

סיירי הצלה: כיצד חיידקים יכולים לתמוך בצמחים

Rocío Hernández-León*, Yunuen Tapia-Torres

בית הספר הלאומי ללימודים עליונים, יחידת מורל'ה, האוניברסיטה הלאומית האוטונומית של מקסיקו, מקסיקו סיטי, מקסיקו

סוקר צעיר

KONSTANTIN

גיל: 14



צמחים, נוסף על היותם יפהפיים, מספקים לנו בין השאר חמצן ומזון. במערכות האקולוגיות שלהם, צמחים חיים לצד סוגים שונים של חיידקים-חלקם ידידותיים עבור צמחים, וחלקם אויביהם. חיידקים ידידותיים יכולים לעזור לצמחים לגדול בסיוע לצמחים לקבל חומרי מזון כמו זרחן וחנקן, או על ידי הגנה על הצמחים מפני מיקרואורגניזמים אחרים שעלולים לגרום להם לחלות. מטרותיה של המעבדה שלנו הן לְאָתֵר את החיידקים שיכולים לסייע לצמחים לגדול, ולהגן עליהם מפני מתקפות אויבים; להבין כיצד החיידקים האלה פועלים וְלְשַׁלֵּב עימם כוחות כדי לאפשר לצמחים חקלאיים להמשיך לייצר מספיק מזון עבור כולם. במאמר זה, נדון בארבעה חיידקים שזיהינו, אשר יכולים לסייע לחלק מהצמחים, ולספק להם הגנה.

קשרים בין צמחים לחיידקים

צמחים הם חלק חשוב מאוד בחיינו. הם מספקים לנו חמצן; תרופות ומזון, אך אינם עושים זאת לבד. צמחים חולקים סביבות מחיה באדמה עם מיקרואורגניזמים רבים, כמו למשל פטריות, תולעים קטנות שנקראות נְמַטוֹדוֹת וחיידקים. חיידקים הם יצורים זעירים שאין

ביכולתנו לראות בעין בלתי מזוינת. סוגים שונים של חיידקים הם בעלי נראות שונה, וממלאים תפקידים שונים במערכת האקולוגית.

בין צמחים לחיידקים באדמה מתקיימים שלושה סוגי קשרים עיקריים (איור 1A). חלק מהחיידקים עלולים להזיק לצמחים, לתקוף אותם ולגרום להם להרקיב; או שהם עשויים לגרום לצמחים לחלות, או להתייבש. חיידקים מזיקים אלה נקראים פִּיטוֹפָּתוֹגְנִים, והקשר בינם לבין צמחים הוא קשר שלילי. אולם, ישנם גם חיידקים שיכולים להיות ידידותיים לצמחים, לקיים עימם קשר חיובי, לסייע להם או להגן עליהם כנגד חיידקים פִּיטוֹפָּתוֹגְנִים, פטריות ווירוסים. בתמורה לחברות הזו, צמחים מזינים את החיידקים בפחמימות, ויטמינים חומצות אורגניות ועוד. צמחים משמשים כבית לחיידקים המועילים, ומאפשרים לחיידקים אלה לחיות קרוב אליהם או אפילו בתוכם. אם החיידקים לא תוקפים את הצמח אך גם אינם מסייעים לו, הקשר הוא ניטרלי.

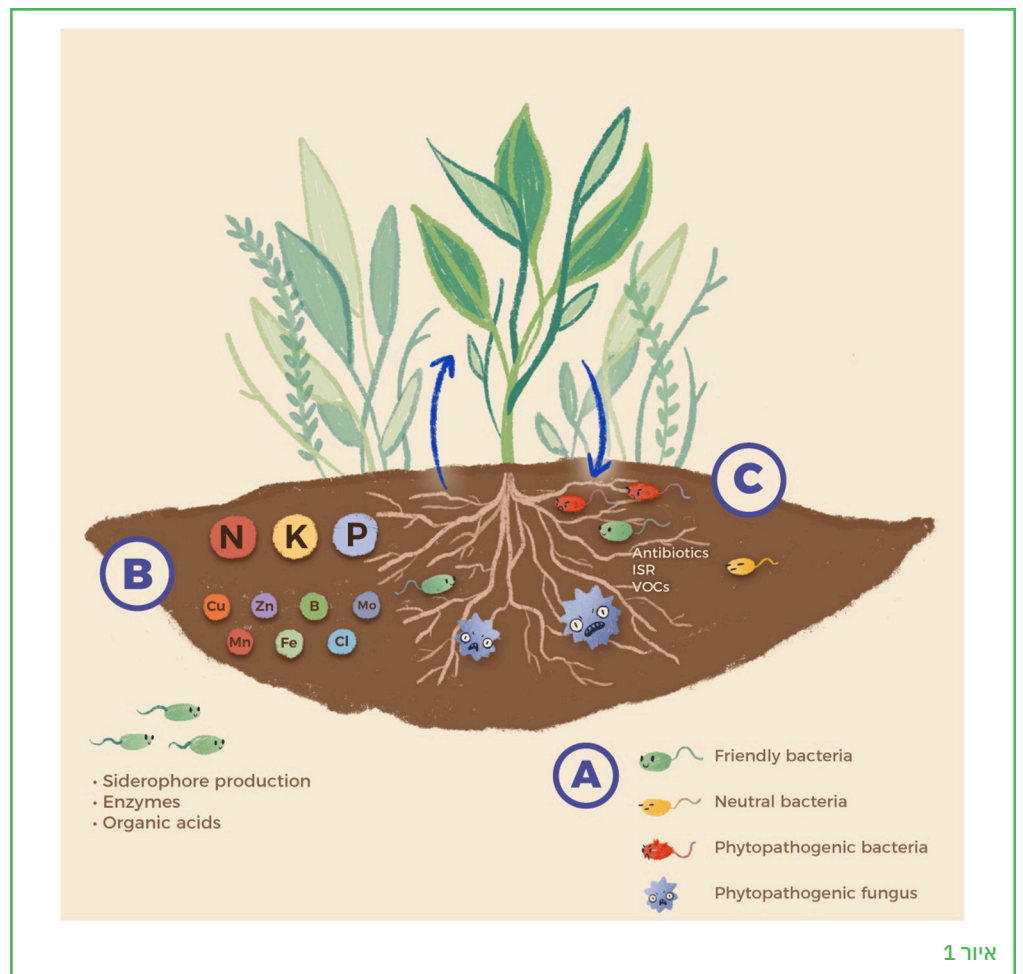
פיטופתוגן (Phytopathogen)

אורגניזם שגורם לצמחים לחלות.

איור 1

יחסי גומלין

חיידקים-צמחים (A) קשרים בין חיידקים לצמחים יכולים להיות מועילים לצמח, מזיקים לצמח, או ניטרליים. (B) דרך ייצור של אנזימים וחומצות, חיידקים ידידותיים יכולים לסייע לצמחים לקבל את חומרי המזון החיוניים מהאדמה, לרבות חנקן (N) וזרחן (P). חומרי מזון חשובים אחרים לצמחים הם אשלגן (K), נחושת (Cu), אבץ (Zn), בורון (B), מוליבדן (Mo), מנגן (Mn), ברזל (Fe) וכלור (Cl). (C) חיידקים יכולים להגן על צמחים מפני פתוגנים מזיקים דרך תהליך שנקרא עמידות מערכתית מושרית צמחים, (ISR), שהוא כמו חיסון עבור צמחים, או באמצעות ייצור חומרים אנטיביוטיים, או תרכובות אורגניות (VOCs).



איור 1

קביעות (Sessile)

חוסר היכולת לנוע ממקום למקום.

חומרי מזון (Nutrients)

כימיקלים שמהם מתקבלת אנרגיה כדי לבצע פעולות.

חיידקים מועילים מסייעים לצמחים להשיג חומרי מזון

צמחים גדלים באדמה ואינם יכולים לנוע, כלומר הם בעלי קביעות. אורגניזמים כאלה אינם יכולים לחפש חומרי מזון שהם זקוקים להם כדי לגדול. אולם, חיידקים יכולים לסייע לצמחים לקבל את חומרי המזון הנדרשים להם (איור 1B). לדוגמה, צמחים זקוקים לזרחן עבור

**מולקולות
(Molecules)**

שני אטומים מחוברים או יותר. זוהי היחידה הקטנה ביותר של חומר.

**אנזימים
(Enzymes)**

מולקולות שמוססות תגובות כימיות.

**נודולה
(Nodule)**

מבנה עגול או אובלי שמורכב מתאי צמח.

**עמידות מערכתית מושרית
(Induced systemic resistance)**

אחד המנגנונים שצמחים פיתחו במטרה להגן על עצמם כנגד פטופתוגנים.

**תכשירים אנטיביוטיים
(Antibiotics)**

חומרים שהורסים מיקרואורגניזמים.

**תרכובות אורגניות נדיפות
(Volatile organic compounds)**

מולקולות שמשחררות כגזים.

**סידרופורים
(Siderophores)**

מולקולות קטנות שנקשרות לברזל ומקילות על צמחים להשתמש בו.

גדילה, אך מרבית הזרחן באדמה כלוא ב**מולקולות** שצמחים אינם יכולים לפרק. במקרה זה, החברים החיידקיים של הצמח מספקים עזרה. הם משחררים מולקולות כמו חומצות מיוחדות, או חלבונים שנקראים **אנזימים**. אלה מסייעים לפרק את המולקולות מכילות הזרחן, ולשחרר זרחן כך שצמחים יוכלו להשתמש בו [1].

חנקן הוא חומר מזון חשוב נוסף עבור צמחים. חיידקים יכולים לסייע לצמחים לקבל חנקן על ידי שחרור אנזימים אחרים. אך ישנה בעיה כיוון שאנזימים משחררי-חנקן נהרסים על ידי חמצן. כדי להתגבר על בעיה זו, חיידקים מסייעים לצמחים ליצור על שורשי הצמח מבצ'ר מוגן שנקרא **נודולה**. הנודולה מגינה על החיידקים ועל האנזימים שלהם, ובתוך הנודולה חנקן נעשה זמין עבור הצמח.

חיידקים להצלה!

חיידקים מועילים יכולים להגן על צמחים מפני מתקפות של פטופתוגנים (איור 1C). דרך אחת שבה הם עושים זאת נקראת **עמידות מערכתית מושרית**, הפועלת בדומה לחיסון שמגן על צמחים מפני פטריות, חיידקים ווירוסים. החיידקים מספקים את העמידות על ידי כך שהם באים במגע עם שורשי הצמחים, מה שמפעיל את מערכת ההגנה של הצמח ומכין אותו לקרב. עמידות מערכתית מושרית מערבת את אותות שנישאים דרך הצמח מהשורשים, או אותות שנעים דרך האוויר, ומזהירים את חלקי הצמח שעדיין לא הותקפו [2]. הודות לאותות האלה, כאשר פתוגנים של צמחים מגיעים, הצמחים מוכנים לפלישה ויכולים להגן על עצמם טוב יותר.

דבר נוסף שחיידקים יכולים לעשות כדי להגן על צמחים הוא לשחרר חומרים שמברחים את האויבים הגדולים ביותר של הצמח. החומרים האלה נקראים **תכשירים אנטיביוטיים**, והם דומים לתרופות שאנו נוטלים לעיתים, כשאנו נדבקים בחיידקים מסוימים. תכשירים אנטיביוטיים, ששמותיהם לדוגמה pyrrrolnitrin, phenazine או zwittermycin, אשר מיוצרים על ידי חיידקים, משוחררים בחלקם כנגד חיידקים אויבים, וחלקם כנגד פטריות מסוכנות. הם עשויים להיות משוחררים כ**תרכובות אורגניות נדיפות**—תרכובות שנמצאות במצב גזי בטמפרטורת החדר, או שיכולות להפוך לגז בקלות. שחרור של תרכובות אורגניות נדיפות הוא מנגנון יעיל ביותר שחיידקים משתמשים בו כדי לסייע לצמחים במהרה, מאחר שגזים יכולים להתפשט בקלות ולהגיע במהירות לכל חלקי הצמח. **סידרופורים** גם הם מולקולות שחיידקים מייצרים ומשחררים כאשר מרכיבים כמו ברזל אינם נמצאים באדמה בכמות מספקת. מולקולות אלה יכולות "לחבק" את מעט הברזל שנמצא באדמה, וליצור קומפלקס סידרופור-ברזל שבאמצעותו ברזל יכול להיות מועבר בקלות רבה יותר ולשמך את הצמחים.

יצירת כוח הצלה חיידקי

במעבדה, חיפשנו את "סיירי ההצלה" הטובים ביותר, במטרה ליצור צבא של חיידקים שיכול לסייע בחיזוק הצמחים שמזינים אותנו. כדי לעשות זאת, ראשית, גייסנו חיידקים רבים מהאדמה שמתחת לצמחים שונים. לאחר מכן, גרמנו לחיידקים להילחם כנגד פטריות רבות שגורמות נזק לצמחים האלה, ובחרנו את אותם החיידקים שלא אפשרו לפטריות לגדול.

נספר לכם עתה על ארבעה חיידקים מועילים שהם חלק מ"צוות ההצלה" שלנו. חיידקים אלה נקראים UM16, UM240, UM256, ו-UM270 [3], והם שייכים לסוג *Pseudomonas*.

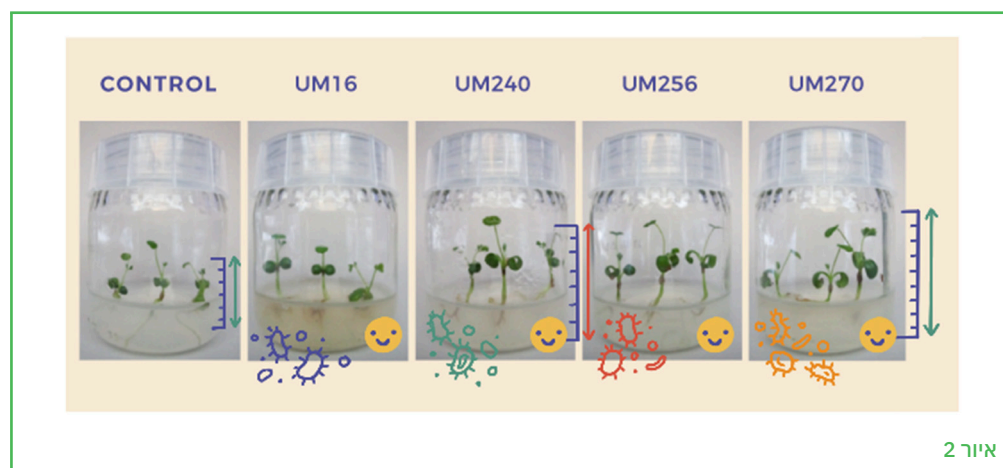
את כל אחד מסוגי החיידקים הללו הכנסנו לכלי זכוכית עם צמח שנקרא אַקְסֶפְּטָה קטועה (barrelclover, *Medicago truncatula*). כעבור 15 ימים, יכולנו לראות שהצמחים היו גדולים יותר כאשר לוו על ידי החיידקים מאשר כשגדלו לבד (איור 2). גידלנו את החיידקים גם בבקבוק זכוכית שהיה ממוקם בתוך כלי הזכוכית, כך שהם לא יכלו לגעת בצמחים. ראינו כי הצמחים עדיין היו גדולים יותר כאשר החיידקים היו נוכחים, אפילו אם הם לא נגעו בצמח. המשמעות של כך היא שהחיידקים שחררו תרכובות אורגניות נדיפות שסייעו לצמחים לגדול.

איור 2

ממצאי הניסוי הראשון

שערכנו במעבדה. כלי

הבקרה (משמאל) מכיל צמח אַקְסֶפְּטָה קטועה שגדל ללא תוספת של חיידקים. הכלים הנתרים מכילים את הצמח ואת אחד מארבעת סוגי החיידקים הידידותיים. החיצים מראים כי הצמחים גדלו טוב יותר בנוכחותם של חיידקי UM240 ו-UM270 (לצבע החיצים אין משמעות).



איור 2

מבחן אחר שעברו חיידקים מצילים אלה היה היכולת להילחם כנגד פטרייה פיטופתוגנית שמדענים מכנים ריקבון אציל (*Botrytis cinerea*). פטרייה זו גורמת ליבולים כמו עגבניות, תותים וענבים לחלות, מה שמפחית את ייצור המזון. לביצוע המבחן הזה, הוספנו חיידקים ופטרייה לצלחת פֶּטְרִי (איור 3A). כאשר החיידקים והפטרייה היו יחד בצלחת, החיידקים מנעו את גדילתה של הפטרייה. כמו כן הִנְחֵנו את הפטרייה והחיידקים בתוך צלחות פטרי שחולקו כך שלא נוצר מגע ביניהם, והם יכלו לתקשר רק דרך חלון קטן. אפילו כאשר לא נוצר מגע, הפטרייה לא גדלה כפי שצמחה כשגִדְלָה לבד, מה שמלמד אותנו כי תרכובות אורגניות נדיפות שיוצרו על ידי החיידקים דיכאו את גדילתה של הפטרייה (איור 3B).

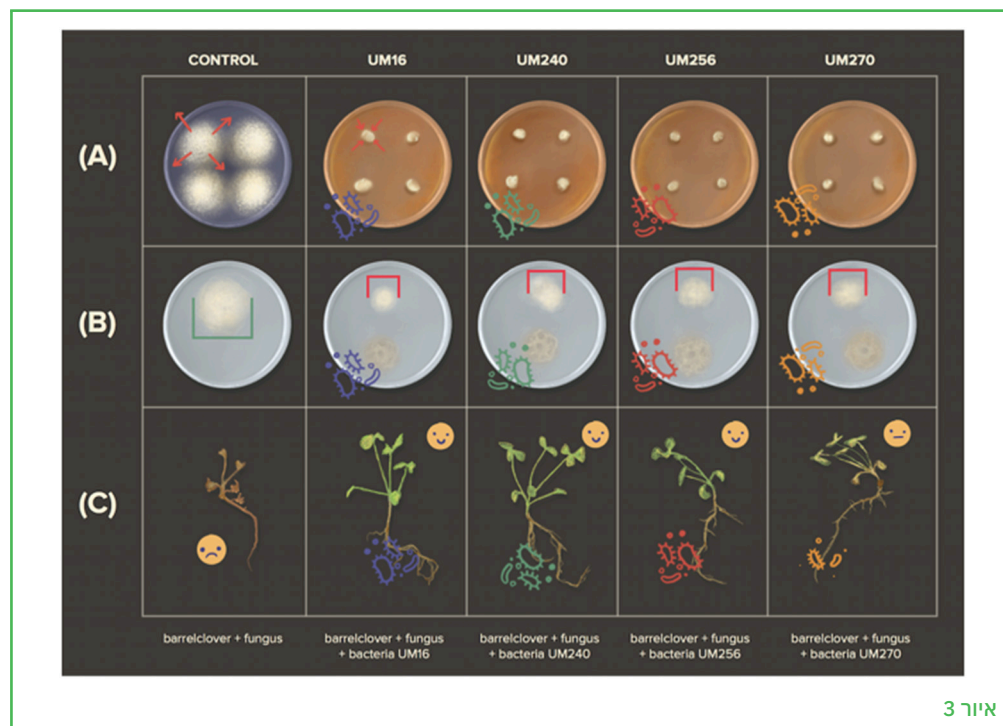
ברגע שהחיידקים ניצחו את הקרב כנגד הפטרייה, ביקשנו לדעת אם יוכלו להגן על צמח אמיתי. כדי לבחון זאת הבאנו את הפטרייה במגע עם צמח אַקְסֶפְּטָה קטועה, וראינו כי הפטרייה הפכה את גוון הצמח לחום, והרגה אותו (איור 3C). כאשר הצמח לווה על ידי החיידקים UM16, UM240, UM256, או UM270, הפטרייה לא גרמה לצמח לחלות באותה המידה שבה חלה בנוכחות הפטרייה לבדה. כלומר, המצילים החיידקים שלנו הצליחו להגן על הצמח מפני הפטרייה הפיטופתוגנית המרושעת, ולשמור עליו בחיים.

הצעד הבא: יצירת יחידת עילית של חיידקים!

כעת, סיירי ההצלה החיידקיים שלנו מוכנים לצאת לשטח, להגן על צמחים ולסייע לחקלאים, לייצר מספיק מזון עבור אוכלוסיית העולם הִגְדֵלָה. אנו עדיין חוקרים את החיידקים האלה,

איור 3

ממצאי הניסוי השני שערכנו. (A) כאשר החיידקים גודלו באותו התא של צלחת פטרי עם פטרייה, החיידקים הפחיתו את גדילתה של הפטרייה בהשוואה לצלחת הבקרה (בצד השמאלי). (B) כאשר החיידקים והפטרייה גודלו בתאים נפרדים, גדילת הפטרייה עדיין הייתה פחותה ביחס לצלחת הבקרה, מה שהעיד על כך שהחומרים שהפחיתו את גדילת הפטרייה היו תרכובות אורגניות נדיפות (החיצים והסוגריים מציגים את ההבדלים בגדילתן של הפטריות). (C) צמח אֶסְפֶּקְטָה קטועה שנדבק בפטרייה הראה פחות סימני מחלה כאשר גִדַל בנוכחותם של חיידקים.



איור 3

מאחר שלכל אחד מהם יש מנגנון ייחודי שמסייע לצמחים. כפי שכבר ראינו, ארבעת החיידקים שהצגנו במאמר הם מצילים טובים בפני עצמם, אך דמִיִּנו שארבעתם היו משלבים את כוחות-העל שלהם ליצירת יחידת עלית אחת-אז הם היו בלתי מנוצחים! זכרו, כל סוגי החיידקים, הן הידידותיים הן המזיקים, חיים יחד באדמה. ככל שהאדמה מכילה מגוון מיקרובי גדול יותר, כך גִדְלָה היכולת להילחם כנגד פיטופתוגנים. כדי שיהיה לנו מזון בריא, אנו זקוקים לאדמה בריאה ולסיועם של החיידקים הידידותיים המצילים שלנו!

מאמר המקור

Hernández-León, R., Rojas-Solís, D., Contreras-Pérez, M., del Carmen Orozco-Mosqueda, M., Macías-Rodríguez, L. I., Reyes-de la Cruz, H., et al. 2015. Characterization of the antifungal and plant growth-promoting effects of diffusible and volatile organic compounds produced by *Pseudomonas fluorescens* strains. *Biol. Control* 81:83–92. doi: 10.1016/j.biocontrol.2014.11.011

מקורות

1. Tapia-Torres, Y., and García-Oliva, F. 2013. Phosphorus availability is a product of soil bacterial activity in oligotrophic ecosystems: a critical review. *Terra Latinoam.* 31:231–42.
2. Pieterse, C. M., Zamioudis, C., Berendsen, R. L., Weller, D. M., Van Wees, S. C., and Bakker, P. A. 2014. Induced systemic resistance by beneficial microbes. *Ann. Rev. Phytopathol.* 52:347–75. doi: 10.1146/annurev-phyto-082712-102340

3. Hernández-León, R., Rojas-Solís, D., Contreras-Pérez, M., del Carmen Orozco-Mosqueda, M., Macías-Rodríguez, L. I., Reyes-de la Cruz, H., and Santoyo, G. 2015. Characterization of the antifungal and plant growth-promoting effects of diffusible and volatile organic compounds produced by *Pseudomonas fluorescens* strains. *Biol. Control* 81:83–92. doi: 10.1016/j.biocontrol.2014.11.011

פורסם אונליין: 08 ביוני 2023

נערך על ידי: Liesel G. Schneider

מנחה מדעית: Salza Palpurina

ציטוט: Hernández-León R and Tapia-Torres Y (2023) סיירי הצלה: כיצד חיידקים יכולים לתמוך בצמחים. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2021.581832-he

Hernández-León R and Tapia-Torres Y (2021) Rescue Rangers: How Bacteria Can Support Plants. *Front. Young Minds* 9:581832. doi: 10.3389/frym.2021.581832

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

COPYRIGHT © 2021 © Hernández-León and Tapia-Torres 2023. 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 למחבר(ים) 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

KONSTANTIN, גיל: 14

היי, אני קונסטנטין, המוח הצעיר הקרוב אליכם! אני מרוקן, בולגריה, ומאז שהייתי קטן היו לי שאלות כמו מה הערך במקזור, וכדומה. כיום, כמתבגר, נכנסתי מאוד לתחום האקולוגיה, והחלטתי לסייע להעלות מודעות לחלק מהבעיות שיש בעולמנו כמו זיהום אוויר, היכחדות מינים ובירוא. אם אני, תלמיד רגיל, יכול להשפיע, אז גם אתם-למה אתם מחכים, קוראים צעירים שלי!

הכותבות

ROCÍO HERNÁNDEZ-LEÓN

רוקיו הרננדז-לאון מאוהבת עמוקות בצמחים. זו הסיבה לכך שהקדישה את עצמה לחקירת היכולות שיש לחיידקים, המסייעות לצמחים לגדול. עם תואר שני ודוקטורט בביוטכנולוגיה ניסויית, היא מנסה למצוא במעבדה את החיידקים החזקים ביותר עבור המשימה החשובה הזו, במטרה לייצר מזון בדרך בטוחה, מזינה ומספקת. *r.hl83@hotmail.com





YUNUEN TAPIA-TORRES

ינואַן טאַפּיאַ-טורס היא מדענית של האדמה, שאוהבת את המורכבות של עולם החיידקים. המחקר שלה בבית הספר הלאומי ללימודים עליונים, מוֹרְלֵיָה, האוניברסיטה הלאומית האוטונומית של מקסיקו (UNAM), מתמקד בהבנת חשיבותם של חיידקים בהתמרת מולקולות שמכילות פחמן, חנקן וזרחן באדמה. היא פועלת לחיזוק מחקר בתחום ביוגיאוכימיה של האדמה במקסיקו, לְשֵׁם הבטחת אדמה פורייה בעתיד. ytapia@enesmorelia.unam.mx

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