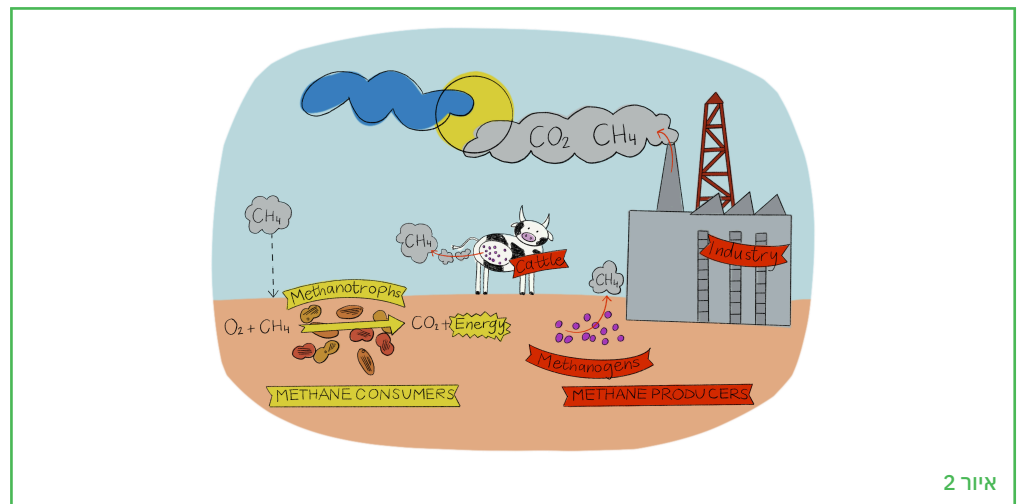
קבוצה של מיקרואורגניזמים אוכלי-מתאן שמשוגלים להשתמש במתאן כמקור לפחמן ולאנרגיה.

על מחזורי פחמן (C) וחנקן (N) ומפחית את השכיחות של היסודות האלה באדמה, דבר המשפיע על צמחים, חיות ומיקרואורגניזמים. מצב דברים זה גורם לאזורים צחיחים להיות פגיעים מאוד ביחס לשינויי האקלים המתמשכים.

חיידקים באדמה ומתאן

כדור הארץ מוקף שכבה גזית שנקראת אטמוספירה, אשר מגינה עלינו מפני קרינת השמש ומסייעת לשמור על הטמפרטורה הכוללת של כדור הארץ. הרכיבים היסודיים של האטמוספירה הם חנקן (N – 78%) וחמצן (O – 21%), אך לצידם ישנם גזים רבים אחרים באטמוספירה. חלק מהגזים האטמוספריים, כמו למשל פחמן דו-חמצני (CO₂) ואדי מים, הם גזי חממה, שנקראים כך מאחר שהם לוכדים את חום השמש, ופועלים כמו הזכוכית בחממה. גזי החממה מאפשרים לקרני השמש להגיע אל פני השטח של כדור הארץ, אך מונעים מהחום לעזוב את האטמוספירה. כליאת החום תורמת להתחממות הגלובלית.

גז החממה השכיח ביותר באטמוספירה, אשר מיוצר על ידי בני אדם, הוא פחמן דו-חמצני, המשוחרר משרפת דלקי מאובנים. הגז השני בחשיבותו שתורם להתחממות הגלובלית הוא מתאן (CH₄) – מולקולה פשוטה שנוצרת על ידי אטום אחד של פחמן (C) וארבעה אטומים של מימן (H). אפקט החימום של מולקולה אחת של מתאן שקול ל-25 מולקולות של פחמן דו-חמצני, מה שהופך את המתאן לגז חממה חזק ביותר. מתאן מיוצר על ידי **מתאנוגנים** – קבוצה של מיקרואורגניזמים שאינם זקוקים לחמצן כדי לשרוד, ולכן יכולים לחיות בסביבות נטולות חמצן כמו שדות אורז, משקעים באגמים ואדמות לחות. מתאנוגנים חיים גם במערכות עיכול של חיות, כמו למשל קיבות של בקר ואפילו של בני אדם, ואחראיים לגיהוקים ולנפיחות של חיות. בעת פירוק חומר אורגני כמו עלים או חיכות עצים, מתאנוגנים פולטים מתאן. נוסף על חקלאות, פעילויות אנושיות אחרות כמו תעשיות שמן וגז, משחררות אף הן כמויות גדולות של מתאן לאטמוספירה [1] (איור 2).



המתאן שמשוחרר לאטמוספירה משפיע מאוד על שינויי אקלים, וישנה רק קבוצת מיקרואורגניזמים אחת שיכולה לצרוך אותו, ה**מתאנוטרופים**. קבוצה זו מסוגלת להשתמש במתאן כמקור הפחמן והאנרגיה שלה, היות שמיקרואורגניזמים מסוג זה אוכלים מתאן

(איור 2!) באזורים צחיחים, ייצור המתאן נמוך בשל דלילות המים (זכרו כי בדרך כלל מתאנוגנים חיים באדמות מוצפות ובסביבות נטולות חמצן אחרות). אך כתוצאה מההיקף הנרחב של אזורים צחיחים והעלייה הגלובלית בכמות המתאן באטמוספירה, מערכות אקולוגיות של אזורים צחיחים עשויות לעורר עניין אם גם מתאנוטרופים מצויים שם בשכיחות גדולה.

מציאת מתאנוטרופים וחקירתם

במחקר שלנו, ביקשנו לבדוק את שכיחותם של מתאנוטרופים באדמות באזורים צחיחים ברחבי העולם, ואם הם רגישים לתנאי אקלים ולתכונות האדמה, כמו מרבית המיקרואורגניזמים שחיים באדמה. ראשית, בחרנו 80 אתרים באזורים צחיחים בכל רחבי העולם (איור 1.1). בכל אתר אספנו מידע על האקלים, כדוגמת הטמפרטורה השנתית הממוצעת, המשקעים השנתיים והצחיחות. לקחנו גם דגימות אדמה וניתחנו את תכונותיהן, דוגמת כמות החומר האורגני (פחמן אורגני), חומציות ותכולת חול (איור 1.2). הימצאות של חומר אורגני רב באדמה מצביע על כך שהאדמה פורייה, כלומר מכילה חומרי מזון שצמחים, חיות אדמה ומיקרואורגניזמים זקוקים להם כדי לגדול. חומציות (pH) היא אחד הגורמים החשובים ביותר בוויסות גדילה של חיידקים באדמה, וניתוחה מלמד אותנו עד כמה האדמה חומצית. לדוגמה, כאשר אדמות חומציות מאוד, ברמת חומץ, רק חיידקים מסוימים שעמידים לחומציות יכולים לחיות בהן. בהיבט תכולת החול, גרגירים באדמה קרובים מאוד זה לזה, אך גם משאירים מרווחים המאפשרים כניסה של אוויר ומים. כמות החול וסוג החלקיק הגדול ביותר באדמה, מלמדת אותנו על גודל המרווחים באדמה. תכולת חול גדולה משמעה שישנם מרווחים גדולים, כך שהאוויר יכול להיכנס לאדמות בקלות, אך גם מים וחומרי מזון יכולים לדלוף החוצה בקלות.

כדי לחקור מתאנוטרופים בדגימות האדמה שלנו, אנו זקוקים לחומר הגנטי (דנ"א) של החיידקים האלה [2]. ראשית, אנו מקבלים את כל הדנ"א שנמצא בדגימות האדמה שלנו, בתהליך שנקרא הפקת דנ"א (איור 1.3), המבוצע במעבדה באמצעות אנזימים חזקים אשר פותחים תאים מבלי להזיק למידע הגנטי. לאחר מכן אנו מנתחים את הדנ"א שמצאנו בחיפוש אחר מקטע מסוים שנמצא רק במתאנוטרופים. פיסת הדנ"א הזו היא גֵן שנקרא pmoA. גן זה מכיל את ההוראות ליצירת החלבון שמאפשר למתאנוטרופים "לאכול" מתאן אטמוספרי. הריכוז של גן pmoA בכל דגימת אדמה מעיד על כמה מתאנוטרופים חיו באותה דגימה (איור 1.4). ישנם כמה מינים קרובים של מתאנוטרופים שלכולם מידע דנ"א דומה, אך בין הדנ"א של מינים שונים ישנם הבדלים גנטיים זעירים, המאפשרים לנו להשתמש בדנ"א כדי לזהות מתאנוטרופים שונים, בדומה לטביעת אצבע (איור 1.5).

מחקרי הדנ"א שלנו מסייעים לנו לקבל מידע על השכיחות (מספר החיידקים הכולל מסוג מסוים); העושר (מספר סוגי החיידקים השונים שנמצאים בסביבה) ומבנה החברה (הסוגים השונים של חיידקים והשכיחות מכל סוג) של מתאנוטרופים מכל דגימת אדמה (איור 3). לאחר מכן, אנו משתמשים בשיטות מתמטיות כדי להבין אילו תנאי אדמה או אקלים הם החשובים ביותר עבור מתאנוטרופים (איור 1.6).

הפקת דנ"א (DNA Extraction)

הליך מעבדתי שבו פותחים תאים במטרה לשחרר חומר גנטי (דנ"א) שהם מכילים בתוכם, בלי להזיק לדנ"א.

עושר (Richness)

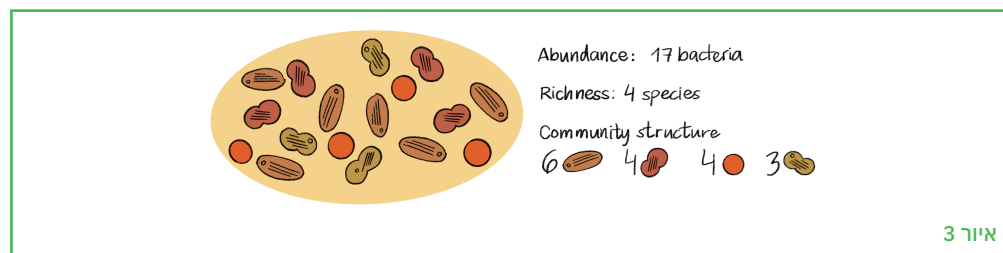
מספר המינים (סוגים שונים) של אורגניזמים שנמצאים בסביבה.

מבנה חברה (Community Structure)

שילוב של העושר והשכיחות בקהילה.

איור 3

תיאור חברות מיקרוביות באמצעות שלוש תכונות. **שכיחות:** כמות החיידקים הכוללת מסוג מסוים; **עושר:** מספר סוגי החיידקים השונים שנמצאים בסביבה; **מבנה חברה:** כמה סוגים שונים של חיידקים ישנם, ומה השכיחות של כל סוג.



היכן המתאנוטרופים חיים

לא היינו בטוחים אם נמצא מתאנוטרופים באזורים צחיחים, מאחר שמיקרואורגניזמים אלה זקוקים למתאן כדי לחיות, ואזורים צחיחים אינם המערכת האקולוגית הטיפוסית ליצירת מתאן. לכן, העובדה שמצאנו מתאנוטרופים בכל הדגימות מהאזורים הצחיחים שדגמנו, הייתה תגלית יוצאת דופן! כעת אנו יכולים לומר שמתאנוטרופים נמצאים באופן נרחב באזורים צחיחים ברחבי העולם. להפתעתנו, מצאנו באזורים צחיחים אפילו מתאנוטרופים מסוימים שבדרך כלל מצויים במקומות לחים, כמו בדנמרק, בסקוטלנד, או בניו-זילנד.

מצאנו גם שבאזורים צחיחים הטמפרטורה השנתית הממוצעת והצחיחות אינם המשתנים העיקריים שמשפיעים על השכיחות והעושר של מתאנוטרופים. שכיחות ועושר עשויים מושפעים על ידי גורמים אחרים, כמו למשל משקעים. אולם, תנאי אקלים כמו טמפרטורה שנתית ממוצעת; גשמים; צחיחות ותכונות אדמה, כמו למשל חומר אורגני; חומציות ותכולת חול, השפיעו על מבנה החברה של מתאנוטרופים. לדוגמה, טמפרטורות גבוהות יותר הגדילו את השכיחות של מתאנוטרופים מסוימים שעמידים לחום. במילים אחרות, באזורים צחיחים שבהם טמפרטורות גבוהות יותר, חברות המתאנוטרופים עשויות להכיל יותר מתאנוטרופים שעמידים לחום. תנאי אקלים יכולים אף הם להשפיע על תכונות של האדמה, לדוגמה על ידי תעדוף של פירוק סלעים, אשר מגדיל את תכולת החול, או על ידי שינוי החומציות של האדמה ושינוי של החומר האורגני. תכונות אדמה אלה משפיעות על כמות האוויר שיכול להיכנס לאדמה, אשר נמצא כמשתנה חשוב מאוד עבור מבנה החברה אצל מתאנוטרופים.

מה למדנו ממתאנוטרופים באזורים צחיחים?

כפי שגילינו, מתאנוטרופים נמצאים בשפע ומפולגים באופן נרחב באזורים צחיחים ברחבי העולם. הן משתני אקלים והן משתני אדמה משפיעים על חברות של מתאנוטרופים. יתרה מזו, מצאנו כי מבנה חברה של חיידקים אוכלי מתאן תלוי מאוד בתנאי אקלים, כמו למשל המשקעים והטמפרטורה, ומאפייני אדמה כמו תכולת החומר האורגני באדמה.

מאחר שמצאנו כי אקלים משפיע על מתאנוטרופים, אנו מצפים ששינויי אקלים מתמשכים ישנו חברות של מתאנוטרופים בשנים הבאות, מה שישפיע על צריכת המתאן האטמוספרי. עד עתה ידענו כי מתאנוטרופים חיו במקומות קרים ולחים, אשר ללא ספק יושפעו על ידי שינויי אקלים. הכמות הגדולה של אדמה שאזורים צחיחים מכסים, והמתאנוטרופים הרבים שהם מכילים, עשויים להפוך את האזורים האלה חשובים במיוחד עבור פרוק מתאן אטמוספירי בעתיד. במילים אחרות, חיידקים אוכלי-מתאן באזורים צחיחים יכולים לסייע לנו

להפחית גזי חממה! כדי להתמודד עם ההתחממות העתידית הצפויה של כדור הארץ שלנו, חשוב שנשמור על האזורים הצחיחים כעת, ונמשיך בחקירת הנפלאות החבויות בהם.

מאמר המקור

Lafuente, A., Bowker, M. A., Delgado-Baquerizo, M., Durán, J., Singh, B. K., and Maestre, F. T. 2019. Global drivers of methane oxidation and denitrifying gene distribution in drylands. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 28:1230–43. doi: 10.1111/geb.12928

מקורות

1. Cadena, S., Cervantes, F., Falcón, L., and García-Maldonado, J. 2019. The role of microorganisms in the methane cycle. *Front. Young Minds* 7:133. doi: 10.3389/frym.2019.00133
2. Schallenberg, L., Wood, S., Pochon, X., and Pearman, J. 2020. What can DNA in the environment tell us about an ecosystem? *Front. Young Minds* 8:150. doi: 10.3389/frym.2019.00150

פורסם אונליין: 05 ביולי 2023

עורך: Rémy Beugnon

מנחה מדעית: Luisa I. Falcon

ציטוט: Lafuente A I Cano-Díaz C (2023) הפחתת גזי חממה באזורים צחיחים באמצעות חיידקים אוכלי מתאן. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2021.556361-he

תורגם והותאם מ: Lafuente A and Cano-Díaz C (2021) Can Methane-Eating Bacteria in Drylands Help Us Reduce Greenhouse Gases? *Front. Young Minds* 9:556361. doi: 10.3389/frym.2021.556361

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

זכויות יוצרים © 2021 © 2023 Lafuente I Cano-Díaz. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקר צעיר

SEBASTIAN, גיל: 10

אני אוהב ספורט, קריאה, מתמטיקה וחיות.



הכותבים

ANGELA LAFUENTE

כיום אני פוסט-דוקטורנטית באוניברסיטה הטכנולוגית של מישיגן, שעוסקת במחזור הפחמן באדמות קבול טרופיות. אני אקולוגית שמתעניינת בהבנת האופן שבו שינויים גלובליים משפיעים על מיקרואורגניזמים באדמה ועל פליטות גזי חממה. בזמני הפנוי, אני נהנית מהטבע בטוילים, רכיבה על אופניים, או סקי. *ellyon.diebrunnen@gmail.com



CONCHA CANO-DÍAZ

אני ביולוגית שמסיימת את הדוקטורט באוניברסיטת ריי חואן קרלוס (ספרד). מחקרי מתמקד בהתפלגות של כחוליות (ציאנובקטריה) באדמה, ובהעדפותיהן האקולוגיות. כיום אני חוקרת את ההשפעות של שינויי אקלים ושל תהליכי היווצרות אדמה על חברות של כחוליות ברחבי העולם. אני אוהבת לאייר איורים מדעיים, ובזמני הפנוי נהנית לנגן ביוקולקה ולשיר במקלה.



מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK